

**Manutenção de Aeronaves
em Aviônicos**

Avançado I



SEST SENAT

Serviço Social do Transporte
Serviço Nacional de
Aprendizagem do Transporte

2016

Diretoria Executiva Nacional

Coordenação de Projetos Especiais

Educação Presencial

Manutenção de Aeronaves em Célula,
em Grupo Motopropulsor
e em Aviônicos

Responsáveis técnicos

Claudio Haro Pinto

Eduardo Barbosa Libanoro

Jorge Antonio Mendes Junior

Nilton Gasparelli Esteves

Livro Técnico

Janeiro/2016

Commons.wikimidia: A *Wikimedia Foundation* não detém a posse de quase nenhum dos conteúdos existentes nos sites Wikimedia. No entanto, quase todo o conteúdo disponibilizado pelos projetos Wikimedia pode ser utilizado livremente sem ser necessária autorização individual, sob os termos da licença atribuída pelos autores ao conteúdo que disponibilizam nesses projetos: 1) *Creative Commons Attribution license* (CC-BY) - reutilizadores são livres para fazer trabalhos derivados, deverá ser dado crédito ao(s) autor(es); 2) *Creative Commons Attribution license* (CC-SA) - reutilizadores são livres para fazer trabalhos derivados, deverão ser mencionados os termos da licença; 3) *Creative Commons Attribution license* (CC-BY-SA) - reutilizadores são livres para fazer trabalhos derivados, deverá ser dado crédito ao(s) autor(es) e deverão ser mencionados os termos da licença.

Agência Brasil: Todo o conteúdo deste site está publicado sob a Licença *Creative Commons*.

FAB: A Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, prevê que os vídeos e as fotos produzidos pela FAB e disponibilizados possam ser usados por todos por não se tratar de material comercial. Contudo, deve-se dar o devido crédito ao autor e ao proprietário do material.

As imagens não creditadas individualmente foram elaboradas exclusivamente para este livro e são de propriedade do SEST SENAT.

Todos os esforços foram feitos para creditar devidamente os detentores dos direitos das imagens utilizadas neste livro. Eventuais omissões de crédito e *copyright* não são intencionais e serão devidamente solucionadas nas próximas edições, bastando que seus proprietários contatem os editores.

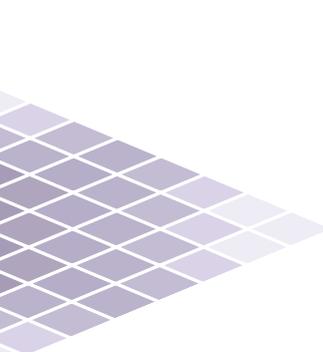
Manutenção de Aeronaves em Aviônicos - Avançado I / SEST SENAT.

-- Brasília: 2016. 630p. : il. ; 20,5 X 27,5 cm.

1. Eletrônica aplicada - aviônicos
2. Eletrônica I - semicondutores
3. Eletrônica II - técnicas digitais
4. Eletrônica III - comunicação de dados
5. Instrumentos

Copyright © 2016 por SEST SENAT.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida por qualquer modo ou meio, seja eletrônico, fotográfico, mecânico ou outros, sem autorização prévia e escrita do SEST SENAT.



Apresentação

O SEST SENAT atua nas formações inicial, continuada e técnica de trabalhadores do transporte, de suas famílias e da comunidade, por meio de 149 unidades operacionais, distribuídas em todo o país. O programa educacional do SEST SENAT visa ao aperfeiçoamento e à atualização que permitem ao profissional lidar com as constantes mudanças e inovações do mundo do trabalho.

Os cursos são acompanhados de materiais didáticos, elaborados em formatos pedagógicos arrojados e inovadores, com metodologias criativas e linguagem adequada a cada público. Assim, possibilitam o desenvolvimento de competências profissionais que viabilizam a inserção no mercado de trabalho.

Para contribuir com as novas demandas que têm surgido no modo aéreo, o SEST SENAT se empenhou em desenvolver um conjunto de livros técnicos, atualizados e inovadores, tanto no que diz respeito ao setor quanto ao mercado educacional, a fim de oferecer um material de referência aos alunos do Curso Técnico de Mecânico de Manutenção de Aeronaves, ofertado em várias unidades do SEST SENAT.

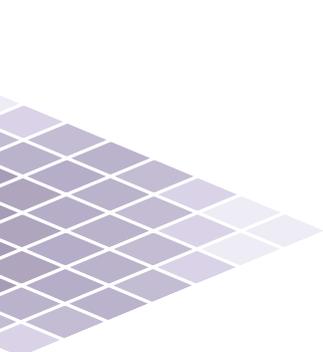
Esses livros técnicos compreendem desde o que é exigido pela legislação vigente até temas atualizados. Ressalta-se que isso atende à demanda das empresas por profissionais altamente qualificados e adequados às novas tecnologias presentes no transporte aéreo no Brasil e no mundo.

As ilustrações e imagens são também um diferencial dos livros. Além da qualidade técnica, mostram diversas opções de aeronaves, peças, motores e situações para que o aluno do Curso Técnico de Mecânico de Manutenção de Aeronaves possa sentir-se apoiado em seus estudos teóricos e práticos.

Esperamos, dessa forma, que esses livros sejam instrumento motivador para uma aprendizagem de qualidade e que possam continuar sendo para você uma fonte de consulta no futuro, quando se tornar mecânico de manutenção de aeronaves.

NICOLE GOULART

Diretora Executiva Nacional do SEST SENAT



Sumário

Unidade 1

Eletrônica aplicada – aviônicos

Capítulo 1 - Aviônica	13
1.1 Dispositivos aviônicos	13
1.2 Transdutores.....	15
1.3 <i>Display</i>	17
Capítulo 2 - Radiopropagação	25
2.1 Ondas eletromagnéticas	25
2.2 Princípio básico de antena.....	26
2.3 Modulação	27

Unidade 2

Eletrônica I – semicondutores

Capítulo 1 - Teoria e análise de circuitos eletrônicos.....	31
1.1 Métodos para análise de circuitos	31
1.2 Elementos de circuitos.....	33
Capítulo 2 - Teoria dos dispositivos semicondutores.....	51
2.1 Diodos semicondutores	51
2.2 Transistor de junção	77
Capítulo 3 - Transistor de efeito de campo e dispositivos de controle	131
3.1 Transistor de efeito de campo	131
3.2 Dispositivos de controle	140
Capítulo 4 - Sensores eletrônicos	151
4.1 Sensor de umidade	151
4.2 Varistor	152
4.3 Termistores.....	152
4.4 Termopar	153
4.5 Dispositivos fotossensíveis	155
Capítulo 5 - Eletrônica integrada.....	159
5.1 Circuito Integrado	159
5.2 Ampliadores operacionais.....	164

Capítulo 6 - Instrumentos de medição	171
6.1 Instrumentos de medição	171
6.2 Unidades de medida eletrônica	177

Unidade 3

Eletrônica II – técnicas digitais

Capítulo 1 - Sistemas de numeração	181
1.1 Numeração e códigos digitais	183
1.2 Álgebra <i>booleana</i>	199
Capítulo 2 - Famílias lógicas digitais.....	225
2.1 Características das famílias lógicas	225
2.2 Classificação	229
Capítulo 3 - Lógica combinacional	237
3.1 Somador e subtrator	237
3.2 Codificador e decodificador digital	247
Capítulo 4 - Circuitos contadores e <i>flip-flops</i>	257
4.1 Tipos e funcionamento de <i>flip-flops</i>	257
4.2 Contadores.....	268
Capítulo 5 - Processamento de sinais digitais.....	279
5.1 Conversor analógico-digital	279
5.2 Conversor digital-analógico	289
Capítulo 6 - Armazenamento de informações digitais.....	293
6.1 Classificação de memórias	293
6.2 Princípio de operação das memórias eletrônicas	299
Capítulo 7 - Introdução aos computadores	305
7.1 Organização de um sistema computacional básico.....	309
7.2 Elementos básicos de um computador	309
7.3 Palavras em sistemas computacionais	313

Unidade 4

Eletrônica III – comunicação de dados

Capítulo 1 - Barramento de dados	321
1.1 Introdução ao barramento de dados	321
1.2 Protocolo digital.....	326

Capítulo 2 - Computador	333
2.1 Estrutura básica.....	333
2.2 Linguagem de programação.....	337
2.3 <i>Software</i>	339
Capítulo 3 - Microprocessador.....	341
3.1 Operação básica do microprocessadora.....	341
3.2 Arquitetura interna.....	342
3.3 Operações internas	346
Capítulo 4 - Sistemas aviônicos.....	351
4.1 Sistema eletrônico de instrumento de voo (EFIS)	351
4.2 Sistema de comunicação aeronáutica dirigida e sistema de relatório (ACARS)	355
4.3 Sistema de gerenciamento de voo (FMS).....	356

Unidade 5

Instrumentos

Capítulo 1 - Instrumentos de aeronaves.....	363
1.1 Generalidades.....	366
1.2 Classificação dos instrumentos	367
1.3 Localização dos instrumentos na cabine.....	379
1.4 Conceito de aviônicos	381
1.5 <i>Glass cockpit</i> em modernas aeronaves	384
Capítulo 2 - Instrumentos para medição de pressão.....	387
2.1 Princípios básicos	387
2.2 Tipos de pressão	392
2.3 Instrumentos de pressão comuns em aeronaves.....	394
2.4 Sistema anemométrico	402
Capítulo 3 - Sistema de indicação remota	427
3.1 Sistema de corrente contínua de sincronismo de dados.....	428
3.2 Sistema síncro AC	431
3.3 Manômetro de indicação remota de pressão de combustível e de óleo	433
3.4 Indicadores de movimento mecânico.....	434
Capítulo 4 - Instrumentos de medição de temperatura	449
4.1 Termômetros não elétricos.....	449
4.2 Termômetros elétricos	452
Capítulo 5 - Instrumentos de indicação direcional	465
5.1 Bússola magnética	465
5.2 Indicação remota da bússola giromagnética	471
5.3 Magnetômetro de estado sólido.....	472
5.4 Sistema pictorial de navegação.....	473

Capítulo 6 - Instrumentos giroscópicos	475
6.1 Fontes de alimentação para instrumentos giroscópicos	478
6.2 Princípios dos instrumentos giroscópicos.....	488
6.3 Instrumentos giroscópicos comuns.....	494
Capítulo 7 - Sistema de piloto automático	505
7.1 Bases para a operação do piloto automático	508
7.2 Componentes do sistema.....	508
7.3 Funções do piloto automático	514
Capítulo 8 - Sistema de controle e gerenciamento de voo.....	517
8.1 Sistema automático de controle de voo.....	517
8.2 Sistema diretor de voo	519
8.3 Instrumentos eletrônicos	522
8.4 Sistema eletrônico de informação de voo	527
8.5 Sistema de gerenciamento de voo (FMS)	537
Capítulo 9 - Alarmes e avisos	541
9.1 Sistema de indicação	541
9.2 Sistema sonoro de alarme	544
Capítulo 10 - Outros instrumentos.....	547
10.1 Relógio.....	547
10.2 Indicador de torque.....	548
10.3 Indicador de fadiga.....	553
10.4 Voltamperímetro	559
Capítulo 11 - Características de construção e cuidados com os instrumentos.....	565
11.1 Materiais de fabricação	565
11.2 Apresentação e marcações de limites de operação.....	567
11.3 Remoção e instalação dos instrumentos.....	568
11.4 Cuidados no manuseio e na armazenagem.....	570
11.5 Manutenção dos instrumentos e sistema de instrumentos.....	571

Atividades

Unidade 1	
Eletrônica aplicada - aviônicos.....	581
Unidade 2	
Eletrônica I - semicondutores	583
Unidade 3	
Eletrônica II - técnicas digitais.....	589
Unidade 4	
Eletrônica III - comunicação de dados.....	596
Unidade 5	
Instrumentos.....	599

Glossário

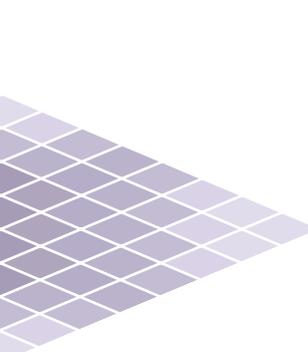
Unidade 1	
Eletrônica aplicada - aviônicos.....	611
Unidade 2	
Eletrônica I - semicondutores	611
Unidade 3	
Eletrônica II - técnicas digitais.....	613
Unidade 4	
Eletrônica III - comunicação de dados.....	615
Unidade 5	
Instrumentos.....	617

Referências

Unidade 1	
Eletrônica aplicada - aviônicos.....	621
Unidade 2	
Eletrônica I - semicondutores	621
Unidade 3	
Eletrônica II - técnicas digitais.....	622
Unidade 4	
Eletrônica III - comunicação de dados.....	623
Unidade 5	
Instrumentos.....	624

Gabarito

Unidade 1	
Eletrônica aplicada - aviônicos.....	627
Unidade 2	
Eletrônica I - semicondutores	627
Unidade 3	
Eletrônica II - técnicas digitais.....	627
Unidade 4	
Eletrônica III - comunicação de dados.....	627
Unidade 5	
Instrumentos.....	628



Unidade 1

Eletrônica aplicada – aviônicos

O desenvolvimento da eletrônica tem tornado os equipamentos de aeronave mais complexos e eficazes. Isso aumentou a segurança, mas, também, exigiu técnicos em manutenção com alto nível de conhecimento. Devido ao elevado número de inovações que dia a dia são acrescentadas aos aviônicos de uma aeronave, é de extrema importância o aperfeiçoamento do profissional dessa área.

No capítulo um, são apresentados os conceitos de aviônica e os principais dispositivos usados atualmente em aviônicos. No capítulo dois, são evidenciados as antenas e os modos de radiopropagação em uso.

Capítulo 1

Aviônica

Aviônica, em inglês, *avionics* ou *aviation electronic*, consiste em todo equipamento elétrico e eletrônico utilizado em aeronave, que, constantemente, tem evoluído, forçando o mecânico de aviônicos a estar sempre se atualizando sobre as novas tecnologias.

1.1 Dispositivos aviônicos

Os dispositivos aviônicos são analógicos ou digitais, estes últimos mais recentes e seguros.

Muitas aeronaves equipadas com dispositivos analógicos passam por modernização, pela qual são instalados dispositivos digitais, como instrumentação para navegação e comunicação, embora uma aeronave modernizada possua dispositivos analógicos e digitais.

Um exemplo é uma aeronave que, depois de modernizada, mantém seu sistema de geração elétrica, transdutores e outros dispositivos originais. Esse tipo de aeronave é híbrida e precisa de especial atenção, pois o conceito antigo de aviônica, o analógico, difere do conceito digital, moderno.

Seguem características de acordo com o conceito antigo de aviônica:

- os dispositivos analógicos utilizados em aeronave são autônomos;
- a Figura 1 demonstra um sistema mecânico de indicação de velocidade;
- os transdutores analógicos podem ser mecânicos ou elétricos.

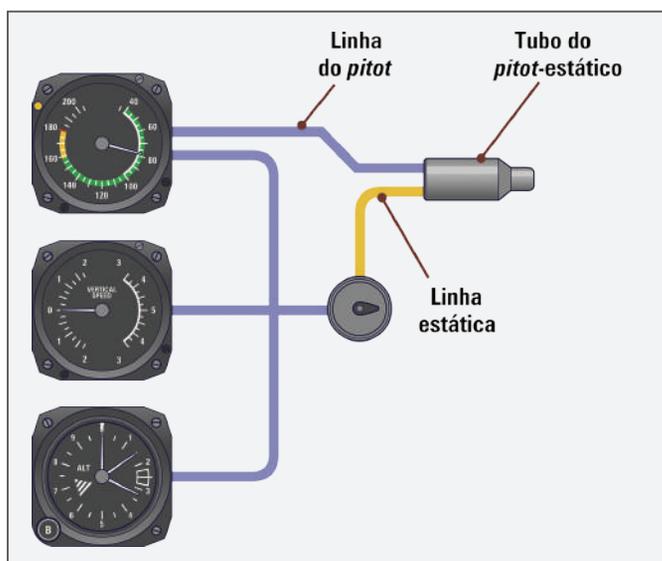


Figura 1 - Sistema antigo de indicação velocidade e altitude



Instrumentação: em aviação, consiste em tomar medida de pressão, velocidade, entre outros aspectos, com dispositivos confiáveis.

Cablagem: instalação de sistemas de cabeamento; realização de ato ou efeito de cablar; conjunto de cabos.

Cockpit: termo em inglês que significa cabine de pilotagem.

Redundância: em aviação moderna, conceito segundo o qual todas as informações são processadas por mais de um dispositivo.

Na Figura 2, é possível observar um diagrama em bloco que ilustra, de forma resumida, o funcionamento da **instrumentação** em um sistema com o conceito antigo de aviação.

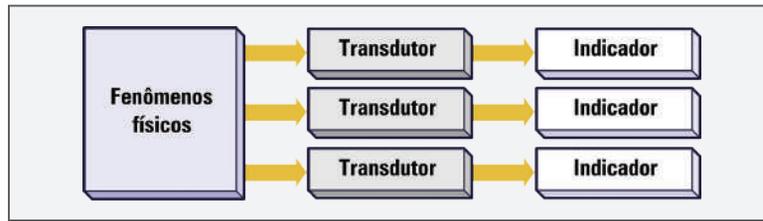


Figura 2 - Conceito antigo de aviação

O transdutor transforma o fenômeno físico em sinal compatível com o indicador, que possui componentes mecânicos, elétricos ou eletrônicos, dependendo da época em que foram concebidos. A vantagem desse tipo de sistema é que, por serem independentes, as falhas não se propagam entre os sistemas e, assim, a perda de uma unidade não compromete o sistema inteiro.

A desvantagem é de serem espessas as suas **cablagens**, ou seja, a instalação de sistemas de cabeamento. Isso contribui para o aumento do peso da aeronave e torna mais difícil a manutenção.

Sobre o conceito moderno de avionicos, é importante considerar algumas informações:

- o avanço das tecnologias ligadas à eletrônica fez o conceito de aviação mudar e trouxe, como consequência, a diminuição de componentes e integração dos sistemas;
- os fenômenos físicos são os mesmos, mas o modo de instrumentar mudou;
- a Figura 3 ilustra, em blocos, como funciona a instrumentação em sistema com avionicos modernos;
- os transdutores são elétricos ou eletrônicos e transformam os fenômenos físicos em sinais elétricos, que são tratados pelo processador. Este, por sua vez, gera informações a serem mostradas no indicador, em inglês, *display*.

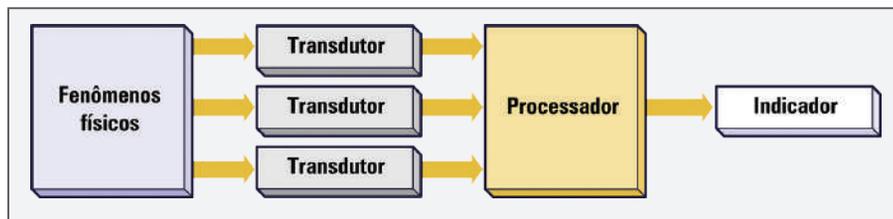


Figura 3 - Conceito moderno de aviação

As vantagens em um sistema concebido dessa maneira são especificadas a seguir:

- os sistemas são integrados e inteligentes;
- a interface com o piloto é mais amigável;
- os instrumentos estão em um único *display*, gerando economia de espaço na cabine de pilotagem, em inglês, *cockpit*.

Embora o sistema avionico com tal arquitetura seja complexo, o desempenho das aeronaves melhorou com informações mais precisas, com leituras na instrumentação mais confiáveis e **redundância** nas informações.

Em aviação, divide-se o sistema em três principais partes, os transdutores, as unidades de processamento e os *displays*.

1.2 Transdutores

De acordo com o dicionário virtual Aulete, transdutor é definido como “circuito que converte um tipo de sinal de entrada em outro tipo de sinal de saída e vice-versa (p. ex., impulso elétrico em som ou luz)”.

É fundamental que o técnico em aviação conheça e saiba os procedimentos de teste, de troca e de regulagem desses dispositivos e, para isso, é necessário estar familiarizado com as documentações técnicas da aeronave.

Alguns transdutores são comuns e usados em diversas aeronaves, tanto na aviação antiga quanto na moderna. Os mais comuns são o par térmico, a unidade tanque usada em liquidômetros capacitivos e o potenciômetro.

1.2.1 Par térmico

O transdutor capaz de transformar o calor em sinal elétrico é o par térmico, que funciona como pilha ao produzir diferença de potencial em seus terminais e sobre ele se consideram as seguintes informações:

- a operação eficiente e segura de um motor requer uma indicação constante dos gases na seção da turbina do motor, pois é crítica;
- se a temperatura estiver baixa, um bom resultado não é obtido do motor. E se a temperatura estiver alta, pode até danificá-lo;
- o par térmico consiste em dois metais diferentes, unidos em uma de suas extremidades, enquanto as outras geram a diferença de potencial (DDP) que é entregue ao sistema;
- o par térmico mais utilizado em aeronaves são duas ligas metálicas, chamadas também de cromel-alumel. Esse par é empregado em sistemas autônomos de aviação antiga e em sistemas modernos microprocessados.

A Figura 4 ilustra o uso de par térmico cromel-alumel em aviação antiga de aeronave com dois motores.

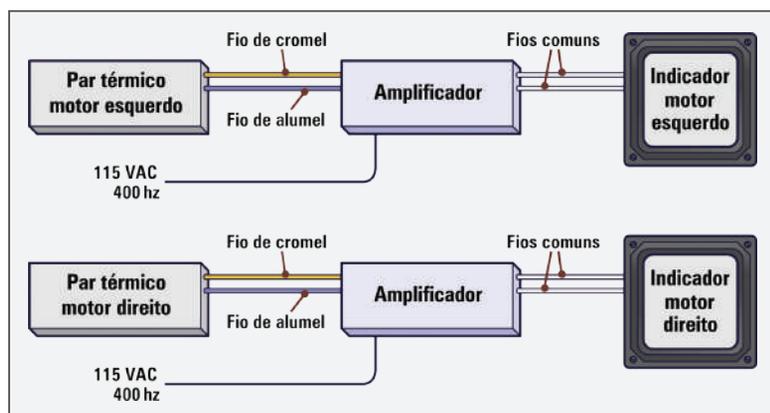


Figura 4 - Par térmico cromel-alumel empregado em aviação antiga



Backup: modo em que se garante a recuperação de dados, caso corra risco de serem perdidos.

Dielétrico: também chamados de isolantes, visto que não há possibilidade de passagem de corrente elétrica por esse material.

Aviônicos modernos assumem alta complexidade, principalmente com o princípio da redundância, no qual os dispositivos são, no mínimo, dobrados, funcionando como *backup* um do outro. A Figura 5 ilustra o uso de par térmico em aeronave com conceito moderno de aviãoica, de modo simplificado.

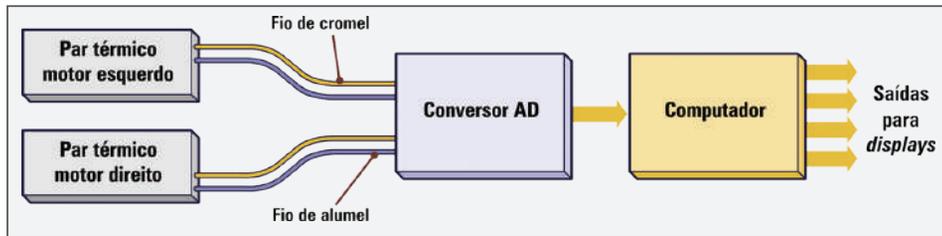


Figura 5 - Par térmico usado em aviãoica moderno

1.2.2 Unidade tanque

É construída de tubos de metal mantidos rígidos em suas respectivas posições, por espaçadores isolantes em cada extremidade. Sobre a unidade tanque se afirma que:

- quando está em operação, esse sensor é simplesmente um capacitor variável. A sua capacitância varia com a mudança na quantidade de combustível;
- a Figura 6 ilustra uma unidade tanque. O eletrodo mais interno, chamado tubo, é revestido com isolamento em verniz para prevenir curto-circuito entre as placas.

A constante dielétrica é uma característica em que materiais são isolantes, pois não há possibilidade de passagem de corrente elétrica por eles, altera o valor de um capacitor. O combustível funciona como um dielétrico entre as placas de um capacitor modificando o valor de capacitância e, proporcionalmente, a quantidade de combustível.

Quando há consumo de combustível, são reduzidas a capacitância e a área da unidade tanque tomada pelo dielétrico. Esse processo é observado na fórmula a seguir:

$$\downarrow C = \frac{K\downarrow}{4\pi} \times \frac{A}{L}$$

Tem-se que (K) é a constante dielétrica e que (A) e (L) são valores fixos correspondentes a área das placas e a distância entre elas, respectivamente.

Quando a aeronave é abastecida, a área da unidade tanque tomada pelo dielétrico aumenta, ampliando, também, a capacitância (C).

$$\uparrow C = \frac{K\uparrow}{4\pi} \times \frac{A}{L}$$

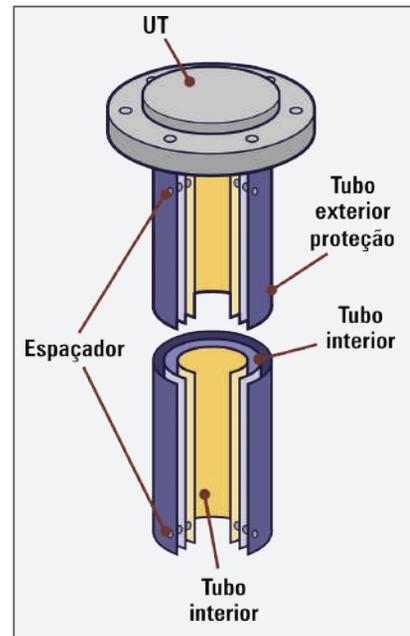


Figura 6 - Unidade tanque típica

A unidade tanque é instalada na posição vertical no tanque de combustível e há, usualmente, duas ou três unidades em cada tanque. Também é necessário usar mais de uma unidade tanque para compensar a variação na posição do avião.

Esse tipo de sensor equipa liquidômetros capacitivos autônomos, usados em aviônicos antigos e modernos.

1.2.3 Potenciômetro

O potenciômetro é capaz de transformar em sinal elétrico qualquer função que acione mecanicamente o seu cursor, como superfícies móveis e pressão. Seu símbolo está representado na Figura 7.

Nas aeronaves modernas, diferentemente do que ocorria nas de conceito antigo de aviônica, o potenciômetro é encontrado executando diversas funções.

A Figura 8 ilustra um potenciômetro empregado na indicação de quantidade de combustível em aeronave moderna de pequeno porte.



Figura 7 - Símbolo do potenciômetro

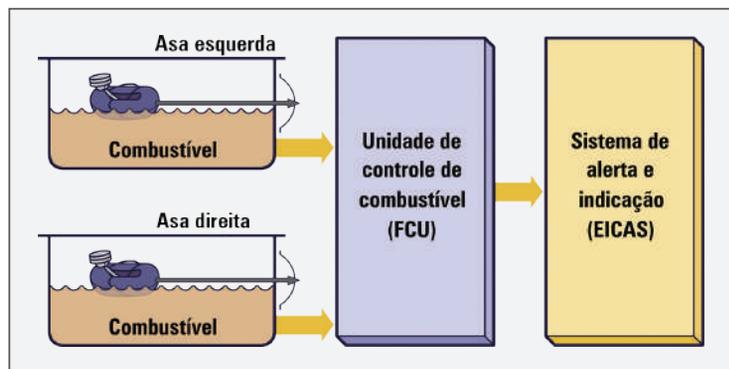


Figura 8 - Indicação de combustível utilizando potenciômetro

1.3 Display

Dispositivo que faz a interface entre o homem e a máquina. Nele, são visualizadas as informações dos transdutores de voo, dados do motor, velocidade, etc. Como principais características estão a seguir:

- as aeronaves modernas que utilizam conceito moderno de aviônica empregam uma variedade de diferentes tecnologias de *display* para visualização dos diversos sistemas do avião, tais como instrumentos de voo, instrumentação dos motores, navegação, entre outros;
- os *displays* são fabricados de tubos de raios catódicos convencionais, em inglês, *cathode ray tube* (CRT); de diodos emissores de luz, em inglês, *light emitting diode* (LED); ou de telas de cristal líquido, em inglês, *liquid crystal display* (LCD);
- os barramentos digitais utilizados em aeronaves permitem a leitura dos diversos grupos de instrumentos em uma única área funcional, como primário de voo, navegação e instrumentos do motor;



Display: mostrador ou tela onde são mostradas as informações à tripulação, tais como velocidade, horizonte artificial, radar, etc.

- os monitores de tela plana, como as telas de cristal líquido de matriz ativa, em inglês, *active matrix liquid crystal display* (AMLCD), oferecem uma economia considerável no volume, ou tamanho, em comparação a monitores CRT, porém eles ainda são utilizados.

Combinado com a evolução da miniaturização de componentes eletrônicos, o uso de dispositivos de superfície modernos montados, em inglês, *surface mount device* (SMD), e de circuitos integrados, em inglês, *very large scale integration* (VLSI), faz com que seja possível produzir um instrumento multifuncional complexo, completo com tela, em um único compartimento.

O conceito de um único *display* também reduz a quantidade de cablagem e, por sua vez, simplifica a manutenção.

Os mais recentes *displays* AMLCD têm capacidades de desempenho de parâmetros que ultrapassam os de monitores CRT tradicionais. As vantagens são de peso, energia, volume ou tamanho e confiabilidade, entre outras.

As principais tecnologias utilizadas em aviônicos atualmente são: LEDS, *display* de sete segmentos, CRT e AMLCD.

1.3.1 Diodo emissor de luz (LED)

Diodos emissores de luz (LED) são empregados como indicadores de uso geral. Comparados a lâmpadas de incandescência convencionais, operam a partir de tensões e correntes significativamente menores.

LEDs também são muito mais confiáveis do que as lâmpadas de filamento e a maioria deles fornece quantidade razoável de luz quando uma corrente direta entre 5 e 20 microamperes (mA) é aplicada.

A cor de um LED depende do material usado como **semicondutor** e existe variedade de cores disponíveis, sendo o vermelho o mais comum.

1.3.2 *Display* de sete segmentos

Displays de LED são frequentemente empregados para exibir dados numéricos. A base de tais dispositivos é o indicador de sete segmentos, como ilustrado na Figura 9, que é muitas vezes usado em grupos de três a cinco dígitos para formar um visor completo.



Figura 9 - Exemplo de quatro dígitos



Semicondutor: cristal que recebe dopagem, passando a ter característica entre condutor e isolante.

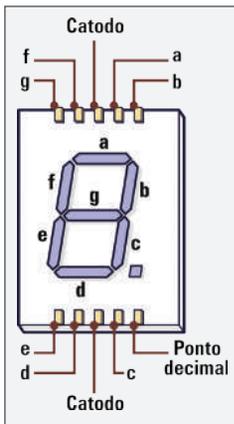


Figura 10 - Display de sete segmentos

O arranjo dos segmentos individuais de um indicador de sete segmentos é mostrado na Figura 10. Os segmentos são distinguidos pelas letras de (A) a (G), porque cada segmento inclui um LED individual.

É necessário usar a lógica para decodificar o binário, ou seja, o decimal codificado binário de dados, a fim de iluminar a combinação correta de segmentos para exibir um dígito particular. Por exemplo, o número 1 pode ser exibido por segmentos simultaneamente iluminados (B) e (C), enquanto o número 2 requer que os segmentos (A), (B), (G), (E) e (D) sejam iluminados.

O circuito de um *display* de sete segmentos é mostrado na Figura 11, enquanto um decodificador típico é apresentado na Figura 12.

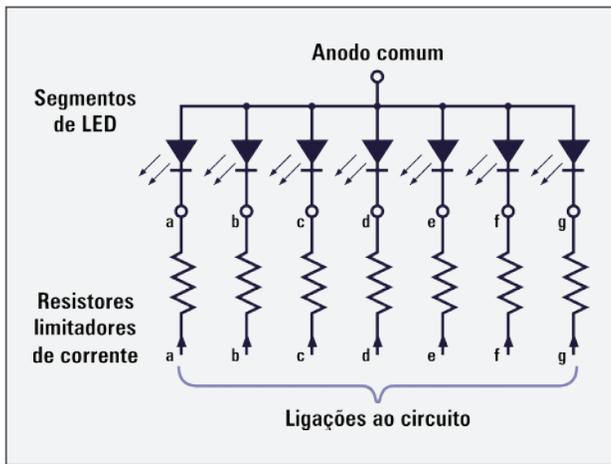


Figura 11 - Circuito de um *display* de sete segmentos

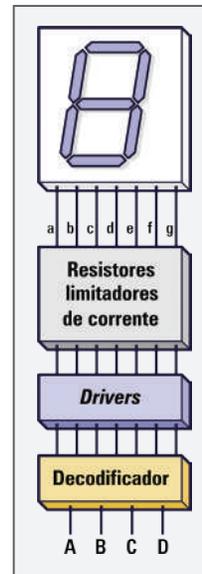


Figura 12 - Decodificador típico

1.3.3 Display CRT

Assim como indicadores de *displays* mecânicos, menos usados, lâmpadas de incandescência e contadores de bobina móvel, o tubo de raios catódicos é o mostrador de tecnologia mais antiga ainda em uso atual da aeronave.

O CRT oferece um número de vantagens significativas, incluindo a capacidade de exibir cores extremamente brilhantes, visualizadas por uma ampla gama de ângulos. Por essas duas razões, monitores CRT ainda são encontrados em aeronaves modernas, apesar da tendência crescente a substituí-los por matriz ativa de telas de cristal líquido (AMLCD).

A disposição interna de um tubo de raios catódicos típico é mostrada na Figura 13. O catodo, conjunto de grade, aquecedor e os ânodos constituem um canhão de elétrons cujo feixe de luz atinge a camada de fósforo na traseira da tela.

O aquecedor, ou filamento, eleva a temperatura do catodo, que é revestido com tungstênio, um material que emite elétrons facilmente quando aquecido. Os elétrons carregados negativamente

formam uma nuvem acima do catodo, são lançados da superfície do catodo e atraídos pelo alto potencial positivo que aparece em vários ânodos.

O fluxo de elétrons é controlado pela grade, estrutura constituída por uma rede de arame fino por meio da qual os elétrons devem passar. A grade é feita negativa em relação ao catodo, tal potencial negativo repele os elétrons. Ao controlar esse potencial, é possível variar a quantidade de elétrons que passam por meio dela, assim, controla-se o brilho da imagem no ecrã.



Ecrã: parte frontal do *display* em que são visualizadas as informações.

Deflexão: diferença na trajetória de um projétil, para a esquerda ou para a direita, causada pela rotação que lhe é imposta pelo raiamento do tubo-alma de um canhão.

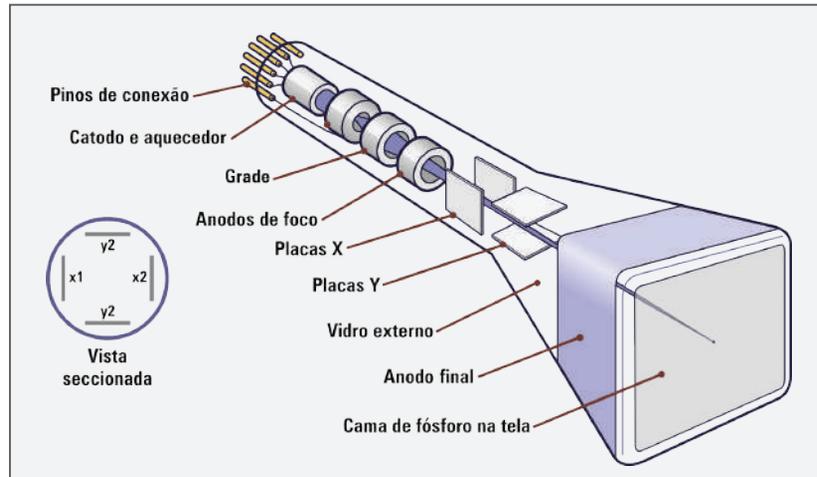


Figura 13 - Disposição interna de um CRT

Para deslocar o feixe de elétrons pelas diferentes partes da tela e nela desenhar, é necessário curvar ou desviar o feixe.

Dois métodos de **deflexão** são possíveis, dependendo do tamanho e da aplicação para o CRT.

A Figura 14 utiliza deflexão eletrostática, usada para telas pequenas (CRT). Empregando tal método, dois conjuntos de placas são introduzidos no pescoço do CRT após os ânodos de focagem e o ânodo final.

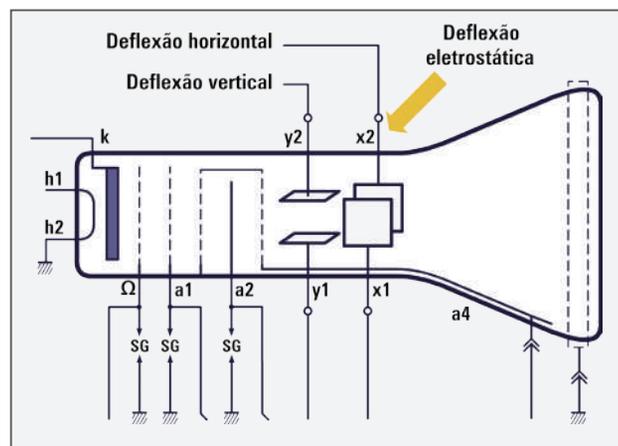


Figura 14 - CRT com deflexão eletrostática

Um par de placas está alinhado ao plano vertical (X) e elas proporcionam deflexão do feixe de elétrons na direção horizontal, enquanto o outro par de placas é alinhado em relação ao plano

horizontal (Y), e essas proporcionam deflexão do feixe de elétrons no plano vertical. Ao aplicar diferença de potencial entre as placas, é possível curvar o feixe aproximando-o ou distanciando-o de uma placa em particular, como mostrado nas Figuras 15.A, B, C e D.

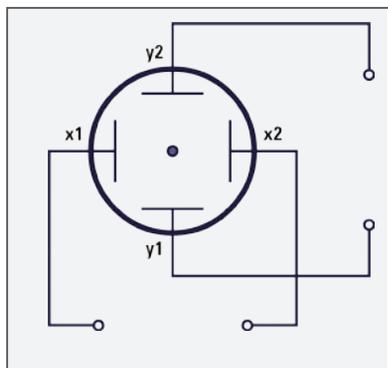


Figura 15.A - Nenhuma DDP aplicada às placas

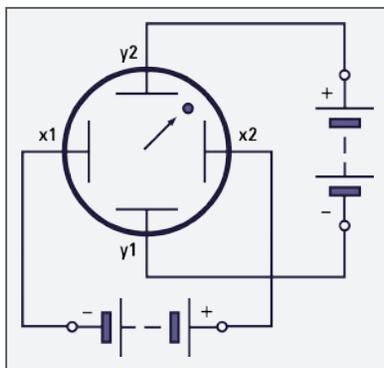


Figura 15.B - As placas (y2) e (x2) são positivas em relação às placas (y1) e (x1)

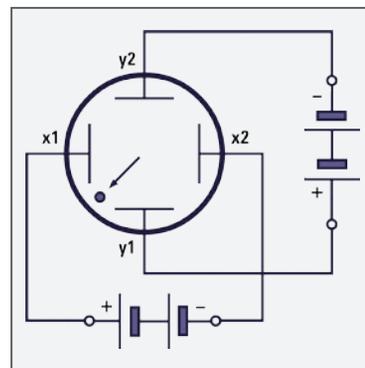


Figura 15.C - As placas (y2) e (x2) são negativas em relação às placas (y1) e (x1)

Com vistas a varrer a área total do CRT, curva-se repetidamente o feixe de elétrons, iniciando de cima para baixo e da esquerda para a direita, como mostrado na Figura 15.D.

As formas de ondas de tensão aplicadas nas placas (X) e (Y), para produzir o rastreamento, devem ser em rampa, também chamada de dente de serra com frequências diferentes. Por exemplo, para produzir a varredura de quatro linhas de exibição no *display*, mostrado na Figura 15.D, a dente de serra aplicada às placas (X) é de 50 Hertz (Hz), unidade de medida derivada do sistema internacional de unidades para frequência, a qual expressa, em termos de ciclos por segundo, a frequência de um evento periódico, de oscilações ou de rotações por segundo. Enquanto nas placas (Y) é aplicada de 200 Hz. Então, em uma varredura completa, é digitalizado em um intervalo de tempo de 20 milissegundos (ms), que corresponde a 1/50 de um segundo.

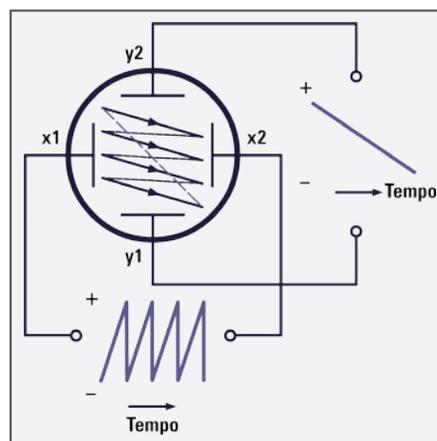


Figura 15.D - Onda dente de serra aplicada às placas do CRT

Para um *display* de alta resolução, é necessário mais do que quatro linhas, no entanto, o princípio permanece o mesmo e, para 400 linhas exibidas, usa-se um dente de serra de 100 Hz nas placas (Y). As placas (X), por isso, precisam ser alimentadas com uma onda dente de serra de 40 quilohertz (kHz), equivalente a mil vezes maior que um Hz.

Ao produzir uma varredura, há a possibilidade de iluminar pontos individuais, os chamados *pixels*, controlando o feixe de elétrons. Isso é feito por meio da aplicação de tensão ao catodo do CRT. Essencialmente, o feixe de elétrons é modulado com as informações que precisam ser exibidas. Com efeito, o feixe de elétrons é rapidamente ligado e desligado, a fim de iluminar os *pixels*. Textos são facilmente exibidos por esse método, organizando caracteres em uma matriz de células. Arranjos típicos de células de caracteres são mostrados na Figura 16.

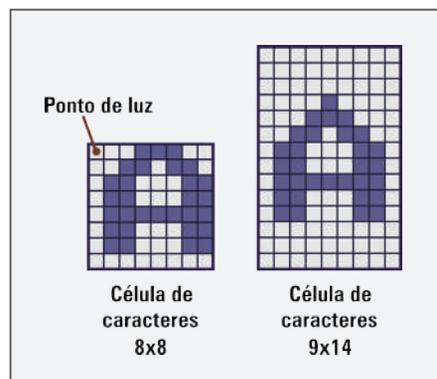


Figura 16 - Células de caracteres

A alternativa deflexão eletrostática é o uso de um campo magnético aplicado externamente para desviar o feixe de elétrons. Esse método é conhecido como deflexão eletromagnética e fundamenta-se em bobinas colocadas externamente em torno do pescoço do CRT.

Com a introdução de um padrão de fósforo de cores diferentes e por meio de um CRT mais complexo, com três catodos distintos, é possível a produção de um monitor CRT, que apresenta informação de cor. Por meio da combinação de três cores diferentes, o vermelho, o verde e o azul, em diversas proporções, é possível gerar uma gama de cores. Por exemplo, o amarelo é produzido por iluminações adjacentes de fósforo vermelho e verde, enquanto o branco é gerado por iluminação vermelha adjacente, verde e azul, como mostra a Figura 17.

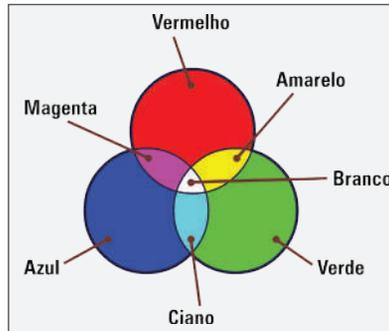


Figura 17- Cores de fósforo em CRT colorido

O arranjo de um monitor CRT colorido é mostrado na Figura 18. Três sinais de vídeo separados, correspondentes às cores *red*, *green*, *blue* (RGB), são alimentados para os três catodos do CRT. Tais sinais são derivados dos circuitos de processamento de vídeo que geram as formas de onda necessárias para variar a intensidade dos três feixes de elétrons. Cada feixe atinge respectivamente os *pixels* da cor. Por exemplo, o feixe gerado pelo catodo vermelho só coincide com os fósforos vermelhos. Um sistema de sincronismo origina formas de onda da digitalização e assegura que a relação de tempo entre eles é correta.

A deflexão usada em *display* com essa resolução é a eletromagnética.

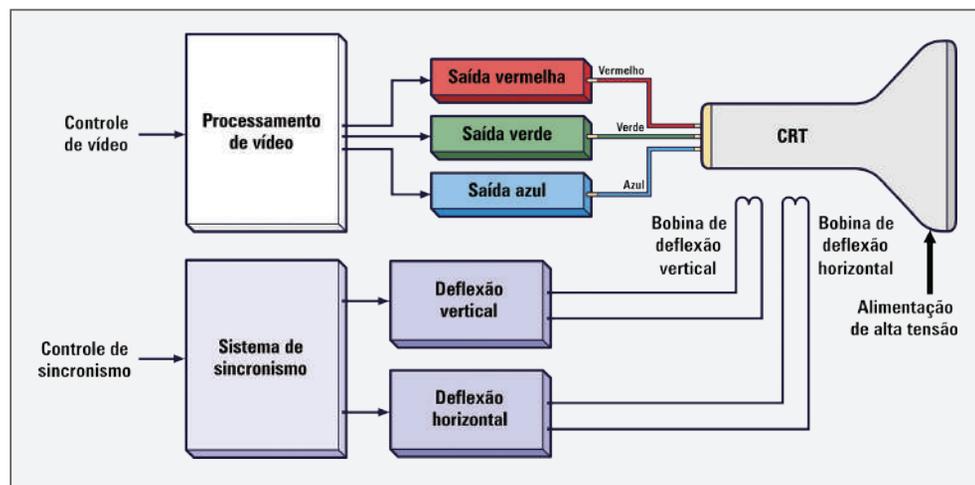


Figura 18 - Display de CRT colorido

1.3.4 Liquid crystal display (LCD)

Os cristais líquidos têm as características de sólido e as de líquido. Sólidos possuem estrutura molecular rígida, enquanto as moléculas de líquidos alteram a sua orientação e são capazes de se mover. A propriedade particular que torna os cristais líquidos atraentes para a utilização como base de painéis eletrônicos é a de que, por meio de aplicação de campo elétrico, controla-se a orientação das moléculas e a consequente passagem de luz através do cristal.

As telas de LCD podem ser reflexivas ou retroiluminadas, conforme o *display* usa luz incidente ou contém a sua própria fonte de luz, o chamado *backlight*, que, em português, trata-se da luz projetada ao fundo de uma tela. As Figuras 19.A e 19.B mostram a construção de dois tipos de exibição.

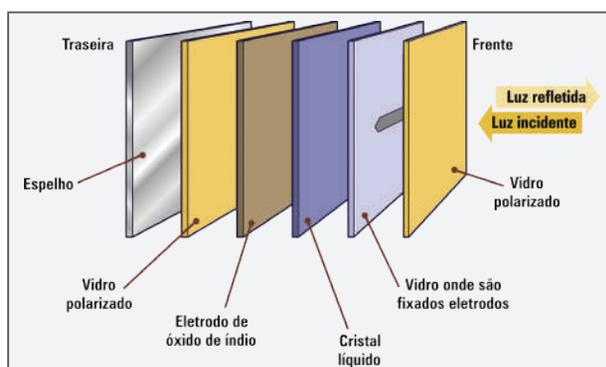


Figura 19.A - LCD com luz incidente

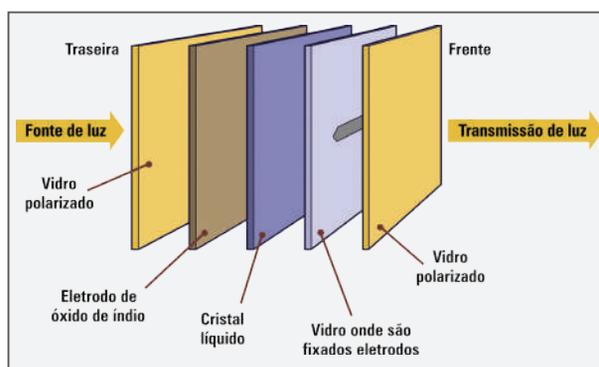


Figura 19.B - LCD com luz própria

Ao contrário de LED, visores de cristais líquidos não emitem luz própria e, por consequência, necessitam de fonte de luz, a fim de operar.

Telas maiores, que combinam vários dígitos em uma única tela, podem ser feitas facilmente. Como resultado, é possível exibir vários conjuntos de informações em um único painel de visualização comum.

Os *displays* de LCD são de matriz passiva ou matriz ativa. São apresentadas, em seguida, as características da matriz passiva:

- um sistema de LCD passivo utiliza uma grade para fornecer energia a um *pixel* específico na tela, na qual a tensão elétrica é aplicada de maneira independente para cada ponto;
- é utilizada em sistemas mais simples;
- não é empregada em sistemas mais complexos, pois, para exibir cores, demandaria milhões de conexões individuais para cada uma das três que compõem o sistema RGB. Por exemplo, uma resolução de 1280 x 1024 *pixels* necessitaria de quase quatro milhões de conexões para fornecimento de energia;
- ângulo de visão é restrito, o que causa sombra na tela conforme o indivíduo se movimentava para os lados, para cima e para baixo da tela;
- elevado tempo de resposta, em torno de 250 ms, enquanto monitores de CRT demoram cerca de 20 ms para carregar um ponto.

A seguir, são listados os aspectos correspondentes ao monitor LCD de matriz ativa (AMLCD):

- utiliza transistores de película fina, em inglês, *thin film transistor* (TFT), fabricados sobre um substrato de vidro, que é uma parte integrante do visor;
- cada transistor atua como um interruptor que transfere carga para um *pixel* de apresentação individual;
- os transistores são abordados em uma base de linha ou coluna, como com a tela de matriz passiva e ao se controlar a comutação;
- é possível a transferência de quantidades precisas de carga para o mostrador e, assim, exercer uma vasta gama de controle sobre a luz que é transmitida;
- as telas de matriz ativa possuem maior ângulo de visão, aproximando-se de 180°, maior contraste e tempo de atualização bem menor do que as de matriz passiva, cerca de 45 ms, aproximando-se bastante do mesmo quesito nos *displays* de CRT;
- cada *pixel* é composto de três *subpixels*, sendo um vermelho, outro verde e outro azul, ou seja, o sistema de cores RGB;
- cada *subpixel* possui 256 variações de tonalidades, cada um deles pode se tornar 256 cores diferentes. Isso significa que um *display* LCD reproduz 16,8 milhões de cores, somadas todas as combinações possíveis de todos os tons de cada *subpixel*:
 - uma tela SVGA tem resolução de 800 colunas x 600 linhas, é formada por 480.000 *pixels*. Como cada um deles tem três cores, portanto, o total é de 1.440.000 divisões na tela;
 - uma tela XVGA tem resolução de 1024 x 768, possui 786.432 *pixels* e 2.359.296 divisões;
- quanto maior a resolução da tela, mais divisões ela tem;
- cada divisão da tela é controlada por um minúsculo transistor de efeito de campo de óxido de metal semicondutor, em inglês, *metal-oxide-semiconductor field effect transistor* (MOSFET);
- a alta resolução do *display* AMLCD permite o uso na aeronave em aplicações como radar meteorológico, instrumentos de voo, etc.
- alguns fabricantes de tela LCD usa uma tecnologia na qual os cristais líquidos são alinhados horizontalmente, diferentemente das telas tradicionais cujo alinhamento é vertical. Chamado de *in-plane switching* (IPS) essa variação da tecnologia LCD permite aumentar a taxa de atualização e o ângulo de visão.

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que a aviônica compreende toda a eletrônica da aeronave. Os aviônicos modernos mudaram o conceito de manutenção, são mais confiáveis e seguros.

A principal mudança na aviônica está na forma de tratar os sinais adquiridos dos transdutores, e como são mostrados à tripulação por meio de *displays* de alta resolução.

Capítulo 2

Radiopropagação

Radiopropagação é a transmissão de ondas eletromagnéticas ou rádio através do espaço. Com o desenvolvimento de tecnologias, foi possível haver comunicação de um ponto fixo na terra com um ponto em deslocamento (avião), possibilitando a aviação moderna tornar-se eficiente e segura.

Na transmissão e recepção de ondas de rádio, as antenas são fundamentais. Nas aeronaves, as antenas constituem partes importantes fixadas na estrutura, delas dependem os sistemas de comunicação e navegação. Isso posto, são explicadas a propagação das ondas de rádio e o princípio de funcionamento das antenas.

2.1 Ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas foram comprovadas pela primeira vez em 1887 pelo físico Heinrich Hertz. Em experiência, ele usou uma fonte de alimentação alternada (oscilador), duas esferas de cobre, que constituem o transmissor, e um arco metálico, que corresponde ao receptor, conforme ilustrado na Figura 20.A.

Duas esferas distanciadas o suficiente para permitir o surgimento de arcos voltaicos (faíscas) foram por ele alimentadas, gerando ondas eletromagnéticas, de acordo com a Figura 20.B.

No arco metálico (receptor), também saltaram faíscas, o que reforçou a existência das ondas eletromagnéticas (Figura 20.C).

Com um modelo semelhante, é possível haver comunicação entre dois pontos através de código morse. Na experiência de Hertz, as duas esferas e o arco metálico correspondem a antenas. Estas evoluíram até a atualidade, em uma aeronave várias antenas são instaladas para alimentar diversos sistemas, tais como o de comunicação, de navegação, de radar, etc.

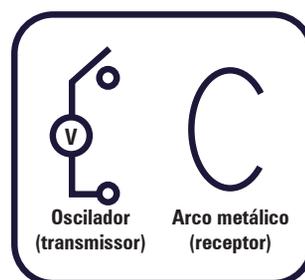


Figura 20.A - Experiência de Hertz - sistema em repouso



Figura 20.B - Faíscas elétricas no transmissor

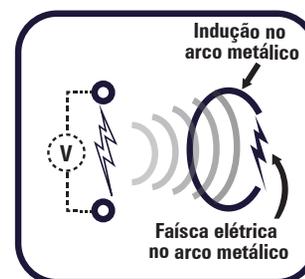


Figura 20.C - Faíscas elétricas no receptor

2.2 Princípio básico de antena

As antenas são transdutores capazes de lançar na atmosfera ondas eletromagnéticas oriundas de um transmissor e, em contrapartida, transformam essas ondas em sinal elétrico.

Em uma linha de transmissão, o campo elétrico gerado por um oscilador, ou corrente alternada, estende-se das cargas de um condutor às de outro e caminha da esquerda para a direita (Figura 21). Quando a linha de transmissão está aberta, o campo elétrico estende-se ao espaço (Figura 22).

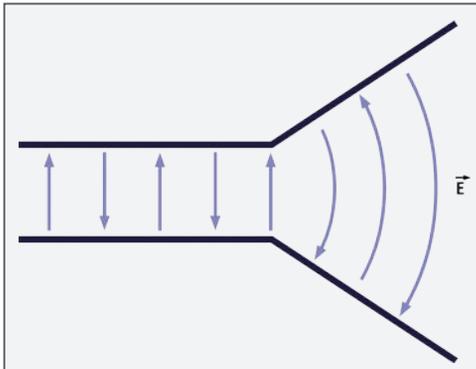


Figura 21 - Campo elétrico variável entre dois condutores

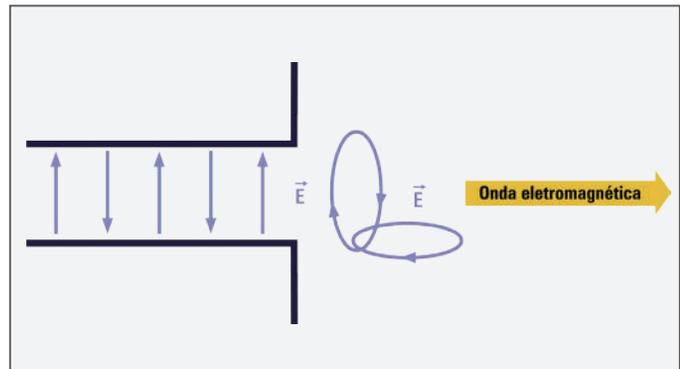


Figura 22 - Terminais de antena - campos elétricos emitidos para o espaço

A onda eletromagnética, também conhecida como onda de rádio, é uma energia que se propaga pelo espaço, em forma de vibração, a uma velocidade de 300.000 km/s.

Cada vibração dessa energia é chamada de ciclo, e o número de ciclos por segundo é denominado frequência. A unidade de medida de frequência é Hertz (Hz), um Hz corresponde a um ciclo por segundo.

A distância percorrida pela onda durante o ciclo é chamada de comprimento de onda, como se observa na Figura 23.

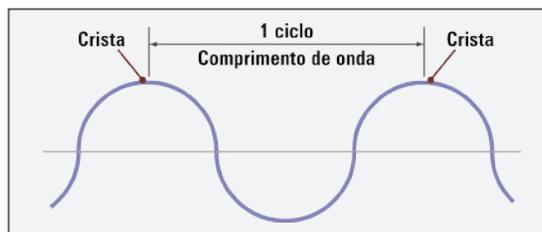


Figura 23 - Comprimento de onda

O comprimento de onda também pode ser definido como a distância compreendida entre duas cristas consecutivas de um ciclo.

As ondas de rádio funcionam como um envelope que leva a informação de um transmissor para um receptor. Esse processo é chamado modulação e ocorre de duas formas: modulação em amplitude (AM) e modulação em frequência (FM).

2.3 Modulação

Na modulação em amplitude, a informação está contida nas variações da amplitude da onda. Na Figura 24, percebe-se a portadora, também conhecida como envelope, e à direita se encontra, após o processo de modulação, a portadora modulada com a informação gravada.

Quando tal sinal é captado por uma antena, o receptor retira a portadora, restando a informação desejada.

Semelhantemente, na modulação por frequência, a informação está gravada em variações de frequência (Figura 25).

As frequências de rádio estendem-se, aproximadamente, de 300 Hz a 300 gigahertz (GHz). Na Figura 26, as faixas de frequência estão distribuídas de acordo com os equipamentos que as utilizam.

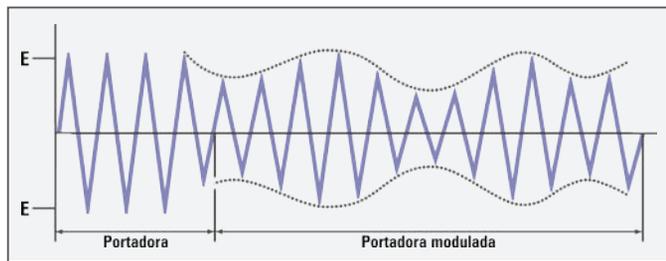


Figura 24 - Modulação por amplitude (AM)

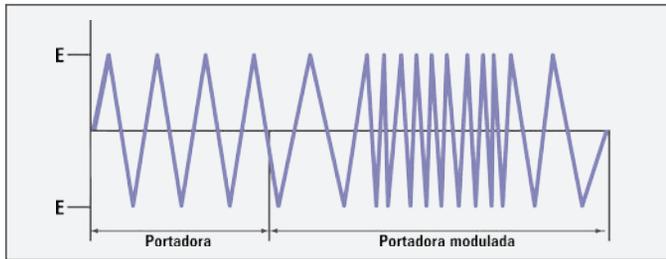


Figura 25 - Modulação por frequência (FM)

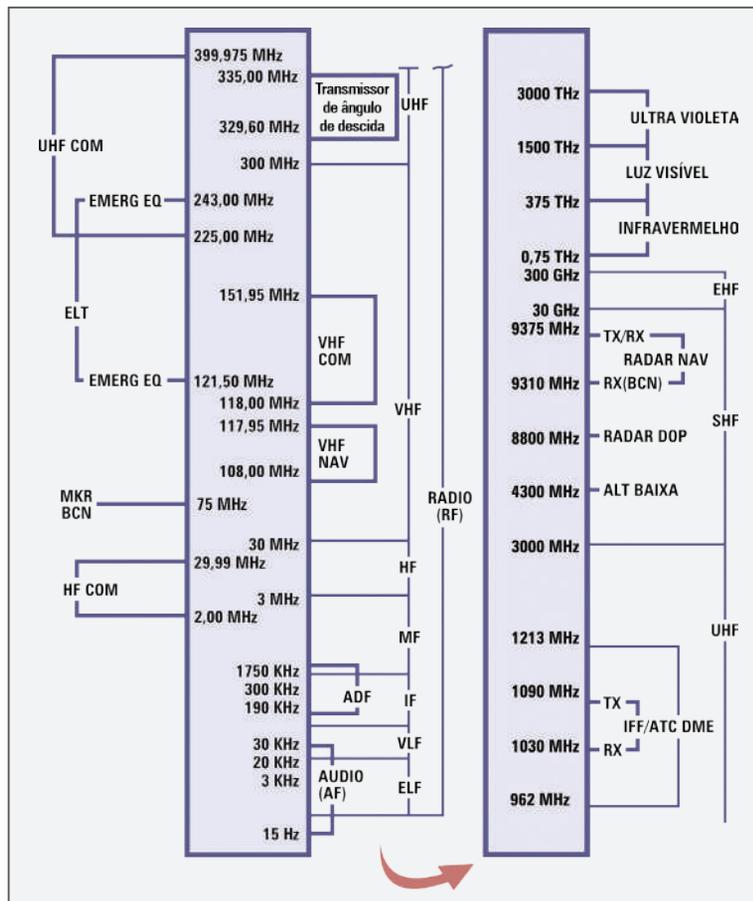
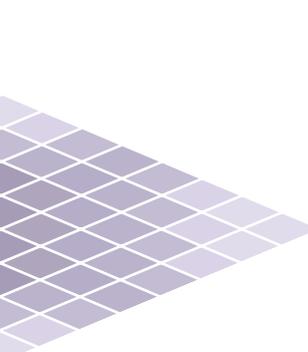


Figura 26 - Frequências de rádios

Resumindo

Neste capítulo, observou-se que as ondas de rádio são usadas para comunicação e navegação de aeronave, e as antenas são os elos fundamentais para a operação desses sistemas.



Unidade 2

Eletrônica I – semicondutores

Desde os primórdios, o homem tem buscado criar invenções que facilitem sua vida, reduzindo o tempo e o esforço físico demandados por suas atividades de rotina. No campo da eletrônica, o grande avanço ocorreu devido à 2ª Guerra Mundial, com a criação de máquinas que realizavam cálculos balísticos com precisão.

O início da era eletrônica foi marcado pela utilização das válvulas. Elas proporcionaram um avanço tecnológico enorme à época, tendo como principal aplicação cálculos balísticos por intermédio dos primeiros computadores e equipamentos eletrônicos empregados com fins militares. Apesar da grande importância, a válvula apresentava alguns inconvenientes como pouca confiabilidade, tamanho relativamente grande, elevado valor de tensão de alimentação e, conseqüentemente, grande consumo de potência. Por esses motivos, anos mais tarde ela foi substituída pelos dispositivos semicondutores, revolucionando o campo da eletrônica e da informática. Sua utilização permitiu uma diminuição significativa no tamanho dos equipamentos, além da expansão da capacidade de processamento de seus circuitos internos.

Na década de 1950, por meio do transistor, foi criado o primeiro computador comercial. Anos mais tarde, o circuito integrado (CI) fez com que os equipamentos se tornassem menores e mais potentes. A evolução dos CIs ensejou a miniaturização das máquinas e permitiu que novas tecnologias se desenvolvessem rapidamente até chegar aos padrões atuais, facilitando a vida das pessoas e das instituições e tornando a sociedade cada vez mais integrada e sem barreiras.

Esta unidade trata primeiramente dos teoremas de análise de circuitos para realização de cálculos de tensão, corrente e potência em qualquer configuração de um circuito. Em um segundo momento, são mostrados os dispositivos semicondutores mais comuns como os diodos, transistores, transistores de efeito de campo e tiristores. Em seguida, são apresentados os sensores eletrônicos mais comuns e os circuitos integrados encontrados nos principais módulos eletrônicos dos diversos tipos de aeronaves. Concluindo, serão abordados os instrumentos de medição presentes no dia a dia nas atividades de manutenção.

Capítulo 1

Teoria e análise de circuitos eletrônicos

O estudo do comportamento dos circuitos eletrônicos requer técnicas de análise específicas, conforme a complexidade do equipamento. Os assuntos estudados em eletricidade abrangem, principalmente, circuitos com diversos componentes, porém com apenas uma fonte de alimentação. Neste capítulo, são apresentados os circuitos com mais de uma fonte e as técnicas para realizar cálculos de tensão, corrente e potência nos componentes destes circuitos.

Os métodos e teoremas de análise de circuitos permitem analisar qualquer circuito, independentemente do número de fontes de tensão e corrente que eles apresentem. Para melhor compreensão desses métodos e teoremas, também serão vistos os conceitos de fonte de corrente e tensão.

1.1 Métodos para análise de circuitos

A análise de circuito ocorre de várias formas. Diversos físicos desenvolveram métodos e teoremas a fim de calcular os parâmetros necessários ao desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos.

Cada método apresenta característica e procedimentos específicos, mas todos alcançam o mesmo objetivo. Conhecer o comportamento das fontes de tensão e corrente serve de base à compreensão dos métodos e teoremas.

1.1.1 Fonte de tensão e corrente

Os circuitos eletrônicos, para funcionar, necessitam de energia fornecida por fonte de tensão ou de corrente.

A fonte de tensão apresenta dois potenciais: positivo e negativo. O positivo é representado por um traço maior que o do negativo, conforme mostra a Figura 1.A. Ela é utilizada na maioria dos circuitos quando comparada às de corrente. Também existem fontes de tensão variáveis, cujo valor alterna entre dois limites, e são representadas por uma seta cortando a fonte, conforme mostra a Figura 1.B.

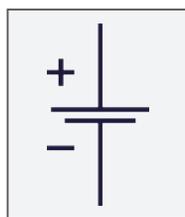


Figura 1.A - Fonte de tensão fixa



Figura 1.B - Fonte de tensão variável

A fonte de corrente é representada por uma seta dentro de um círculo, que indica o sentido da corrente no circuito. Não é comum encontrar fontes de corrente (Figura 2) nos esquemas elétricos dos circuitos eletrônicos.

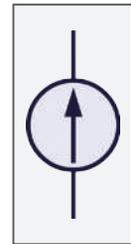


Figura 2 - Fonte de corrente

Da mesma forma que as fontes de tensão, as fontes de corrente são variáveis. São representadas por uma seta cortando a extensão da fonte, do mesmo modo que as fontes de tensão variáveis.

1.1.2 Associação de fontes de tensão e corrente

Fontes de tensão são conectadas em série para aumentar ou diminuir a tensão total aplicada ao circuito. Para obter a tensão resultante, as fontes de mesma polaridade são somadas e subtraem-se as de polaridades opostas. A polaridade resultante é aquela para a qual a soma é maior. Na Figura 3, as fontes de tensão estão em série e com a mesma polaridade, portanto a fonte resultante é a soma das tensões, mantendo a polaridade.

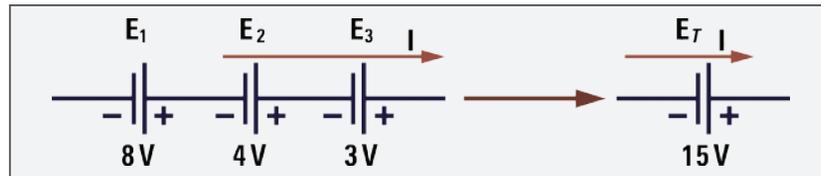


Figura 3 - Associação de fontes de tensão em série com mesma polaridade

Na Figura 4, a fonte resultante é a soma das de mesma polaridade subtraindo as de polaridade oposta.

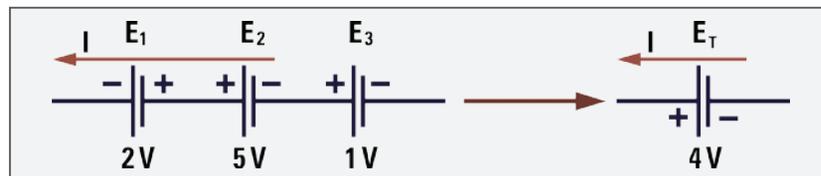


Figura 4 - Associação de fontes de tensão em série com polaridades opostas

Fontes de tensão são conectadas em paralelo para aumentar o valor de corrente fornecido ao circuito. Obrigatoriamente, as fontes são de mesmo valor (Figura 5).

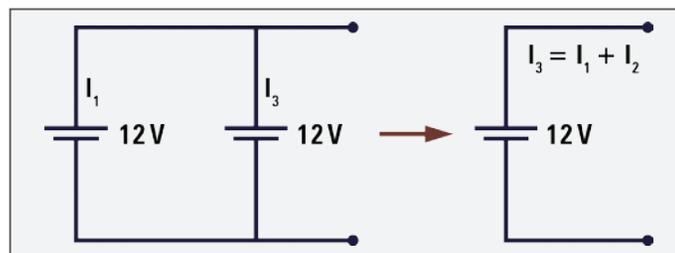


Figura 5 - Associação de fontes em paralelo



Fontes de corrente: a utilização de fontes de corrente em diagramas esquemáticos é muito pouco utilizada, sendo a fonte de tensão a mais usada nos diagramas dos diversos circuitos eletrônicos. Ela é comumente empregada em análise de circuitos, por meio dos teoremas de análise de circuitos.

Assim como na associação das fontes de tensão em paralelo (Figura 6), as fontes de corrente, quando associadas em série, possuem os mesmos valores. Caso contrário, não são ligadas em série. Havendo duas ou mais fontes de corrente ligadas em paralelo, elas podem ser substituídas por uma única fonte de corrente com o valor e o sentido ambos resultantes. Se elas estiverem com o mesmo sentido, as correntes são somadas. Caso contrário, as correntes são subtraídas e permanece o sentido da fonte de maior valor. Se o circuito possuir resistores, é feito o cálculo da resistência equivalente.

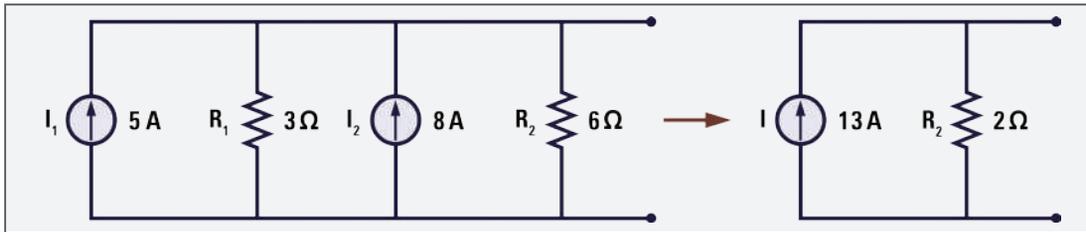


Figura 6 - Associação de fontes de corrente em paralelo

Por estarem no mesmo sentido, a fonte resultante é a soma das duas e o sentido permanece. A resistência equivalente é o resultado do resistor de 3Ω e o de 6Ω em paralelo, ou seja, 2Ω .

1.2 Elementos de circuitos

Além dos diversos componentes comuns aos circuitos, é importante conhecer algumas definições mais comumente utilizadas, como as mostradas a seguir.

- a) Circuito - consiste em dois ou mais elementos conectados por condutores ideais. São fios de resistência nula por onde a corrente flui livremente sem acumular energia.
- b) Nó - ponto do circuito no qual se ligam dois ou mais elementos (Figura 7).

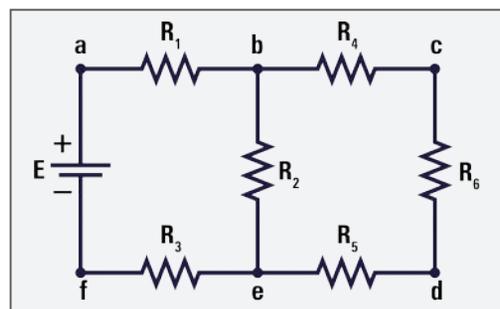


Figura 7 - Nó

- c) Ramo - representação de um componente conectado entre dois nós, tal como resistor ou fonte de tensão. Na Figura 8, o resistor 2 está conectado a um ramo do circuito entre os nós 1 e 2.

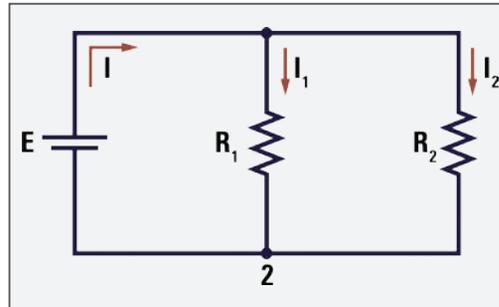


Figura 8 - Ramo

- d) Malha - é um caminho fechado por onde a corrente passa. O circuito contém duas malhas (malha 1 e malha 2). A presença ou ausência de fonte de tensão não é considerada (Figura 9).

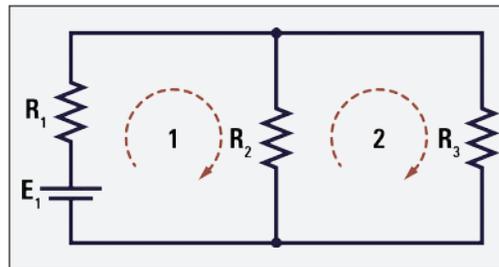


Figura 9 - Malha

A distinção entre fontes de tensão (baterias e geradores) e quedas de tensão nos componentes é feita da seguinte maneira:

(E) para fontes de tensão (volts) e (V) para quedas de tensão (volts).

1.2.1 Leis de Kirchhoff

As leis de Kirchhoff estão divididas em duas: para a tensão (LKT) e para a corrente (LKC).

- a) Lei de Kirchhoff para a tensão (LKT) - também conhecida como lei das malhas, a tensão aplicada a um circuito, ou malha fechada, é igual à soma das quedas de tensão. No exemplo a seguir, os pontos (A), (B), (C) e (D) formam uma malha fechada (Figura 10).

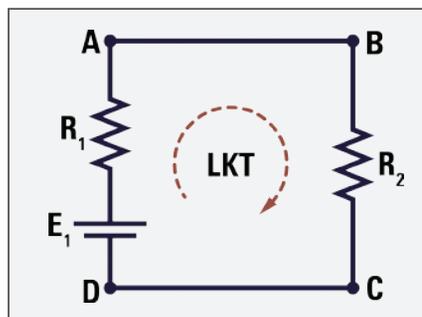


Figura 10 - Malha fechada

Desse modo, a tensão fornecida pela fonte é distribuída pelos elementos do circuito. Logo:

$$E = V_1 + V_2$$

Em que:

(E) = tensão da fonte;

(V₁) = queda de tensão em (R₁);

(V₂) = queda de tensão em (R₂).

Exemplo: calcular o valor de (V₃) aplicando a Lei de Kirchhoff para a tensão (LKT) (Figura 11).

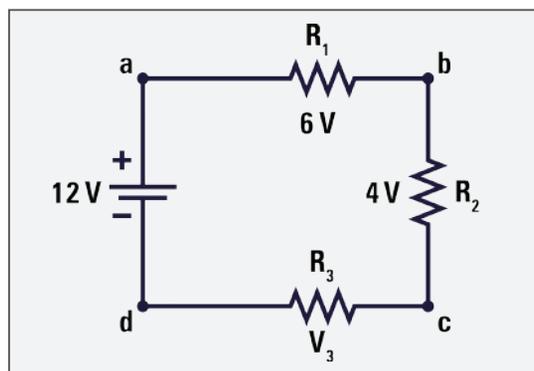


Figura 11 - Exercício LKT

$$\begin{aligned} E &= V_1 + V_2 + V_3 \\ 12 &= 6 + 4 + V_3 \\ V_3 &= 12 - 6 - 4 \quad \rightarrow \quad V_3 = 2 \text{ V} \end{aligned}$$

Além da LKT, para calcular a queda de tensão nos elementos de um circuito, aplica-se a **regra dos divisores de tensão**. Essa regra diz que, para os circuitos em série (Figura 12), a queda de tensão nos resistores se divide na mesma proporção que os valores das resistências. Dessa forma, quanto maior o valor da resistência, maior é a queda de tensão nele.

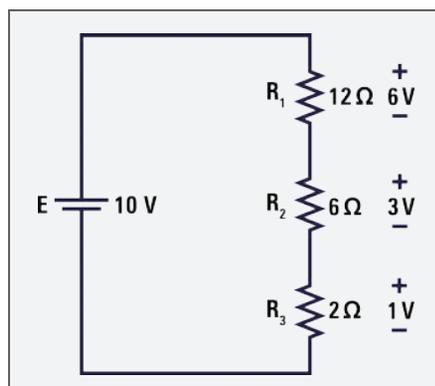


Figura 12 - Divisão da tensão em um circuito em série

Regra dos divisores de tensão: a fórmula da regra dos divisores de tensão é resultado da aplicação da lei de Ohm. A fórmula facilita e agiliza os cálculos por parte dos estudantes e projetistas.



Com a regra dos divisores de tensão (Figura 13), é possível calcular a queda de tensão nos resistores sem conhecer o valor da corrente que flui no circuito. Aplicando-se a lei de Ohm, tem-se:

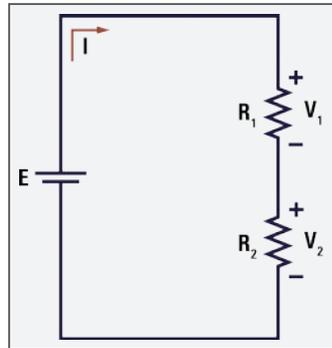


Figura 13 - Divisor de tensão

$$R_{\text{Total}} = R_1 + R_2 \quad \text{e} \quad I_{\text{Total}} = \frac{E}{R_t}$$

Substituindo (I) na fórmula:

$$V_1 = IR_1 = \left(\frac{E}{R_t} \right) R_1 = \left(\frac{R_1}{R_t} \right) \cdot E$$

$$V_2 = IR_2 = \left(\frac{E}{R_t} \right) R_2 = \left(\frac{R_2 E}{R_t} \right)$$

Observar que o formato para (V_1) e (V_2) segue:

$$V_x = \frac{R_x E}{R_t} \quad (\text{regra dos divisores de tensão})$$

Em que:

- (V_x) = tensão em (R_x);
- (E) = tensão da fonte;
- (R_t) = resistência total do circuito.

Essa regra possibilita calcular a queda de tensão em qualquer resistor de circuito em série sem a necessidade de determinar a corrente total.

b) Lei de Kirchhoff para a corrente (LKC) - esta lei afirma que a soma algébrica das correntes que entram em um nó é igual à soma das correntes que saem deste nó. Na Figura 14, a aplicação da lei de Kirchhoff para a corrente ocorre da seguinte maneira:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

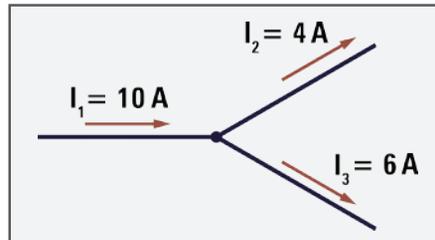


Figura 14 - LKC

Exemplo: determinar as correntes (I_3) e (I_5) no circuito (Figura 15).

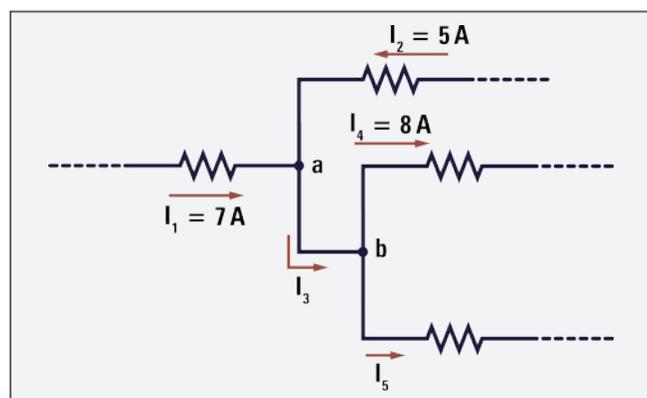


Figura 15 - Cálculo de corrente através da LKC

Resolução:

- aplica-se primeiro a lei de Kirchhoff para corrente ao nó (a);

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= I_3 \\ 7 \text{ A} + 5 \text{ A} &= I_3 \\ I_3 &= 12 \text{ A} \end{aligned}$$

- conhecendo o valor de (I_3), aplica-se a lei de Kirchhoff para o nó (b).

$$\begin{aligned} I_3 &= I_4 + I_5 \\ 12 \text{ A} &= 8 \text{ A} + I_5 \\ I_5 &= 12 \text{ A} - 8 \text{ A} \\ I_5 &= 4 \text{ A} \end{aligned}$$

A regra dos divisores de corrente diz que a corrente se divide na mesma proporção que os valores de resistência nos circuitos paralelos (Figura 16). Conseqüentemente, quanto maior o valor do resistor, menor é a corrente que passa por ele.

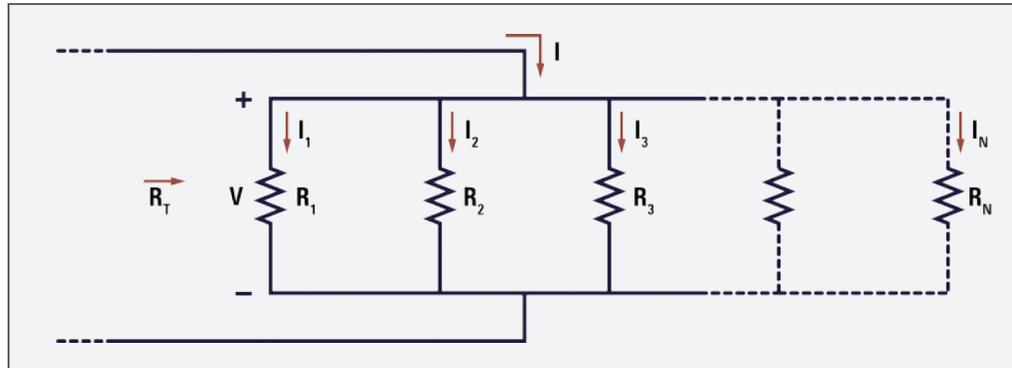


Figura 16 - Divisor de corrente

A regra dos divisores de corrente também possui fórmula para o cálculo da corrente em associação de resistores em paralelo. Aplicando-se a Lei de Ohm, tem-se:

$$I_x = \frac{R_t}{R_x} I \text{ (regra dos divisores de corrente)}$$

Em que:

- (I) = corrente total do circuito;
- (Ix) = corrente em (Rx);
- (Rt) = resistência equivalente do circuito;
- (Rx) = resistor por onde passa a corrente em que se deseja saber.

Exemplo: determinar a corrente (I₂) no circuito (Figura 17).

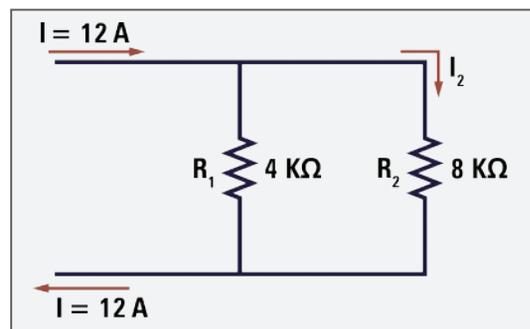


Figura 17 - Exercício LKC

Resolução:

$$I_2 = \frac{R_1 I_t}{R_1 + R_2} = \frac{4 \text{ k} \times 12}{4 \text{ k} + 8 \text{ k}} = \frac{48}{12} = 4 \text{ A}$$

1.2.2 Teorema da superposição

O teorema da superposição é utilizado para realizar cálculos em circuitos contendo uma ou mais fontes de tensão ou corrente. Ele consiste em analisar cada fonte do circuito separadamente. O valor resultante da corrente e tensão em cada elemento é obtido efetuando a soma algébrica dos efeitos individuais. Dessa forma, o número de circuitos a serem analisados é igual ao número de fontes do circuito.

Para analisar o efeito individual de cada fonte do circuito, coloca-se um curto-circuito nos terminais das fontes de tensão ou um circuito aberto nos terminais das fontes de corrente, exceto a fonte a ser analisada, conforme a Figura 18.

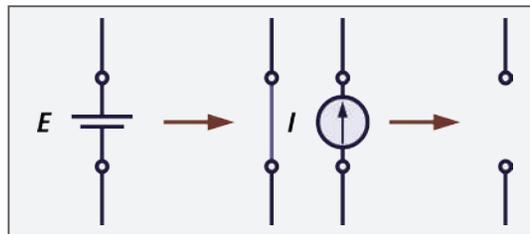


Figura 18 - Fontes equivalentes

Exemplo: determinar (I_1) para o circuito a seguir (Figura 19).

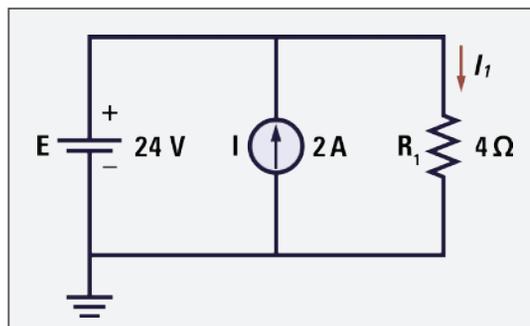


Figura 19 - Exercício superposição

Resolução:

O primeiro passo é retirar a fonte de tensão e substituir por um curto-circuito ou a fonte de corrente por um circuito aberto. Neste exemplo, substituiu-se a fonte de tensão de 24 V por um curto-circuito (Figura 20).

Com o circuito configurado apenas com a fonte de corrente, analisa-se o valor da corrente que passa pelo resistor (R_1). Neste caso, como a fonte de tensão foi substituída por um curto-circuito, toda a corrente fornecida pela fonte de (2 A) passa pelo ramo onde está o curto-circuito, sendo a corrente em (R_1) igual a zero.

$$I_1 = 0 \text{ A}$$

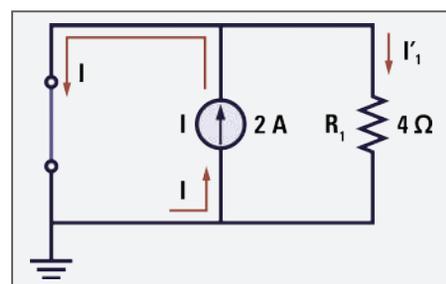


Figura 20 - Substituição da fonte de tensão

O segundo passo é calcular o valor da corrente em (R_1) retirando-se a fonte de corrente e a substituindo por um circuito aberto (Figura 21).

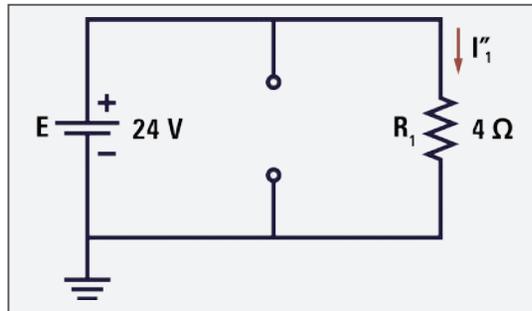


Figura 21 - Substituição da fonte de corrente

A fórmula utilizada para a resolução do exercício é mostrada a seguir, tendo como base o circuito da Figura 21.

$$I = \frac{E}{R} = \frac{24}{4} = 6\text{ A}$$

O terceiro passo é fazer a soma algébrica das correntes calculadas a partir de cada fonte separadamente. As correntes de mesmo sentido são somadas e as de sentidos opostos são subtraídas. O sentido da corrente resultante é o mesmo que o da corrente de maior valor. No exemplo, o valor da corrente em (R_1) produzida pela fonte de corrente é igual a zero, e o produzido pela fonte de tensão é igual a (5 A). Desse modo, a resultante é:

$$I_t = I_1 + I_2 = 0\text{ A} + 6\text{ A} = 6\text{ A}$$

1.2.3 Teorema de Thèvenin

O teorema de Thèvenin consiste em substituir todos os componentes do circuito por um circuito equivalente, formado por um resistor em série com uma fonte de tensão. Esse circuito recebe o nome de equivalente de Thèvenin (Figura 22).

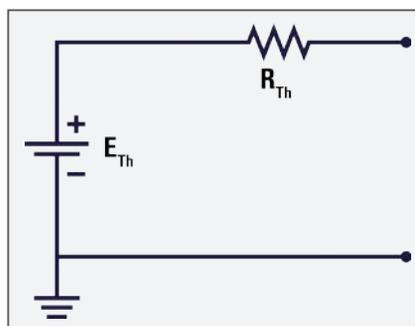


Figura 22 - Equivalente de Thèvenin

Na Figura 23, o circuito (A) foi substituído pelo equivalente de Thèvenin. Este circuito representa o valor de tensão e resistência que uma carga (qualquer equipamento) encontra quando conectada aos terminais (a) e (b):

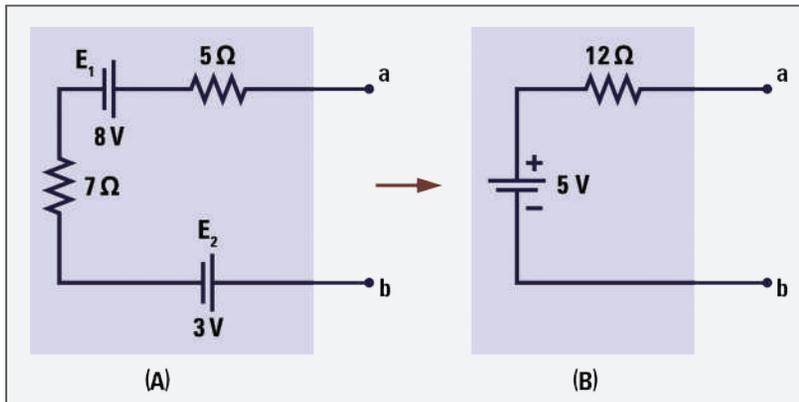


Figura 23 - Circuito original (A) e circuito equivalente de Thèvenin (B)

Esse teorema facilita o cálculo da corrente e tensão fornecida para a carga. Caso esse valor varie, é fácil e rápido calcular o novo valor de tensão ou corrente sobre o novo valor da carga.

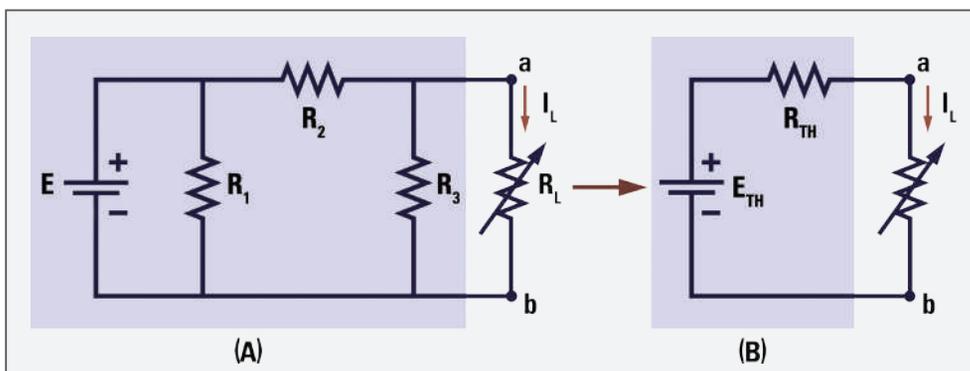


Figura 24 - Circuito original (A) e equivalente de Thèvenin (B)

Os procedimentos necessários para o cálculo do equivalente de Thèvenin são descritos a seguir.

- 1º passo - remover temporariamente o resistor (R_L) do circuito (Figura 24).
- 2º passo - assinalar (a) e (b) entre os terminais do circuito remanescente, ou seja, entre os pontos de (R_L).
- 3º passo - calcular a resistência equivalente de Thèvenin (R_{TH}), substituindo as fontes de tensão por curtos-circuitos, e as fontes de corrente por circuitos abertos. Em seguida, determinar a resistência equivalente entre os dois terminais escolhidos.
- 4º passo - calcular a tensão equivalente de Thèvenin (E_{TH}). Para isso, retornar todas as fontes às suas posições originais no circuito e, em seguida, determinar a tensão entre os terminais (a) e (b).
- 5º passo - desenhar o circuito equivalente de Thèvenin (R_{TH} e E_{TH}) e recolocar a parte previamente removida entre os terminais do circuito equivalente.

Exemplo: determinar o circuito equivalente de Thèvenin para o circuito das Figuras 25, 26, 27, 28, 29 e 30. Em seguida, calcular a corrente em (R_L) considerando que essa resistência tem valores de $2\ \Omega$, $10\ \Omega$ e $100\ \Omega$.

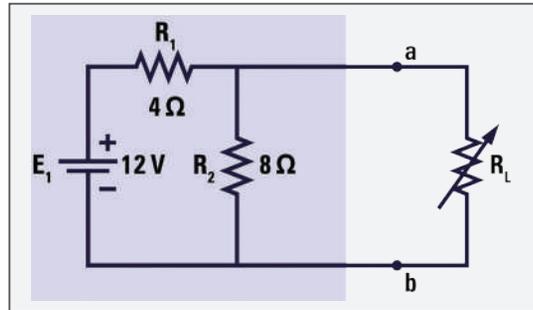


Figura 25 - Exercício de teorema de Thèvenin

Resolução:

- 1° passo - remover (R_L) do circuito.

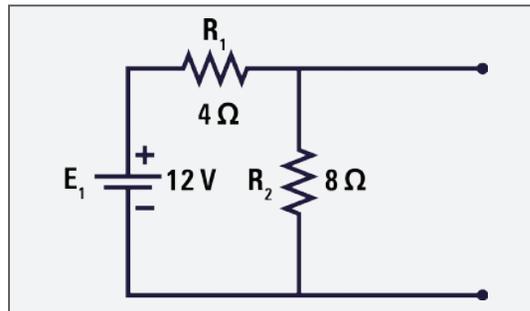


Figura 26 - Exercício de teorema de Thèvenin

- 2° passo - anotar (a) e (b) entre os terminais remanescentes do circuito.

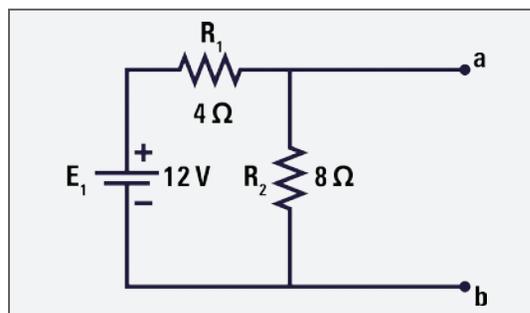


Figura 27 - Exercício de teorema de Thèvenin

- 3º passo - substituir a fonte de tensão (E_1) por um curto-circuito e calcular (R_{TH}). Nesse caso, (R_{TH}) é o valor de (R_1) e (R_2) em paralelo.

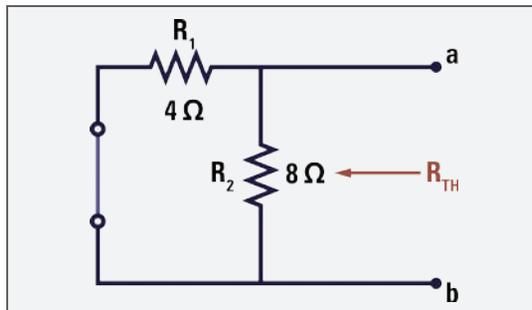


Figura 28 - Exercício de teorema de Thèvenin

- 4º passo - retornar a fonte de tensão e calcular a tensão entre os terminais (a) e (b). Como (R_2) está em paralelo com os terminais (a) e (b), a tensão a ser calculada é a queda de tensão em (R_2). Aplicando a regra dos divisores de tensão, tem-se:

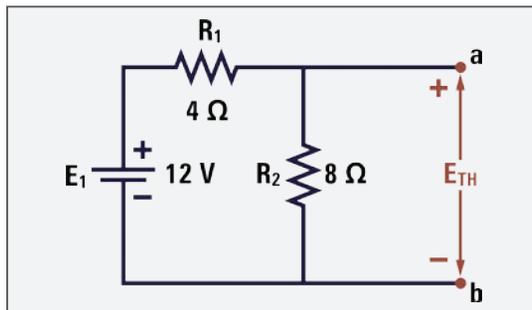


Figura 29 - Exercício de teorema de Thèvenin

$$E_{TH} = E_{R_2} = \frac{R_2 E_1}{R_2 + R_1} = \frac{8 \times 12}{8 + 4} = \frac{96 \text{ V}}{12} = 8 \text{ V}$$

- 5º passo - com o equivalente de Thèvenin, retornar (R_L) e calcular a corrente que passa por ele aplicando a regra dos divisores de corrente. Calcular o valor da corrente para (R_L) igual a 2 Ω , 10 Ω e 100 Ω , respectivamente.

$$I_L = \frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_L}$$

$$R_L = 2 \Omega \quad \rightarrow \quad I_L = \frac{6}{2 + 2} \quad \rightarrow \quad I_L = 1,5 \text{ A}$$

$$R_L = 10 \Omega \quad \rightarrow \quad I_L = \frac{6}{2 + 10} \quad \rightarrow \quad I_L = 0,5 \text{ A (500 mA)}$$

$$R_L = 100 \Omega \quad \rightarrow \quad I_L = \frac{6}{2 + 100} \quad \rightarrow \quad I_L = 0,059 \text{ A (59 mA)}$$

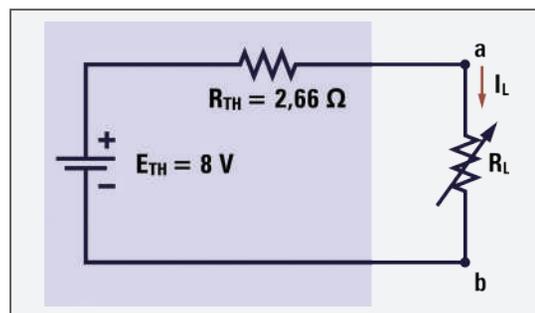


Figura 30 - Exercício de teorema de Thèvenin

1.2.4 Teorema de Norton

Enquanto o teorema de Thèvenin é simplificado em termos de tensão (uma fonte de tensão e um resistor em série), o teorema de Norton (Figura 31) simplifica o circuito em termos de corrente. Isso significa que o circuito equivalente de Norton possui fonte de corrente em paralelo com o resistor.

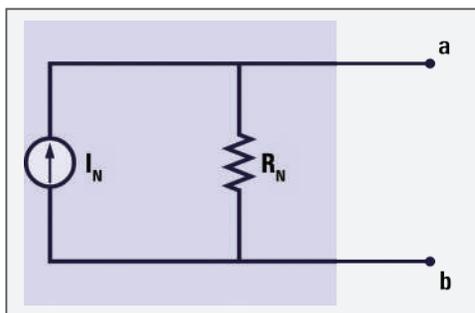


Figura 31 - Equivalente do teorema de Norton

Para calcular o circuito equivalente de Norton, é necessário seguir alguns passos (Figura 32).

- 1° passo - remover temporariamente o resistor (R_L) do circuito.
- 2° passo - assinalar (a) e (b) entre os terminais do circuito remanescente, ou seja, entre os pontos de (R_L).
- 3° passo - calcular a resistência equivalente de Norton (R_N) substituindo as fontes de tensão por curtos-circuitos, e as fontes de corrente por circuitos abertos. Em seguida, determinar a resistência equivalente entre os dois terminais escolhidos.
- 4° passo - calcular a corrente equivalente de Norton (I_N). Para isso, retornar todas as fontes às suas posições originais no circuito e, em seguida, determinar a corrente entre os terminais (a) e (b) colocando um curto-circuito entre esses pontos. Essa corrente é a mesma que seria medida por um amperímetro conectado entre os terminais assinalados.
- 5° passo - desenhar o circuito equivalente de Norton (R_N) e (I_N) e recolocar, entre os terminais do circuito equivalente, a parte previamente removida.

Exemplo: determinar o circuito equivalente de Norton para o circuito a seguir.

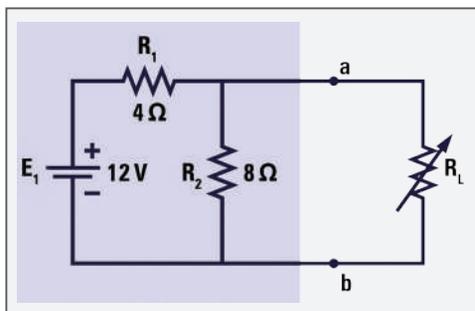


Figura 32 - Exercício de teorema de Norton

São apresentados os cinco passos para fixar o conteúdo (Figuras 33, 34, 35, 36, 37).

- 1º passo - remover a parte do circuito o qual se deseja obter o equivalente de Norton. Neste caso, é o resistor (R_L).

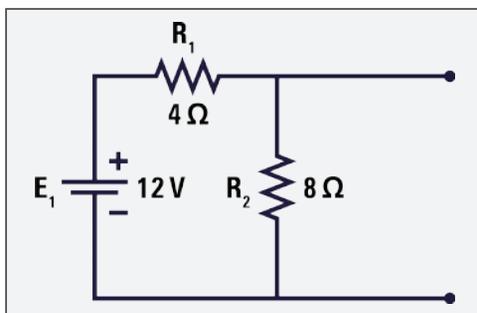


Figura 33 - Exercício de teorema de Norton

- 2º passo - assinalar os terminais do circuito remanescente (a) e (b).

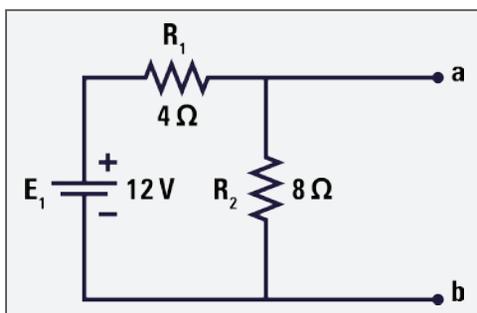


Figura 34 - Exercício de teorema de Norton

- 3º passo - substituir a fonte de tensão (E_1) por um curto-circuito e calcular (R_{TH}). Neste caso, (R_{TH}) é o valor de (R_1) e (R_2) em paralelo.

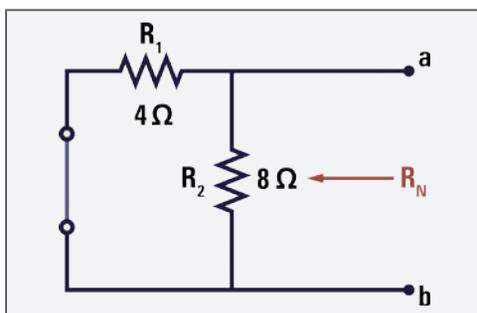


Figura 35 - Exercício de teorema de Norton

$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2 = \frac{4 \times 8}{4 + 8} = 2,66 \Omega$$

- 4º passo - retornar a fonte de tensão, curto-circuitar os terminais (a) e (b) e calcular a corrente que passa no curto-circuito, entre os pontos (a) e (b). Neste caso, o curto-circuito não deixa a corrente passar por (R_2) e a corrente que passa pelos pontos (a) e (b) é igual à corrente total do circuito.

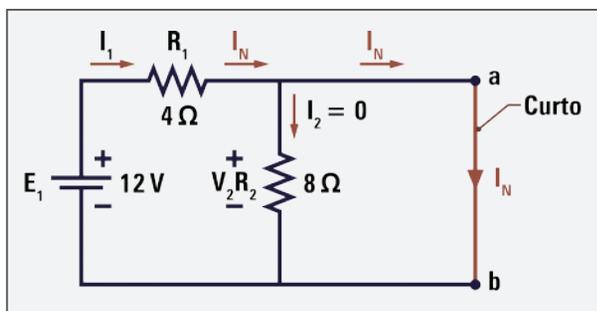


Figura 36 - Exercício de teorema de Norton

$$I_N = \frac{E}{R_1} = \frac{12}{4} = 3 \text{ A}$$

- 5º passo - com o equivalente de Norton, retornar (R_L) ao circuito.

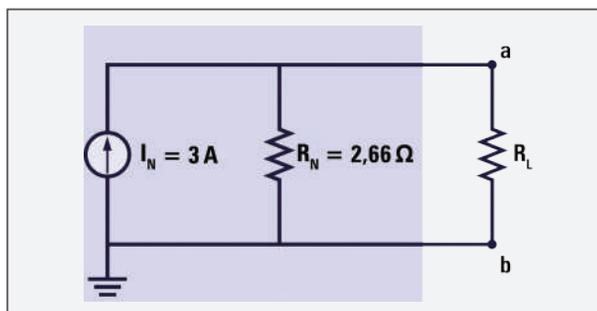


Figura 37 - Equivalente de Norton

Com o equivalente de Norton, é possível calcular o valor da tensão e a corrente na carga. Com esse método, é fácil e rápido fazer o cálculo desses parâmetros para possíveis alterações no valor da carga.

Os teoremas de Thèvenin e Norton são utilizados para simplificação de circuitos, a fim de facilitar o cálculo de corrente, tensão e potência que o circuito fornece à carga. A diferença é que o teorema de Thèvenin é usado em função da tensão e o de Norton, da corrente.

O circuito equivalente de Norton é também obtido a partir do circuito equivalente de Thèvenin ou vice-versa (Figura 38). As conversões entre fontes de tensão e corrente ocorrem da seguinte maneira:

- toda fonte de tensão em série com resistor é substituível por uma fonte de corrente em paralelo com esse resistor;

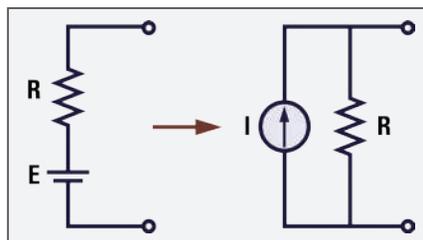


Figura 38 - Equivalência entre fontes

- o resistor (R) é o mesmo nas duas fontes; o da fonte de corrente é calculado aplicando a lei de Ohm entre os valores da fonte de tensão (E_{TH}) com o resistor (R_{TH}). O sentido da fonte de corrente será de acordo com o sentido do polo positivo da fonte de tensão.

$$I = \frac{E}{R}$$

A Figura 39 mostra a conversão do equivalente de Norton para o equivalente de Thèvenin.

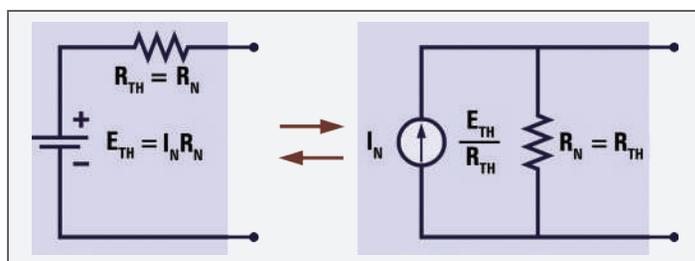


Figura 39 - Equivalência de Norton e Thèvenin

1.2.5 Teorema da máxima transferência de potência

Segundo o teorema da máxima transferência de potência (Figura 40), a potência transferida a uma carga em um circuito de corrente contínua é máxima quando a resistência dessa carga for igual à resistência interna do circuito ligado a esta carga. Assim, tem-se:

$$R_L = R_{\text{interna}}$$

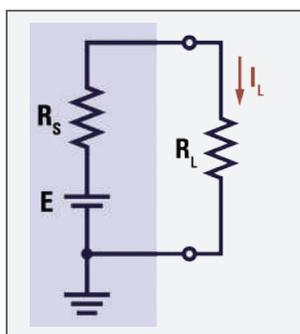


Figura 40 - Teorema da máxima transferência de potência

Exemplo: qual a potência máxima que o circuito da Figura 41 fornece para o resistor de carga?

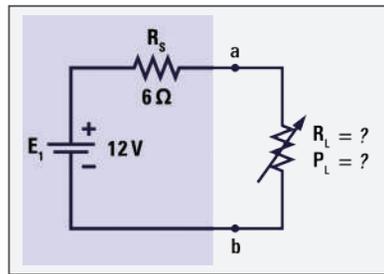


Figura 41 - Exercício

Resolução:

Para existir a máxima potência na carga, o valor do resistor interno deve ser igual ao da carga. Logo:

$$R_L = R_i = 6 \Omega$$

$$I = \frac{V}{R_i + R_L} = \frac{12}{6 + 6} = \frac{12}{12} = 1 \text{ A}$$

$$P = I^2 R_L = 1^2(6) = 6 \text{ W}$$

Exemplo: montar uma tabela para os valores de potência liberada para a carga quando a resistência de carga (R_L) for 1 Ω , 3 Ω , 5 Ω , 7 Ω e 10 Ω .

Tabela 1 - Máxima transferência de potência

R_L (Ohm)	R_{INTERNA} (Ohm)	I_{CARGA} (Amp)	P_{CARGA} (Watt)
1 Ω	6 Ω	1,71 A	2,93
3 Ω	6 Ω	1,33 A	5,32
6 Ω	6 Ω	1,00 A	6,00
7 Ω	6 Ω	0,92 A	5,94
10 Ω	6 Ω	0,75 A	5,62

Fonte: Elaboração dos autores.

Com base na Tabela 1, observa-se que o maior valor de potência na carga ocorre quando $R_L = R_{\text{INTERNA}} = 6 \Omega$ e o valor da potência é de 6 W. Para os valores em que $R_L \neq R_{\text{INTERNA}}$,

1.2.6 Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone é um circuito utilizado para medir o valor de um resistor desconhecido. É constituída de quatro resistores e um galvanômetro, conforme ilustrado na Figura 42.

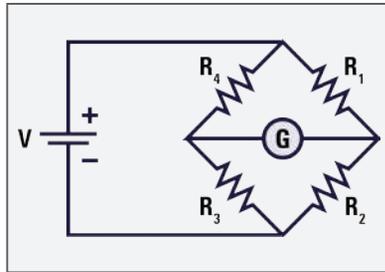


Figura 42 - Ponte de Wheatstone

Diz-se que a ponte está equilibrada quando o galvanômetro indica valor zero, ou seja, quando nenhuma corrente está circulando pelo galvanômetro. Para isso acontecer, é necessário satisfazer a condição a seguir.

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}$$

A ponte é muitas vezes utilizada para descobrir o valor de um resistor desconhecido (Figura 43). Esse resistor é inserido na ponte e, conhecendo o valor dos outros três resistores, basta aplicar a fórmula citada. Esse tipo de circuito é muito utilizado com sensores eletrônicos, em que a variação de algum parâmetro é indicada pela deflexão do ponteiro do galvanômetro.

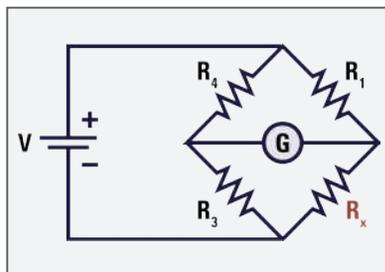


Figura 43 - Ponte de Wheatstone com resistor desconhecido

Neste caso, o resistor (R_x) é desconhecido e utiliza-se a fórmula a seguir para realizar o cálculo.

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_1}{R_x}$$

Resumindo

Neste capítulo, foram abordados os principais elementos de um circuito. As diferentes configurações apresentadas com mais de uma fonte de tensão ou corrente foram analisadas a partir dos teoremas de análise de circuitos. Também se estudou a estrutura do material semicondutor que serve de base para diodos, transistores e circuitos integrados, utilizados nos equipamentos eletrônicos.

Ainda foram vistos os sensores eletrônicos. Eles variam a resistência interna em função de fatores externos, sendo utilizados em inúmeras situações, juntamente com os amplificadores operacionais de sinais extremamente pequenos.

Por fim, foram tratados os instrumentos de medição e as unidades de medida eletrônica presentes constantemente no cotidiano do mantenedor de aeronaves.

Capítulo 2

Teoria dos dispositivos semicondutores

O avanço tecnológico vem ocorrendo desde os primórdios da civilização por meio da renovação de equipamentos que visam a suprir as necessidades do ser humano. Nesse contexto, a busca pela perfeição tem sido constante e as atualizações ocorrem diariamente.

A aparição dos dispositivos semicondutores se deu com o diodo na década de 1940 e teve como objetivo substituir a válvula. As maiores vantagens desses recursos são tamanho reduzido e menor consumo de energia. Com o passar do tempo, novas tecnologias surgiram e o transistor foi o principal responsável pela diminuição dos enormes e volumosos computadores da época.

O transistor foi substituído pelo circuito integrado, e sua incrível capacidade de concentrar milhares de componentes dentro de uma única pastilha de silício (**Si**). O silício é muito empregado na fabricação de componentes eletrônicos e circuitos integrados, sendo um elemento químico tetravalente, ou seja, com quatro elétrons na sua camada de valência. É utilizado por apresentar grande resistência à oxidação e ser um dos elementos mais encontrados na Terra.

Os dispositivos semicondutores estão presentes desde o mais simples circuito eletrônico até o mais complexo equipamento, abrangendo vasto campo de aplicação e importância dentro da eletrônica.

2.1 Diodos semicondutores

Os materiais semicondutores são encontrados em diversos componentes eletrônicos, servindo como elemento estrutural aos equipamentos. Um simples diodo, ou até mesmo o mais avançado processador de computador, emprega esse tipo de material em sua estrutura. Dentre os semicondutores, destacam-se o silício (**Si**) e o germânio (**Ge**), dois semimetais encontrados facilmente na natureza. Assim, toda referência ao material semicondutor será em relação a esses dois materiais.

Os átomos são formados por elétrons, prótons e nêutrons. Cada elemento químico apresenta quantidades diferentes desses elementos em sua composição. Enquanto os prótons e nêutrons



Modelo atômico de Bohr:

utiliza sete órbitas para representar os níveis de energia de cada átomo, sendo que tais órbitas possuem limites quanto ao número de elétrons. Cada elemento químico possui um número determinado de elétrons distribuídos por essas órbitas.

permanecem no núcleo, os elétrons localizam-se em órbitas ou níveis de acordo com o modelo atômico de Bohr. Existem sete órbitas conhecidas, (K), (L), (M), (N), (O), (P) e (Q), por onde os elétrons são distribuídos (Figura 44).

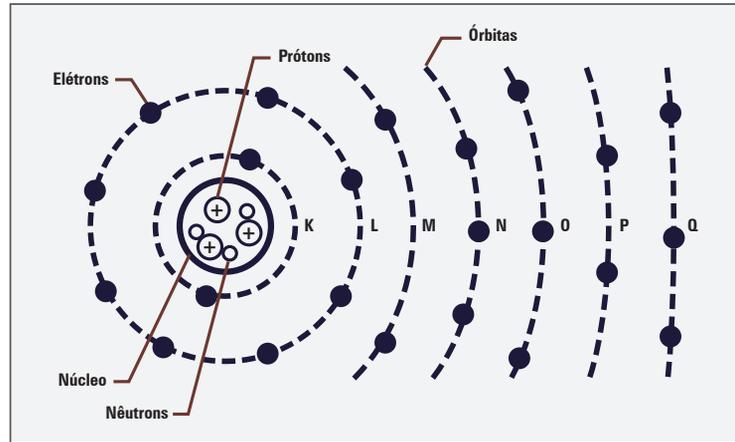


Figura 44 - Modelo atômico de Bohr

As órbitas mais próximas do núcleo apresentam menor energia que as mais afastadas. Um elétron da órbita (P) tem menos energia que o da órbita (Q), da mesma forma que o elétron da órbita (O) tem menos energia que o da (P), e assim por diante. Contudo, nem todos os elementos químicos possuem elétrons em todas as órbitas. Isso depende do número de elétrons que o elemento apresenta em sua estrutura e do número limite que cada órbita suporta, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Bandas de energia

Banda de energia	K	L	M	N	O	P	Q
Número máximo de elétrons	2	8	18	32	32	18	2

Fonte: Elaboração dos autores.

A última órbita de um átomo recebe o nome de órbita ou banda de valência e nela estão os elétrons que se libertam mais facilmente do átomo por meio de uma força externa ou de uma ligação covalente (ligação dos elétrons da última camada entre vários átomos), conforme mostram as Figuras 45.A e 45.B.

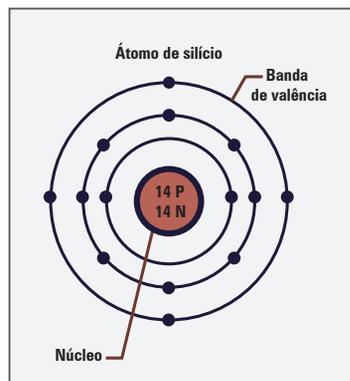


Figura 45.A - Banda de valência

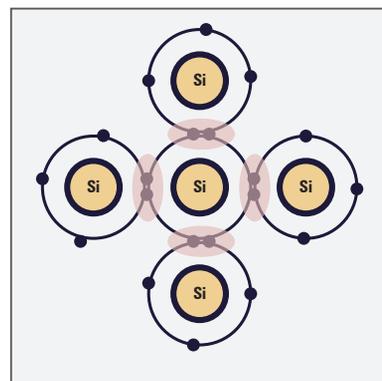


Figura 45.B - Ligação covalente

A facilidade desses elétrons em se libertar do átomo ocorre em razão de possuírem maior energia e estarem mais afastados do núcleo. Dessa forma, uma pequena energia é suficiente para libertá-los e torná-los elétrons livres. O movimento dos elétrons em um campo elétrico resulta no que se chama de corrente elétrica (Figura 46).

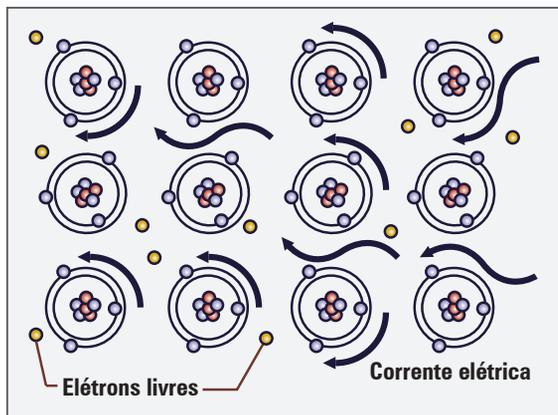


Figura 46 - Corrente elétrica

2.1.1 Características

Os materiais semicondutores estão entre os limites dos materiais condutores e isolantes. Enquanto os condutores e isolantes apresentam alta e baixa condutividades respectivamente, os semicondutores atuam na média entre esses dois elementos. As Figuras 47.A, B e C apresentam as características do material de acordo com a distância entre a banda de condução e a de valência, as quais são separadas pela banda proibida. A banda de valência representa a última camada do átomo, que contém os elétrons de valência. A banda de condução é o local em que o elétron deixou a banda de valência e se tornou um elétron livre. E, por último, a banda proibida representa a quantidade de energia suficiente para que o elétron da banda de valência se torne um elétron livre, ou seja, passe da banda de valência para a de condução. Assim, quanto maior for a banda proibida, mais energia é necessária para que o elétron se torne livre e conduza corrente elétrica pelo material.



Figura 47.A - Material isolante



Figura 47.B - Material semicondutor

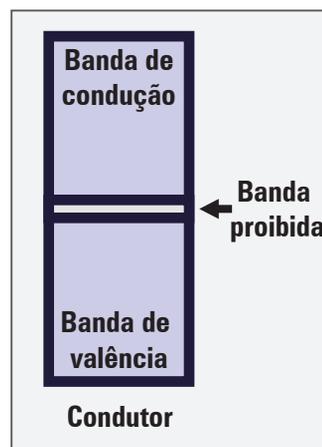


Figura 47.C - Material condutor

Existem diversos elementos semicondutores, porém os mais comuns e utilizados são o silício (**Si**) e o germânio (**Ge**). Eles se caracterizam por serem tetravalentes, apresentando quatro elétrons na camada de valência (Figuras 48.A e 48.B).

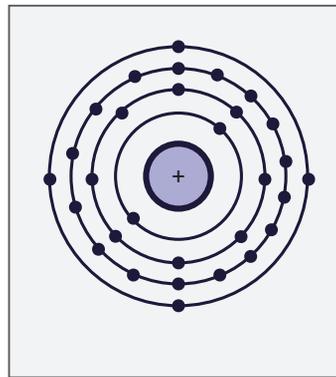


Figura 48.A - Átomo de germânio

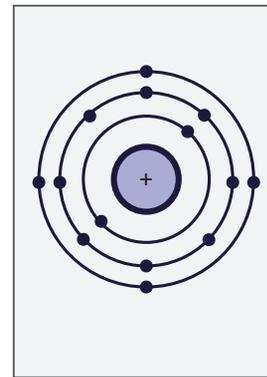


Figura 48.B - Átomo de silício

Em seu estado natural, o silício e o germânio são considerados semicondutores intrínsecos ou puros. A esses materiais são adicionados átomos de impurezas com o objetivo de mudar suas características, alterando, assim, as propriedades elétricas do material. Qualquer elemento que não é tetravalente, isto é, que não possui quatro elétrons em sua camada de valência, é considerado uma impureza e, ao ser adicionado ao silício ou ao germânio em seu estado natural, transforma o material intrínseco (puro) em extrínseco. Esse processo de adição de impurezas ao material puro recebe o nome de dopagem.

Dependendo da impureza acrescentada ao semicondutor, ele se torna tipo (**P**) ou (**N**). Se a impureza for átomos de material pentavalente (cinco elétrons na camada de valência), quando misturados ao semicondutor (quatro elétrons na camada de valência), resultam em excesso de elétrons, pois um destes da camada de valência de cada átomo não participará das ligações, ficando ele livre.

As impurezas pentavalentes são consideradas átomos doadores e recebem o nome de impurezas tipo (**N**), ocasionando um número de elétrons livres maior que o número de cargas positivas (**lacunas**) no material extrínseco. Ademais, é possível sustentar que, nesse processo de dopagem, os elétrons são os portadores majoritários, e as lacunas, os minoritários. Como os elétrons livres são cargas elétricas negativas, esse semicondutor é chamado tipo (**N**), como mostrado na Figura 49. São exemplos de materiais pentavalentes: arsênio (**As**), antimônio (**Sb**) e fósforo (**P**).



Lacunas: é o resultado da ligação covalente, na qual o elétron se torna livre. É uma forma de representar a ausência do elétron.

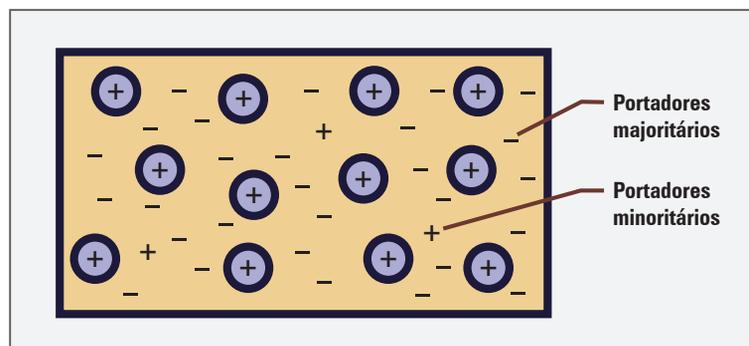


Figura 49 - Material tipo (**N**)

Por outro lado, se forem acrescentados átomos de um material trivalente (com três elétrons na camada de valência) ao semiconductor, acarretará a ausência de elétrons ou o excesso de lacunas. As impurezas trivalentes são consideradas átomos aceitadores e recebem o nome de impurezas tipo (P), apresentados na Figura 50, fazendo com que o material extrínseco tenha um número de lacunas maior que o de elétrons livres. Nessa dopagem, as lacunas são os portadores majoritários, e os elétrons livres, os portadores minoritários. Como as lacunas são consideradas cargas elétricas positivas, esse semiconductor é chamado tipo (P). São exemplos de materiais trivalentes: alumínio (Al), boro (B) e gálio (Ga).

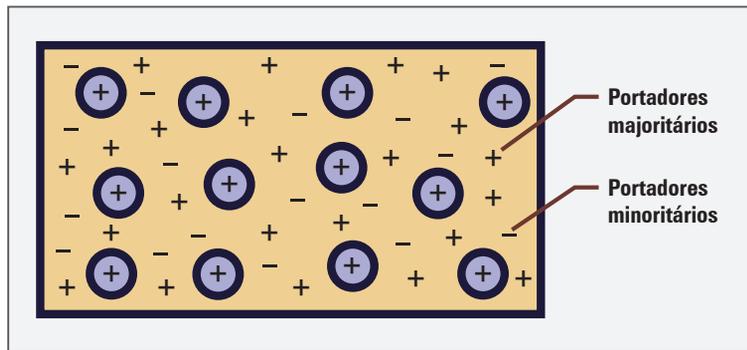


Figura 50 - Material tipo (P)

2.1.1.1 Formação da junção PN

O diodo semiconductor é formado pela junção dos materiais tipo (P) e (N). A base desse componente é o germânio (Ge) ou o silício (Si), acrescentados das respectivas impurezas. Ao realizar essa ligação, os elétrons e as lacunas em excesso de cada material tendem a se preencher. As lacunas do tipo (P) se completam com os elétrons do tipo (N), visando a um equilíbrio em ambos os lados. O fenômeno da ocupação de uma lacuna por um elétron é chamado de recombinação (Figura 51).

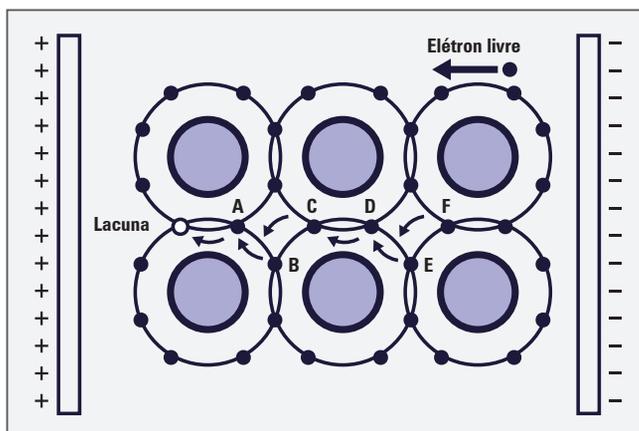


Figura 51 - Recombinação

A partir do momento em que ocorre a recombinação, o resultado é a ausência de portadores livres na região próxima à junção que recebe o nome de camada de depleção (Figura 52) ou barreira de potencial.

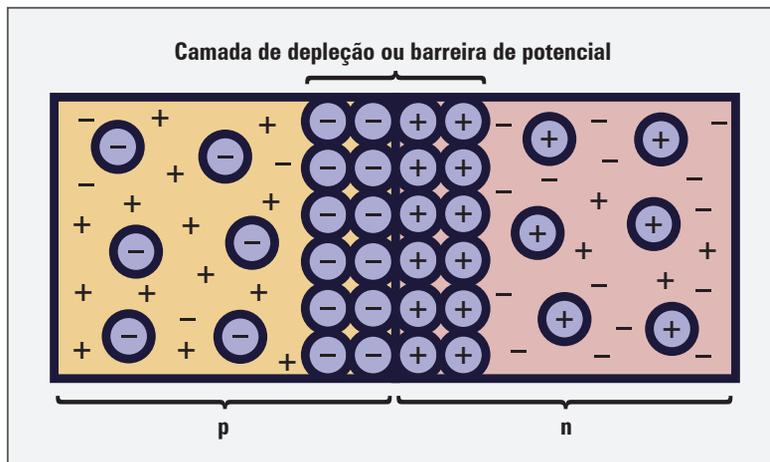


Figura 52 - Camada de depleção

Após encerrada a recombinação, a passagem dos elétrons só é possível com o auxílio de força externa. O apoio externo é necessário para possibilitar a passagem do elétron pela barreira de potencial criada. Essa diferença de potencial a 25 °C é de, aproximadamente, 0,7 V, para os diodos de silício, e de 0,3 V, para os de germânio. A partir desse momento, só existe fluxo de elétrons se aplicada uma tensão, por intermédio de seus terminais, que seja superior ao valor da barreira de potencial.

O diodo semiconductor caracteriza-se pela junção dos materiais (P) e (N). O material (P) se chama anodo (A) e o (N) se chama catodo (K). A corrente que flui por ele tem dois referenciais (Figura 53):

- sentido real ou eletrônico - a corrente se refere ao movimento do elétron, ou seja, do potencial negativo para o positivo;
- sentido convencional - a corrente se refere ao movimento da lacuna, isto é, do potencial positivo para o negativo.

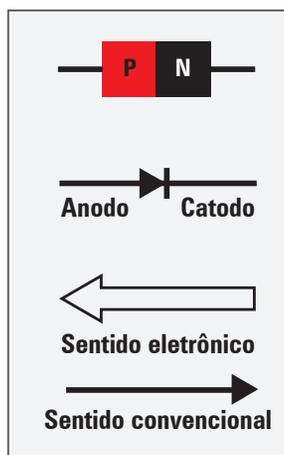


Figura 53.A - Símbolo do diodo semiconductor e sentido da corrente elétrica



Figura 53.B - Aspecto físico do diodo

2.1.1.2 Polarização da junção (PN)

Ao ser aplicada uma fonte externa ao diodo, ele é polarizado de forma direta ou reversa. Para cada forma como é polarizado, a camada de depleção sofre alterações específicas, mudando o comportamento do componente no circuito.

A polarização direta ocorre quando o potencial positivo da fonte é aplicado ao material do tipo (P), e o potencial negativo ao material do tipo (N), conforme a Figura 54. Quando essa condição é satisfeita, os elétrons livres do material tipo (N) são repelidos pelo terminal negativo da fonte e conseguem romper a barreira de potencial, sendo atraídos pelo potencial positivo após atravessarem tal barreira. Esse movimento dos elétrons recebe o nome de corrente elétrica. Nesta situação, o diodo se comporta como um condutor e sua resistência interna é muito pequena. Se o diodo for de silício ou de germânio, o valor da tensão a ser aplicado para polarizá-lo diretamente será de 0,7 V e 0,3 V, respectivamente.

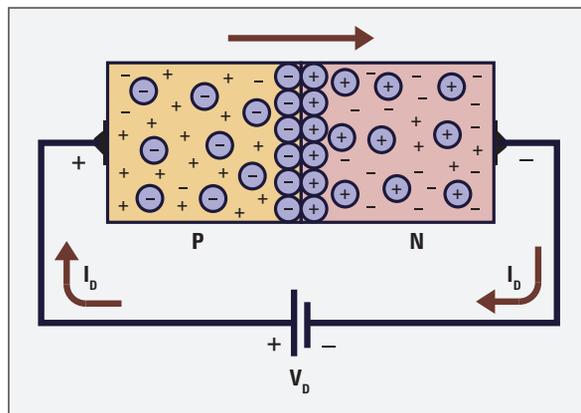


Figura 54 - Polarização direta

O fato de a resistência ser pequena na polarização direta é porque a barreira de potencial diminui de tamanho nessa condição. Dessa forma, o diodo polarizado diretamente é comparado a uma chave fechada, em que a resistência é quase nula e a corrente flui sem barreiras.

A outra polarização a ser estudada é a reversa. Ela ocorre quando o potencial positivo da fonte é aplicado ao material do tipo (N) e o potencial negativo ao material do tipo (P), conforme a Figura 55. Na polarização reversa, os elétrons do material (N) são atraídos pelo potencial positivo e as lacunas do material (P) são atraídas pelo potencial negativo da fonte, aumentando a barreira de potencial. Assim, quanto maior a polarização reversa, maior a barreira de potencial, e os portadores majoritários de cada material, lacunas no lado (P) e elétrons no lado (N) não circulam pelo circuito. O diodo se comporta como um isolante e sua resistência interna é muito alta, sendo comparada a uma chave aberta.

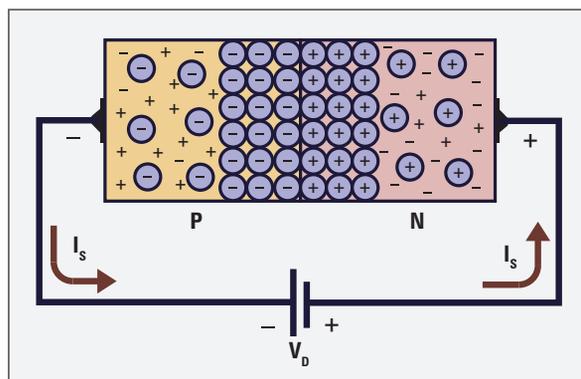


Figura 55 - Polarização reversa

Apesar de a resistência ser muito alta, na polarização reversa circula uma corrente muito pequena formada pelos portadores minoritários, elétrons no material (P) e lacunas no (N), criados continuamente pela energia térmica à temperatura ambiente. Ela recebe o nome de corrente reversa (I_R) e está limitada aos portadores minoritários. Por esse motivo, seu valor é considerado desprezível na maioria dos casos.

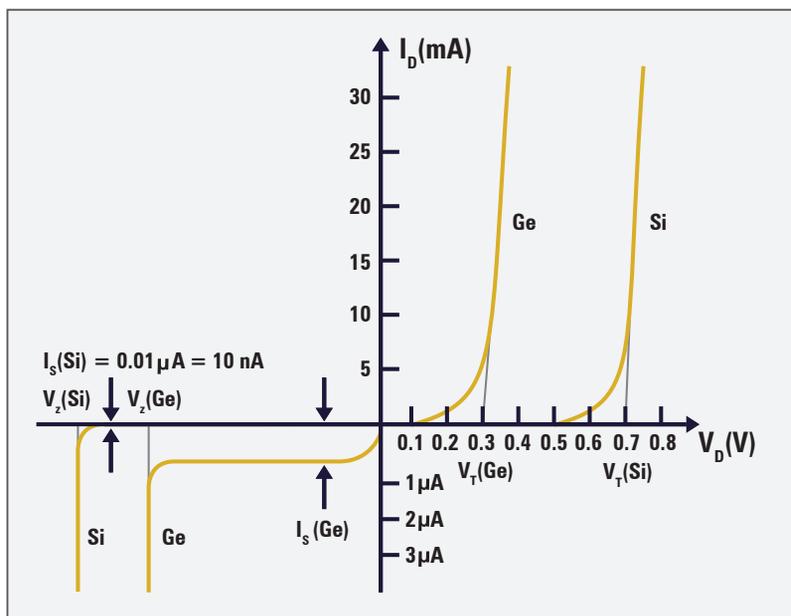
2.1.1.3 Curva característica do diodo



Válvula diodo: é uma simples válvula eletrônica que contém dois eletrodos. Era utilizada como elemento retificador e foi substituída pelos diodos semicondutores.

A principal função do diodo é substituir a **válvula diodo** com o consumo de energia e tamanho consideravelmente menores. Seu funcionamento é compreendido pela curva característica, observando o comportamento da corrente em função da tensão aplicada, conforme o Gráfico 1.

GRÁFICO 1 - Curva característica do diodo



A curva característica mostra que a corrente é praticamente nula para tensões negativas, ou seja, na polarização reversa. O valor dessa polarização aplicada ao diodo é limitado por uma tensão de ruptura ou zener (V_Z). Qualquer tensão superior resulta em dano ao componente.

Para tensões positivas (polarização direta), a corrente é baixa até atingir a barreira de potencial (V_V). A partir desse valor, a resistência interna diminui drasticamente e a corrente flui pelo diodo, tendo seu valor limitado pelo fabricante.

O fabricante provê informações sobre o componente por intermédio de uma folha de dados (*data sheet*), que pode ser simplificada ou mais detalhada. Tais informações são incluídas para a correta aplicação dos diodos nos circuitos eletrônicos, fornecendo alguns parâmetros importantes como: tensão direta (V_F), corrente direta máxima (I_F), corrente de saturação reversa (I_R), tensão reversa nominal (**PIV**, **PRV** ou V_Z), valor máximo de dissipação de potência, faixa de temperatura de operação e faixa de frequência.

2.1.2 Aplicações do diodo

O diodo é encontrado nos mais diversos circuitos eletrônicos, exercendo importante papel no campo da eletrônica. São abordados alguns dos mais comuns circuitos com diodo.

2.1.2.1 Fontes de força

Uma das principais aplicações do diodo é nos circuitos retificadores de tensão utilizados em fontes de força. A fonte tem o objetivo de transformar o sinal alternado, fornecido pela concessionária de energia, em um sinal contínuo puro. Para isso, quatro etapas são executadas: transformação, retificação, filtragem e regulação (Figura 56).

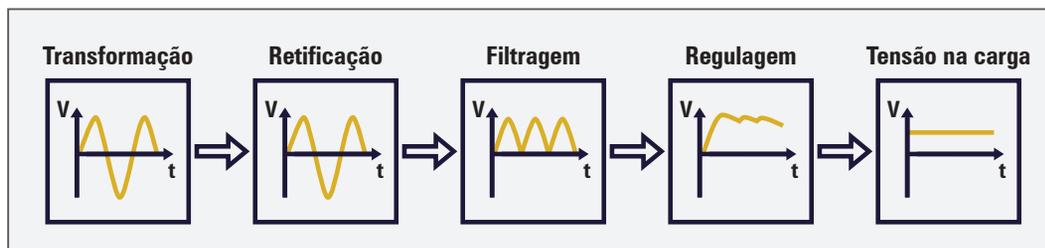


Figura 56 - Diagrama em blocos de uma fonte de tensão

a) 1ª etapa - transformação

A primeira etapa de uma fonte de força é o processo de transformação. A tensão da rede, fornecida pela concessionária de energia, muitas vezes apresenta valor diferente do desejado para as aplicações nos aparelhos eletrônicos, sendo necessário diminuir ou aumentar este valor de tensão. Dentre os diversos tipos de transformadores, os mais utilizados nos circuitos retificadores são o transformador abaixador de tensão e o transformador com derivação central no secundário. Para saber qual valor é fornecido no secundário, utilizam-se estas equações:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \text{ e } \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Em que:

(V_1) = tensão do primário;

(V_2) = tensão do secundário;

(I_1) = corrente no primário;

(I_2) = corrente no secundário;

(N_1) = número de espiras do primário;

(N_2) = número de espiras do secundário.

O transformador com derivação central no secundário funciona de forma diferente, como se tivesse dois secundários e cada um defasado de 180° entre si. Assim, a tensão total do secundário é dividida em duas partes, conforme a Figura 57.

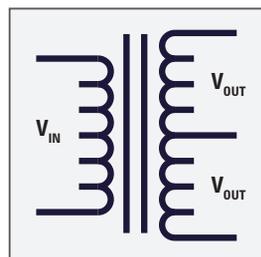


Figura 57 - Transformador com derivação central no secundário

b) 2ª etapa - retificação

A retificação é a segunda etapa de uma fonte de força e tem como função transformar o sinal alternado em contínuo pulsante. Existem três tipos de circuitos retificadores: meia onda, onda completa e onda completa tipo ponte. Antes de iniciar os estudos dos retificadores, é importante informar que o termo resistor de carga, ou somente carga, é mencionado várias vezes no livro e representa o valor da resistência equivalente de um determinado aparelho (televisão, DVD, videogame, ar condicionado, aparelho de som, etc.) para o circuito.

- Retificador de meia onda

O retificador de meia onda (Figura 58) é o mais simples em sua constituição. É formado por apenas um diodo em série com um resistor que representa a **carga do circuito**.



Carga do circuito:

representa a impedância equivalente que o equipamento apresenta para o circuito. Ela pode ser puramente resistiva ou reativa.

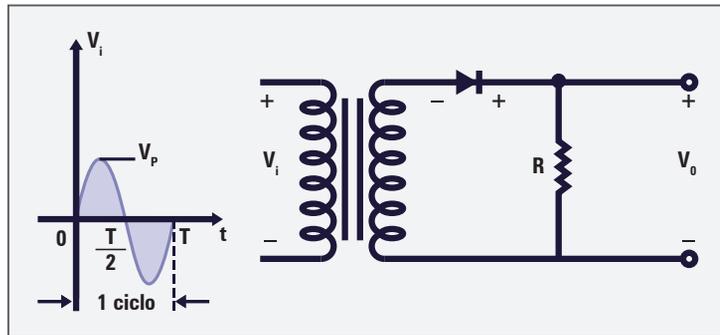


Figura 58 - Retificador de meia onda

A análise do retificador de meia onda é realizada observando os semiciclos, positivo e negativo, do sinal alternado de entrada, separadamente. Além disso, o diodo é considerado ideal, não apresentando nenhuma queda de tensão quando polarizado diretamente, sendo 0,7 V para os diodos de (Si) e 0,3 V para os diodos de (Ge). Desse modo, o diodo funciona como uma chave fechada (curto-circuito), na polarização direta, e como uma chave aberta (circuito aberto), na polarização reversa.

Durante o semiciclo positivo do sinal de entrada, o diodo está polarizado diretamente (Figura 59) e funciona como uma chave fechada (curto-circuito), fazendo com que a tensão da fonte seja aplicada à carga (R_L). Como a alimentação é variável, é comum dizer que a variação da tensão de entrada é refletida sobre a carga (tensão de saída) durante todo o semiciclo positivo, ou seja, a tensão de saída (VR_L) acompanha as variações da entrada.

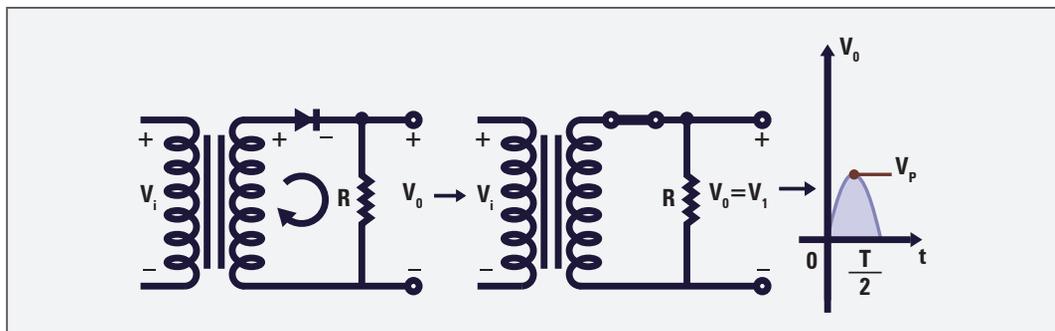


Figura 59 - Semiciclo positivo com o diodo polarizado diretamente

Analisando o semiciclo negativo do sinal de entrada, o diodo está polarizado reversamente (Figura 60) e funciona como uma chave aberta (circuito aberto), não fluindo corrente pelo circuito. Durante todo esse período, não existe queda de tensão na carga e a tensão da fonte é aplicada sobre o diodo. Portanto, no período em que o diodo está polarizado reversamente, a queda de tensão na carga é nula e toda variação do sinal de entrada reflete no diodo.

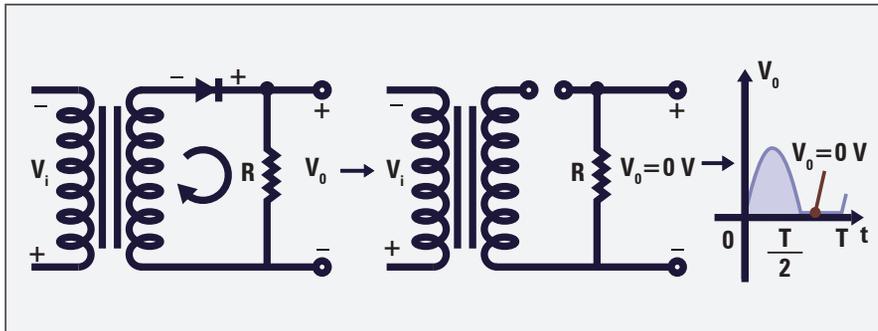
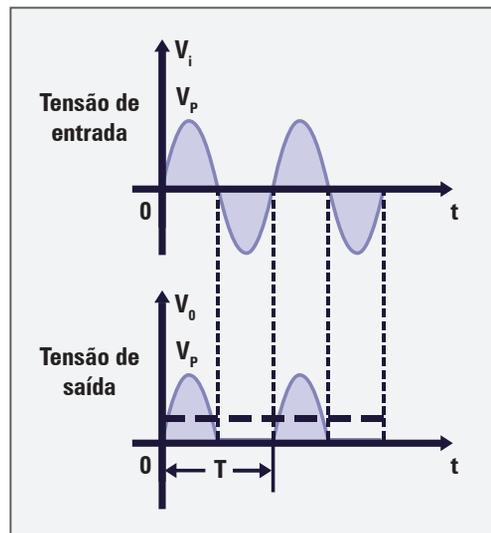


Figura 60 - Semiciclo negativo com o diodo polarizado reversamente

O Gráfico 2 exemplifica as variações da tensão na carga e no diodo em relação ao sinal de entrada. Após a tensão ser retificada, passa a ser considerada uma tensão DC, porém com um alto nível de variação. Por essa razão, ela recebe o nome de DC pulsante.

GRÁFICO 2 - Tensão de entrada e saída em um retificador de meia onda



- Cálculo da tensão média

Apesar de a tensão de saída ser DC pulsante, é comum calcular a **tensão média** (Gráfico 3) na carga quando se trabalha com circuitos retificadores. Para visualizar a forma de onda retificada, é necessária a utilização de um osciloscópio. Como em muitas ocasiões não há um osciloscópio disponível, aplica-se uma fórmula para o cálculo da tensão média, pois



Tensão média: valor de tensão definido de maneira que a área sob a curva acima e abaixo desse valor são iguais.

esse valor será o mesmo que o medido por um multímetro. Este, por sua vez, não fornece a forma de onda do sinal, apenas fornece determinado valor obtido pela seguinte fórmula:

$$V_m = V_p \times 0,318 \quad \text{ou} \quad V_m = V_{rms} \times 0,45$$

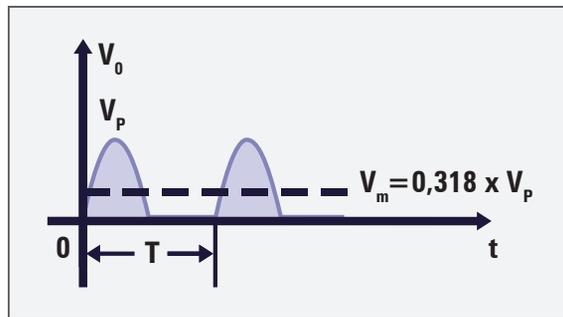
Em que:

(V_m) = tensão média na carga;

(V_p) = tensão de pico do secundário;

(V_{rms}) = tensão eficaz no secundário.

GRÁFICO 3 - Tensão média



Os valores de *tensão eficaz* ou de pico, mencionados nas fórmulas supracitadas, são aqueles retirados no secundário do transformador, levando-se em consideração a relação de espiras entre o primário e o secundário.

Para o cálculo da corrente média na carga, aplica-se a lei de Ohm:

$$I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

Em que:

(I_m) = corrente média na carga;

(V_m) = tensão média na carga;

(R_L) = resistência de carga.

- Tensão de pico reversa (PIV)

A tensão de pico reversa (PIV ou PRV) é a queda de tensão no diodo quando ele está polarizado reversamente. Todo diodo tem um valor máximo de PIV estipulado pelo fabricante, devendo ser esse limite respeitado para não haver danos.



Tensão eficaz: valor de tensão equivalente a uma tensão contínua que desenvolve a mesma potência.

No retificador de meia onda, quando o diodo está polarizado reversamente, não flui corrente pelo circuito e, conseqüentemente, não há tensão na carga. Dessa forma, toda tensão do secundário do transformador está aplicada ao diodo.

$$PIV = V_{\text{secundário}}$$

Para a aplicação correta do diodo em um circuito, é necessário calcular a tensão de pico reversa e verificar, na folha de dados do fabricante, se ele suporta essa tensão. Ele funciona normalmente somente se o valor da tensão não for superior ao previsto na folha de dados do componente.

- Frequência de saída

Nos circuitos retificadores, nem sempre a frequência de saída é igual à frequência do sinal de entrada, tendo de ser levado em consideração o valor máximo da frequência com que o diodo consegue funcionar adequadamente, o qual é estipulado pelo fabricante. No retificador de meia onda, a frequência do sinal de saída é a mesma que a do sinal de entrada. Assim:

$$\text{Frequência de saída} = \text{Frequência de entrada}$$

De posse da folha de dados do diodo e calculando-se os valores de tensão e corrente média, frequência e tensão reversa, é possível conferir se tais valores estão dentro da faixa de trabalho do diodo para determinada aplicação, não correndo o risco de danificar o componente ou parte do equipamento onde está sendo utilizado.

- Retificador de onda completa

O retificador de onda completa é muito empregado nos circuitos eletrônicos por fornecer um valor de tensão na saída mais constante, mesmo não sendo uma tensão contínua pura. É composto de dois diodos e um transformador com derivação central (Figura 61). Nesse tipo de transformador, a tensão do secundário é dividida em duas partes iguais: metade permanece na parte superior e a outra metade na inferior.

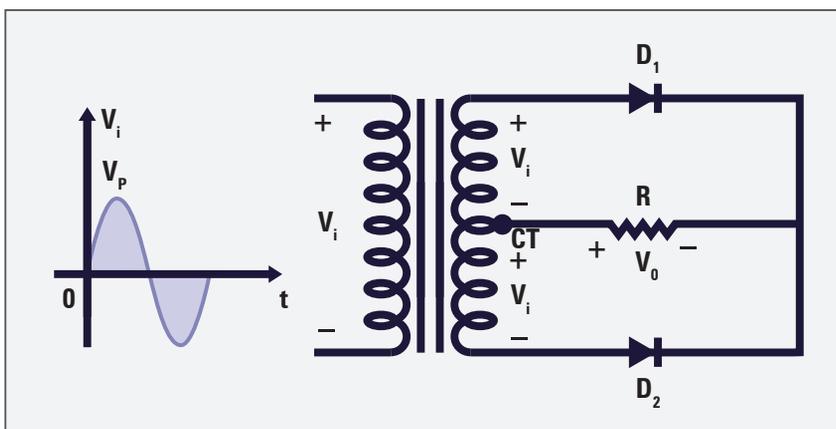


Figura 61 - Retificador de onda completa com derivação central

Durante o semiciclo positivo do sinal de entrada (Figura 62), o diodo (D_1) está polarizado diretamente e funciona como uma chave fechada (curto-circuito), e o diodo (D_2) está polarizado reversamente e funciona como uma chave aberta (circuito aberto). A corrente flui por (D_1) e faz com que metade da tensão do secundário (parte superior) recaia sobre a carga (R_L).

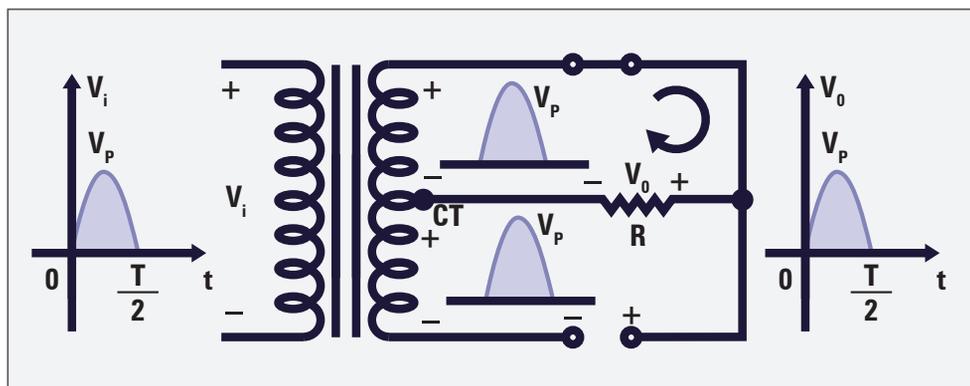


Figura 62 - Semiciclo positivo do sinal de entrada

Durante o semiciclo negativo do sinal de entrada (Figura 63), o diodo (D_2) está polarizado diretamente e funciona como uma chave fechada (curto-circuito), e o diodo (D_1) está polarizado reversamente, funcionando como uma chave aberta (circuito aberto). A corrente agora flui por (D_2) e faz com que a outra metade da tensão do secundário (parte inferior) recaia sobre a carga (R_L). Em ambos semiciclos, a polaridade da tensão na carga não se altera e o nível de variação é menor quando comparado ao retificador de meia onda.

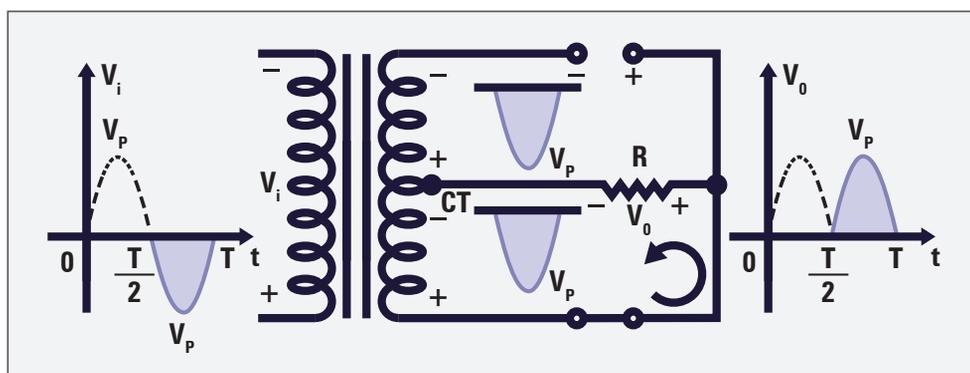


Figura 63 - Semiciclo negativo do sinal de entrada

No transformador com derivação central, a tensão fornecida à carga é metade do valor total do secundário.

- Cálculo da tensão média

O cálculo do valor da tensão média (V_m) na carga (Gráfico 4) é feito pela seguinte fórmula:

$$V_m = V_p \times 0,636 \quad \text{ou} \quad V_m = V_{rms} \times 0,9$$

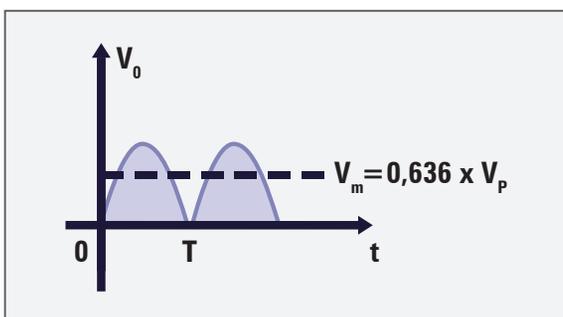
Em que:

(V_m) = tensão média na carga;

(V_p) = tensão de pico do secundário;

(V_{rms}) = tensão eficaz no secundário.

GRÁFICO 4 - Tensão média



Para o cálculo da corrente média na carga basta aplicar a lei de Ohm.

$$I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

Em que:

(I_m) = corrente média na carga;

(V_m) = tensão média na carga;

(R_L) = resistência de carga.

- Tensão de pico reversa (PIV)

A tensão de pico reversa (PIV) no retificador de onda completa é igual à tensão da carga mais metade da tensão do secundário. Somando as tensões da carga e metade do secundário, o resultado é a tensão total do secundário aplicada ao diodo que não está conduzindo corrente.

$$PIV = V_{TOTAL DO SECUNDÁRIO}$$

- Frequência de saída

No retificador de onda completa, a frequência do sinal de saída é o dobro da frequência do sinal de entrada. Assim:

$$\text{Frequência de saída} = 2 \times \text{Frequência de entrada}$$

Como a frequência é o inverso do período, no retificador de onda completa, o período do sinal de saída é metade do período do sinal de entrada.

- Retificador de onda completa tipo ponte

O retificador de onda completa tipo ponte (Figura 64) é o mais utilizado dentre eles. É formado por quatro diodos ligados em ponte e o transformador utilizado não apresenta a derivação central.

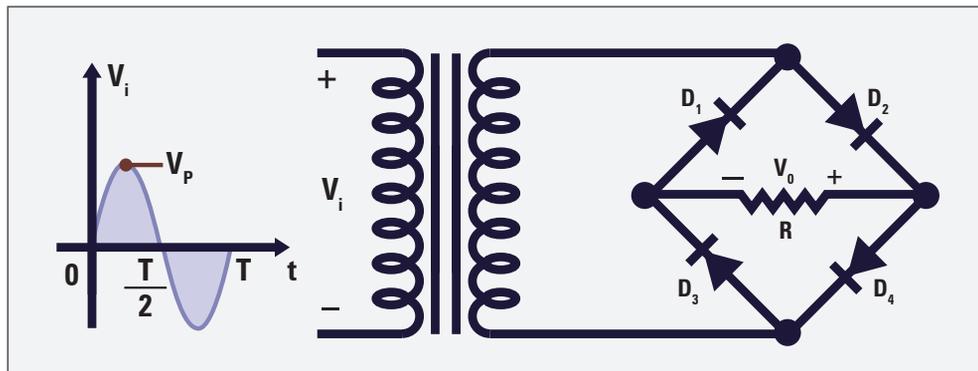


Figura 64 - Retificador de onda completa tipo ponte

Durante o semiciclo positivo, os diodos (D_2) e (D_4) estão polarizados diretamente e funcionam como chaves fechadas. Nesse semiciclo, os diodos (D_1) e (D_3) não conduzem corrente por estarem polarizados reversamente, funcionando como chaves abertas. A carga (R_L) recebe a tensão total do secundário, em razão de o transformador não ter a derivação central. Nesse caso, a tensão de saída acompanha as variações da tensão de entrada em amplitude (Figura 65).

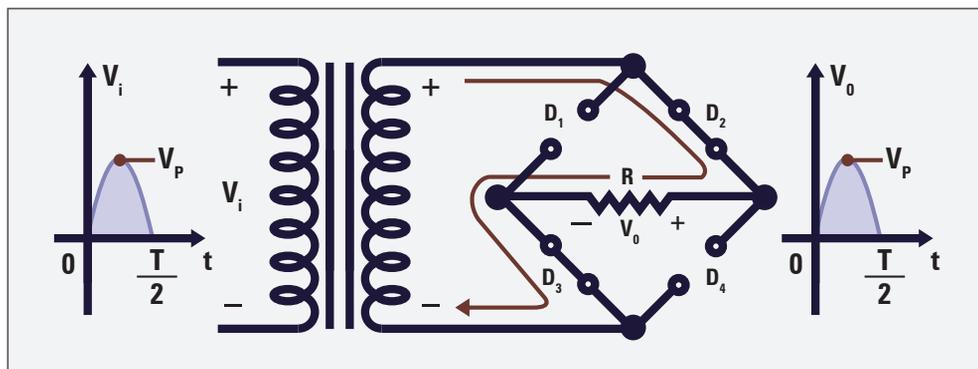


Figura 65 - Semiciclo positivo do sinal de entrada

Durante o semiciclo negativo, os diodos (D_1) e (D_3) estão polarizados diretamente e conduzem corrente, funcionando como chaves fechadas. Os diodos (D_2) e (D_4) estão polarizados reversamente e funcionam como chaves abertas. Novamente, a carga (R_L) recebe a tensão total do secundário. A tensão de saída acompanha as variações da tensão de entrada em amplitude, porém com a mesma polaridade do sinal no semiciclo positivo, conforme a Figura 66.

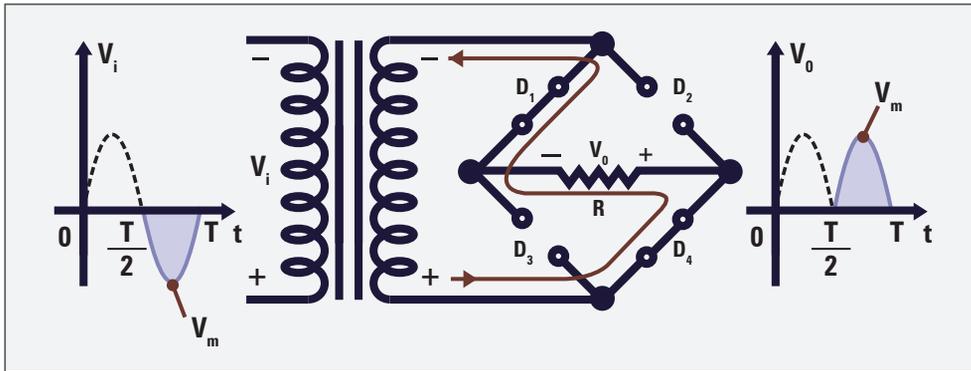


Figura 66 - Semiciclo negativo do sinal de entrada

- Cálculo da tensão média

O cálculo do valor da tensão média (V_m) na carga (Gráfico 5) é feito por meio da seguinte fórmula:

$$V_m = V_p \times 0,636 \quad \text{ou} \quad V_m = V_{rms} \times 0,9$$

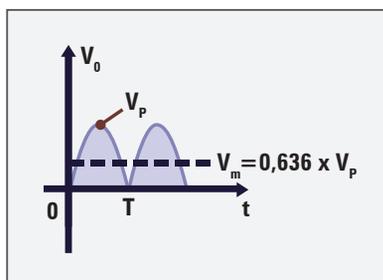
Em que:

(V_m) = tensão média na carga;

(V_p) = tensão de pico do secundário;

(V_{rms}) = tensão eficaz no secundário.

GRÁFICO 5 - Tensão média



Apesar de a fórmula ser a mesma para o retificador de onda completa tipo ponte e o com derivação central, o valor da tensão média no tipo ponte é o dobro da tensão no retificador com derivação central. Isso ocorre porque a tensão do secundário não é di-

vidida em duas partes, conforme acontece nos transformadores com derivação central. Para o cálculo da corrente média na carga basta aplicar a lei de Ohm.

$$I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

Em que:

(I_m) = corrente média na carga;

(V_m) = tensão média na carga;

(R_L) = resistência de carga.

- Tensão de pico reversa - PIV

A tensão de pico inversa (PIV) dos diodos que estão polarizados reversamente em um retificador tipo ponte é sempre a tensão total do secundário.

$$PIV = V_{\text{secundário}}$$

- Frequência de saída

No retificador tipo ponte, a frequência do sinal de saída também é o dobro da frequência do sinal de entrada. Assim:

$$\text{Frequência de saída} = 2 \times \text{Frequência de entrada}$$

Mesmo após os retificadores de onda completa terem transformado a tensão alternada em tensão contínua pulsante, o nível de variação ainda não é o desejado para utilização nos equipamentos eletrônicos. Assim sendo, são usados filtros com a finalidade de obter tensões de saída com níveis baixíssimos de variação e de alcançar o objetivo de transformar a corrente alternada em contínua.

c) 3ª etapa - filtragem

O filtro é empregado com vistas a obter a tensão de saída do retificador o mais constante possível. O filtro a capacitor é o mais comum nas fontes de alimentação (Figura 67). Ele é conectado após o retificador e sempre em paralelo com a carga.

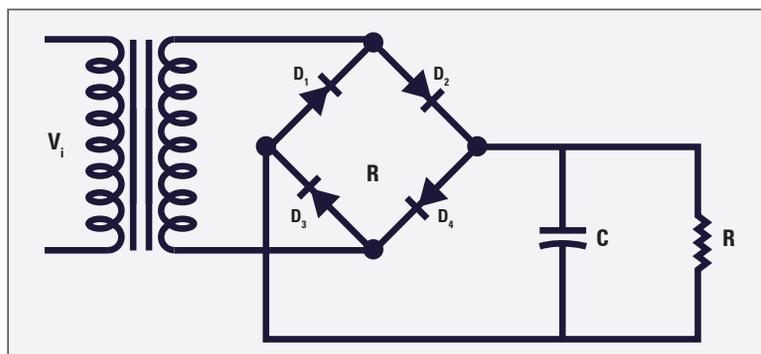
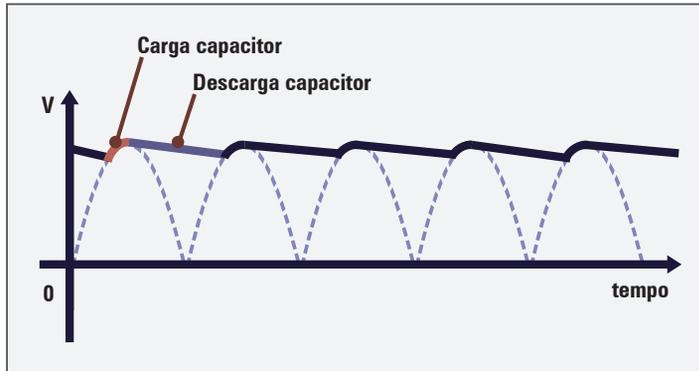


Figura 67 - Fonte de alimentação com filtro capacitivo

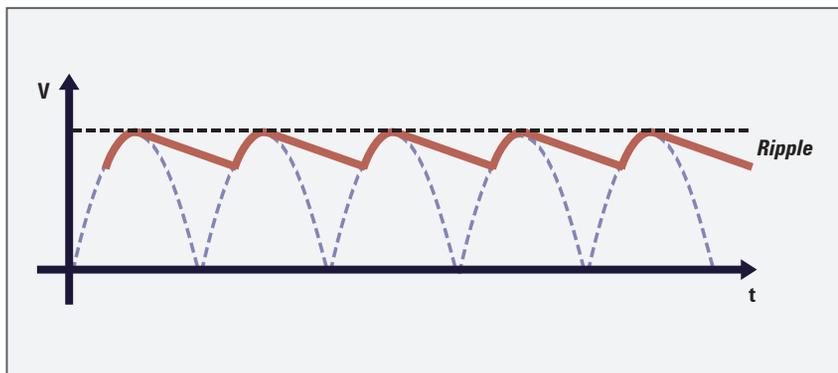
Após o sinal ter sido retificado, o capacitor se carrega até a tensão atingir o valor de pico por meio dos diodos (D_1) e (D_3) (polarizados diretamente). A partir do momento em que a tensão retificada começa a diminuir, a tensão no capacitor é maior do que a tensão fornecida pelo retificador e polariza os diodos (D_1) e (D_3) inversamente. O capacitor começa a se descarregar lentamente pela carga (R_L). Esse processo é lento porque a carga apresenta alto valor de resistência (Gráfico 6).

GRÁFICO 6 - Forma de onda de saída do circuito com filtro



O processo de descarga é interrompido somente quando o valor da tensão retificada é maior do que a tensão no capacitor. Os diodos (D_2) e (D_4), que estavam polarizados reversamente, passam a conduzir e recarregar o capacitor até o valor de pico. Após, o capacitor inicia novamente seu ciclo de descarga e assim sucessivamente. Após a filtragem, a tensão fornecida à carga apresenta um nível de variação muito baixo, denominado *ripple* (ondulação), conforme o Gráfico 7.

GRÁFICO 7 - Tensão de *ripple*



Para realizar o cálculo da tensão de *ripple* (rms), utiliza-se esta equação:

$$V_R = \frac{I_{CC}}{4\sqrt{3} fC}$$

Em que:

(V_m) = tensão média na carga após a filtragem;

(f) = frequência da ondulação (depende do tipo de retificador);

(R_l) = resistência de carga;

(C) = capacitor de filtro.

Mesmo sendo pequeno o valor de ondulação, o sinal com o *ripple* fornecido à carga ainda é indesejado para a utilização em aparelhos eletrônicos. Por esse motivo, usa-se o processo de regulação para eliminar o *ripple* e fornecer um sinal contínuo puro à carga. Essa é a última etapa de uma fonte de alimentação. O circuito regulador de tensão mais simples é o diodo zener.

d) 4ª etapa - regulação

A quarta etapa de uma fonte de força é o processo de regulação. O regulador de tensão mais comum é composto pelo diodo zener (Figura 68) conectado em paralelo com a carga. O zener é um dispositivo semiconductor que apresenta maior quantidade de impurezas na dopagem e maior área de junção quando comparado ao diodo comum.

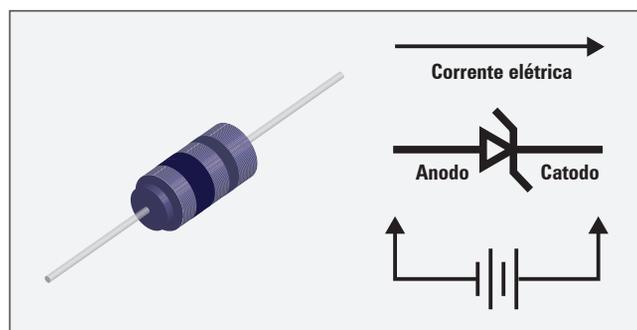
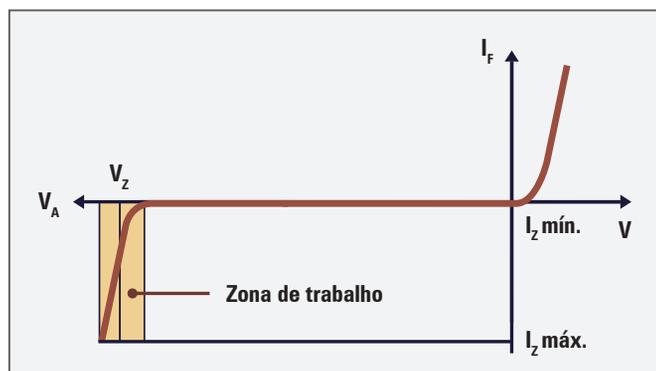


Figura 68 - Símbolo do diodo zener

É necessário que seja polarizado inversamente para funcionar como regulador de tensão. Se polarizado diretamente, funciona como um diodo comum. Aplicando-se potencial inverso, conduz uma pequena corrente de fuga até atingir o potencial de disparo (tensão zener - V_z - Gráfico 8). Quando atingido, a corrente aumenta consideravelmente e a tensão tende a se manter constante e igual a (V_z) .

GRÁFICO 8 - Curva característica do diodo zener



Isso ocorre porque o zener apresenta uma impedância dinâmica (R_z). À medida que a corrente que passa por ele aumenta, sua resistência interna diminui, a fim de manter a tensão constante, conforme se observa na curva característica.

Quando aplicado como regulador de tensão, tem a função de manter constante a tensão de saída, principalmente quando houver variação na tensão de entrada ou na resistência de saída do circuito (Figura 69). Como o zener é aplicado em paralelo com a carga, se a queda de tensão nele for constante, logo essa queda na carga também será.

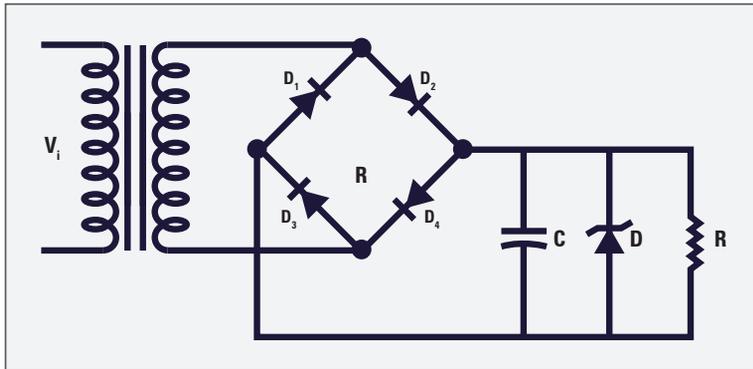


Figura 69 - Circuito regulador de tensão básico

- Proteção de circuitos - fusíveis (Figura 70) e disjuntores são os exemplos mais comuns de dispositivos de proteção contra sobrecargas.

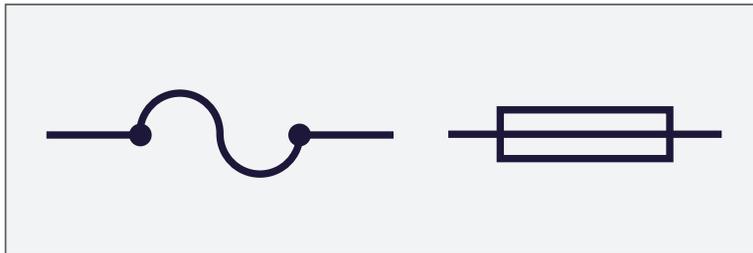


Figura 70 - Simbologia do fusível

Fusíveis são utilizados em circuitos eletrônicos de baixa potência e consistem em um fio de metal ou liga metálica que suporta um determinado valor de corrente. Quando se ultrapassa esse limite de corrente, o fio se rompe e não deixa a sobrecarga atingir o

equipamento (Figura 71). Seu uso é muito importante e previne incêndios e danos ao equipamento. Por outro lado, os disjuntores são utilizados em sistemas elétricos de alta potência, como sistemas residenciais e industriais.

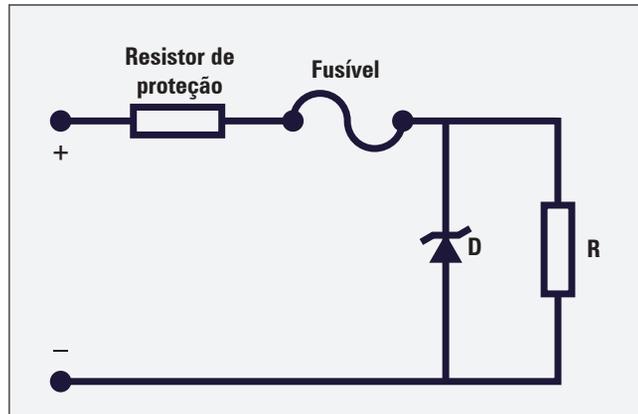


Figura 71 - Aplicação do fusível

2.1.2.2 Ceifador ou limitador de tensão

Ceifadores ou limitadores são circuitos que têm como função ceifar ou limitar a tensão de saída em um valor específico. Esse limite pode ser imposto a tensões positivas, negativas ou ambas. O ceifador a diodo (Figura 72) mais simples é o retificador de meia onda. Dependendo da orientação do diodo, a parte positiva ou negativa do sinal de entrada é ceifada.

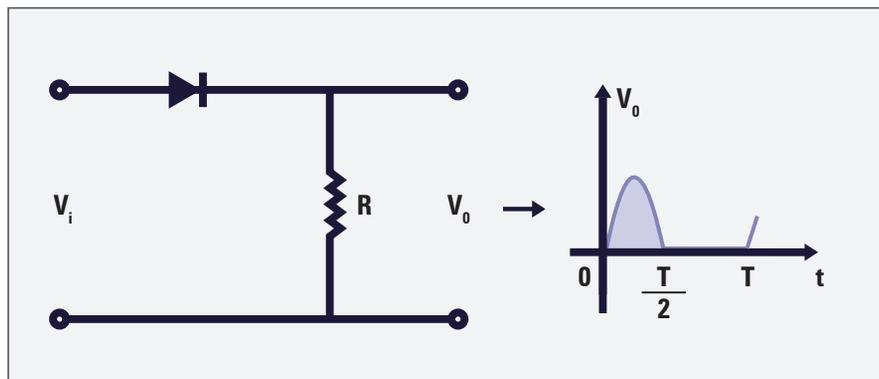


Figura 72 - Ceifador a diodo

Entretanto, em diversos casos não há a necessidade de ceifar todo o semiciclo negativo ou o positivo. Para solucionar esse problema, é empregado um circuito limitador polarizado. A principal diferença nesses circuitos é a presença de uma fonte de tensão contínua em série

com o diodo do circuito. Os circuitos limitadores polarizados são positivos, negativos ou duplos (positivos e negativos), de acordo com as Figuras 73.A, B e C.

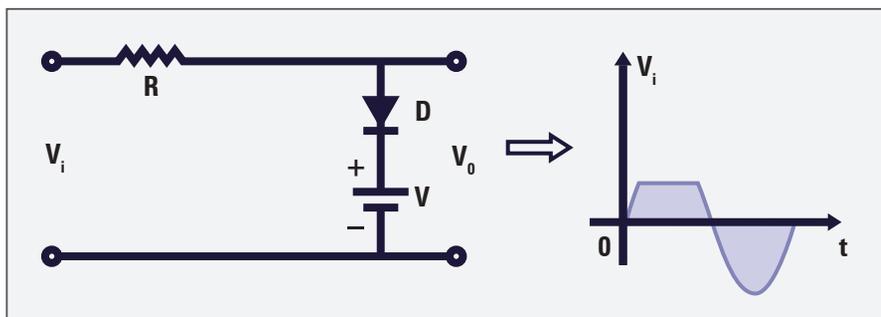


Figura 73.A - Limitador positivo

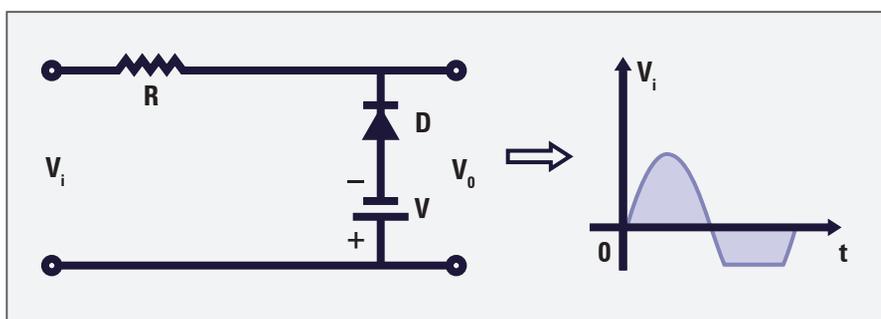


Figura 73.B - Limitador negativo

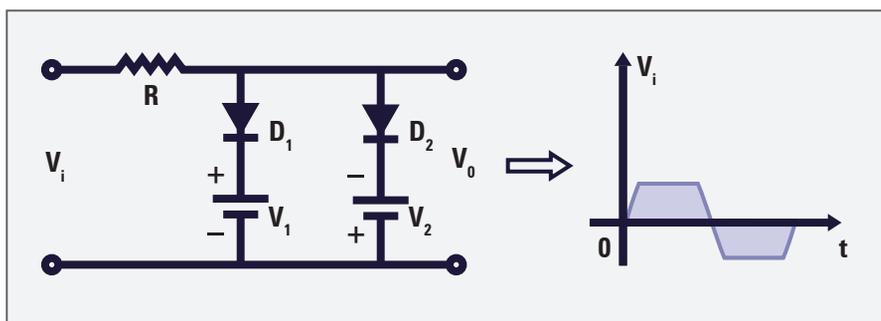


Figura 73.C - Limitador positivo/negativo

2.1.2.3 Grampeador

Os grampeadores (Figura 74) são circuitos que grampeiam o nível DC do sinal em um valor diferente. Eles não alteram a forma de onda do sinal, isto é, nenhuma parte do sinal é cortada, conseqüentemente a tensão de saída é mantida com a mesma amplitude que a da entrada. O circuito é formado por um resistor, um diodo e um capacitor, acrescido de uma fonte (CC).



Nível DC: é o nível de referência de um sinal, podendo ser positivo, negativo ou igual a zero.

É necessário que os valores do resistor e do capacitor sejam altos, para garantir uma constante de tempo elevada e para que o capacitor não se descarregue durante o tempo em que o diodo não estiver conduzindo.

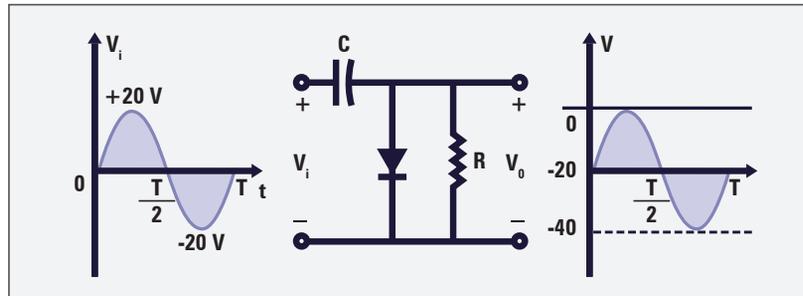


Figura 74 - Grampeador

Durante o semiciclo positivo do sinal de entrada (Figura 75), o diodo está polarizado diretamente e o capacitor se carrega rapidamente com a tensão de 20 V. Durante esse semiciclo, a tensão de saída (tensão no resistor R) é igual a 0 V, pois o resistor está em paralelo com o diodo polarizado diretamente.

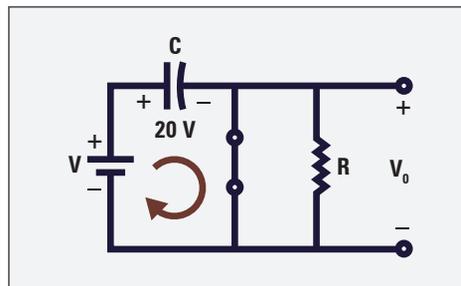


Figura 75 - Semiciclo positivo do sinal de entrada

Durante o semiciclo negativo (Figura 76), o diodo está polarizado reversamente e funciona como uma chave aberta para o circuito. O resistor (R) está em paralelo com o diodo, que, por sua vez, está em paralelo com o capacitor mais a tensão de entrada (V). O sinal de saída é o resultado da soma da tensão no capacitor com a tensão de entrada (V). Como o capacitor praticamente não se descarrega, devido ao alto valor da constante de tempo (RC), a tensão de saída fica grampeada no valor da tensão no capacitor, sendo 20 V nesse caso. Esse grampeador alterou o nível dc de 0 V para -20 V. Basta inverter a posição do diodo para grampear o sinal em um valor positivo.

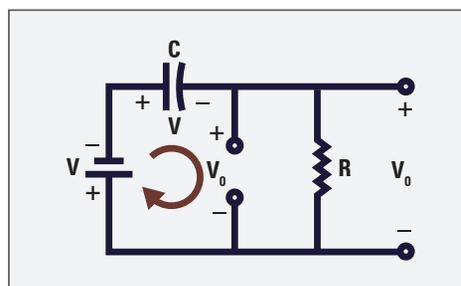


Figura 76 - Semiciclo negativo do sinal de entrada

Da mesma forma que o ceifador, os circuitos grampeadores são acrescidos de fontes (CC), dependendo do tipo de aplicação.

2.1.2.4 Multiplicador de tensão

Os circuitos multiplicadores de tensão fornecem a tensão de saída duas ou mais vezes o valor da tensão de entrada. Eles permitem obter um valor de tensão alto na saída, a partir de um valor baixo do secundário do transformador. O circuito da Figura 77 é um dobrador de tensão de meia onda.

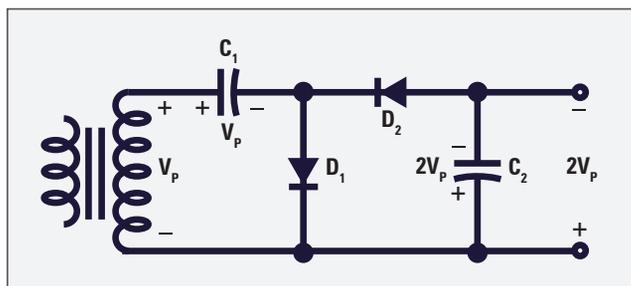


Figura 77 - Dobrador de tensão de meia onda

Durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, o diodo (D_1) conduz e carrega o capacitor (C_1) com tensão de pico (V). Durante o semiciclo negativo, o diodo (D_2) conduz e carrega o capacitor (C_2) com a soma da tensão do secundário e a de (C_1), fornecendo na saída o dobro da tensão fornecida pelo secundário do transformador (Figura 78).



Tensão de pico: valor máximo instantâneo da tensão.

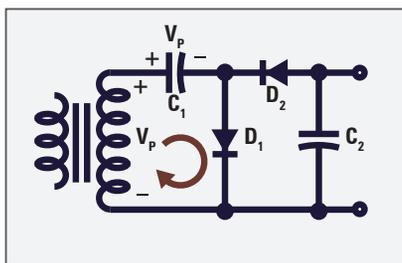


Figura 78.A - Semiciclo positivo

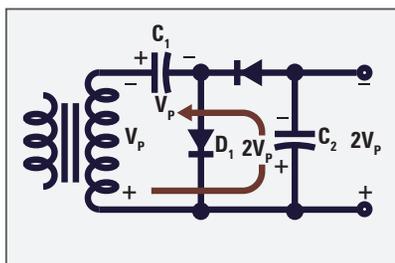


Figura 78.B - Semiciclo negativo

Pode-se obter um triplicador ou quadruplicador de tensão a partir do dobrador de tensão, conforme a Figura 79.

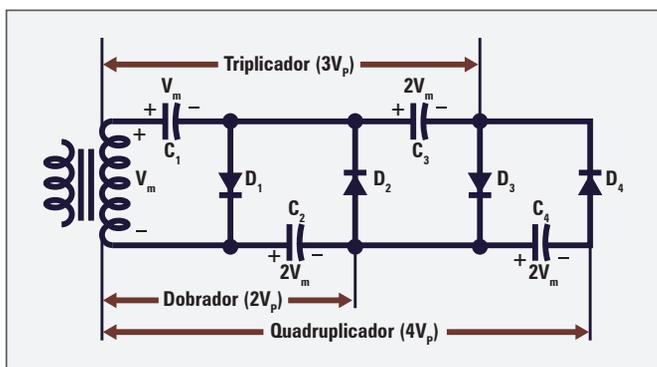


Figura 79 - Dobrador, triplicador e quadruplicador de tensão

2.1.3 Diodo emissor de luz (LED)

O diodo emissor de luz é um componente amplamente utilizado em equipamentos eletrônicos. Sua sigla deriva do inglês *light emitting diode* (LED), e consiste em um diodo semiconductor que, ao ser polarizado diretamente, permite a passagem de corrente e emite luz. A diferença para o diodo comum está no material empregado na fabricação do LED, no qual são mais utilizados o arseneto de gálio e alumínio. A Figura 80 mostra o símbolo do LED.

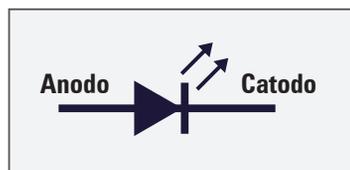


Figura 80 - Símbolo do LED

O LED surgiu com o objetivo de substituir as lâmpadas em determinadas aplicações. Atualmente, é encontrado nos mais diversos equipamentos eletrônicos, em distintas cores, formas e tamanhos. A luz que o LED emite depende do tipo de material e da quantidade usada na fabricação. A Tabela 3 mostra as cores comuns dos LEDs e os respectivos materiais utilizados no processo de fabricação.

Tabela 3 - Características dos LEDs coloridos

Cor	Material semiconductor
Infravermelho	Arsenieto de gálio (GaAs) Alumínio arsenieto de gálio (AlGaAs)
Vermelho	Alumínio arsenieto de gálio (AlGaAs) Fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP) Alumínio gálio fosfeto de índio (AlGaInP) Fosfeto de gálio (GaP)
Laranja	Fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP) Alumínio gálio fosfeto de índio (AlGaInP) Fosfeto de gálio (GaP)
Amarelo	Fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP) Alumínio gálio fosfeto de índio (AlGaInP) Fosfeto de gálio (GaP)
Verde	Nitreto de gálio índio (InGaN)/Nitreto de gálio (GaN), Fosfeto de gálio (GaP) Alumínio gálio fosfeto de índio (AlGaInP) Alumínio fosfeto de gálio (AlGaP)
Azul	Seleneto de zinco (ZnSe) Nitreto de gálio índio (InGaN) Carboneto de silício (SiC) como substrato Silício (Si) como substrato – em desenvolvimento
Violeta	Nitreto de gálio índio (InGaN)
Roxo	LEDs azul e vermelho Fósforos vermelho e azul ou plástico branco com roxo
Ultravioleta	Diamante (235nm) Nitreto de boro (215nm) Nitreto de alumínio (AlN) (210nm) Alumínio nitreto de gálio (AlGaN) Alumínio gálio nitreto de índio (AlGaInN) - (abaixo de 210nm)
Branco	Diodo azul/violeta com fósforo amarelo

A Figura 81 mostra alguns exemplos de LEDs coloridos.

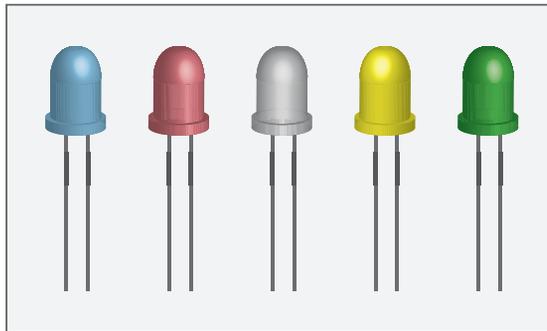


Figura 81 - LEDs coloridos

Se o diodo estiver polarizado inversamente, nenhuma luz é emitida. Porém, se for polarizado diretamente, a cor da luz emitida será de acordo com o material do LED. No circuito da Figura 82, o LED está polarizado diretamente e emite luz. O resistor (R) limita o valor da corrente aplicada a ele, os limites de tensão e corrente de cada LED são estipulados pelo fabricante. Assim, antes de utilizar ou substituir um diodo emissor de luz, é necessário conhecer os valores máximos de tensão e corrente que ele suporta, a fim de não danificar o componente ou equipamento.

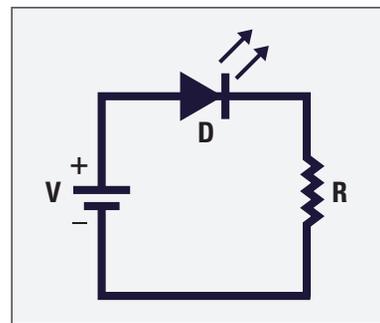


Figura 82 - Aplicação do LED

2.2 Transistor de junção

O transistor bipolar de junção (TBJ) é um componente extremamente importante no campo da eletrônica. Sua aplicação abrange um grande número de equipamentos e sistemas. Uma das principais funções do transistor de junção é amplificar sinais. A amplificação se torna essencial, visto que alguns sinais chegam ao destino com amplitudes muito pequenas, como nos receptores de rádio. Assim, desde o mais simples aparelho de som até os modernos equipamentos de radar, usados na vigilância de fronteiras, possuem circuitos de amplificação a transistores. Portanto, é imprescindível conhecer o princípio de funcionamento, as características e as configurações do transistor.

Criado no final de 1947, o transistor mostrou ao mundo um novo conceito de eletrônica. Dispositivo de estado sólido, formado por três terminais com as seguintes vantagens em relação às válvulas: menor tamanho, mais leve, mais resistente, mais eficiente e menores tensões de alimentação. O TBJ possui três terminais chamados de base, coletor e emissor conforme a Figura 83.

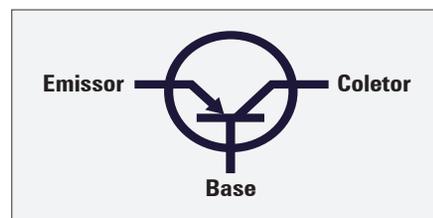


Figura 83 - Símbolo do transistor

O processo de construção do transistor é o mesmo que o do diodo, diferenciando-se apenas por possuir três elementos e duas junções. Os elementos são formados da seguinte maneira: **NPN** ou **PNP**, de acordo com as Figuras 84.A e 84.B.

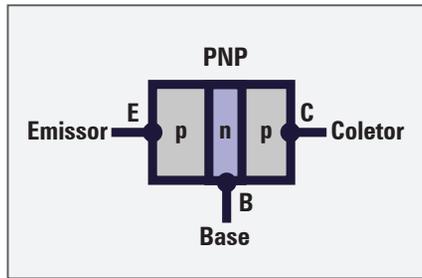


Figura 84.A - Portador nos transistores PNP

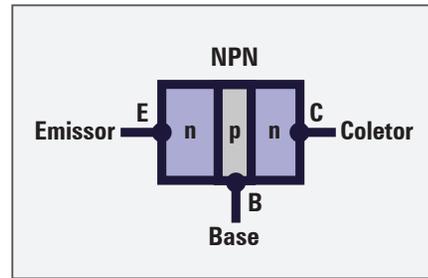


Figura 84.B - Portador no transmissor NPN

A Figura 85 exemplifica alguns tipos de transistor disponíveis no mercado.

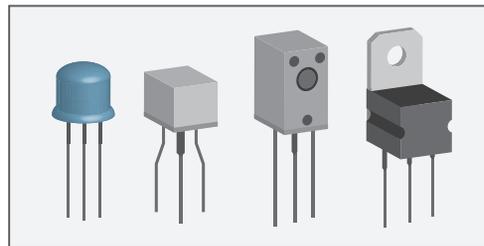


Figura 85 - Tipos de transistores

Cada elemento do transistor recebe uma dopagem diferente. O emissor é fortemente dopado e sua função é emitir portadores de carga para a base. A base tem dopagem média e também é fina. Por esse motivo, os portadores lançados pelo emissor conseguem atravessar a base e alcançam o coletor. O coletor é levemente dopado e tem como função receber os portadores do emissor que atravessam a base. Ele apresenta a maior camada, pois dissipa a maior parte da potência gerada pelos circuitos transistorizados (Figura 86).

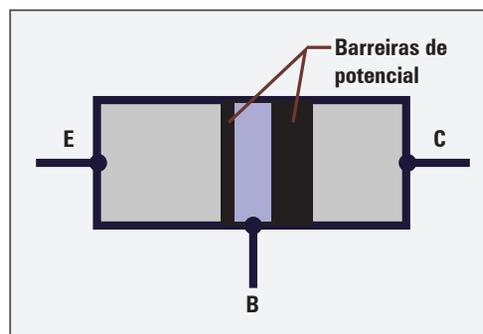


Figura 86 - Barreiras de potenciais nos transistores

O processo de recombinação ocorre nas duas junções do transistor. Quando finalizado, barreiras de potencial são criadas e os elétrons precisam de uma fonte de energia externa para passar por elas. Os valores correspondem a 0,7 V para o silício e 0,3 V para o germânio. O funcionamento

do transistor consiste em controlar a passagem da corrente entre emissor e coletor, através da base. Para isso, é necessário polarizar as duas junções adequadamente. O estudo da polarização dos transistores é realizado separadamente para cada junção. O sentido convencional da corrente é utilizado para análise do circuito e, para o transistor funcionar como amplificador, a primeira condição é que a junção base-emissor seja polarizada diretamente, conforme mostra a Figura 87.

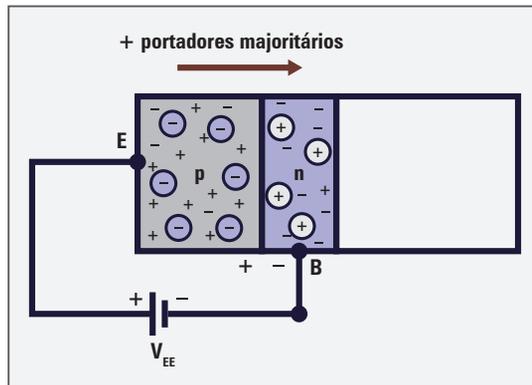


Figura 87 - Polarização direta da junção emissor-base

Nesse caso, o potencial da fonte (V_{BE}) ou (V_{EB}) faz com que os portadores majoritários do emissor sejam repelidos em direção à base, ocasionando circulação de corrente pela base (elétrons livres no transistor NPN e lacunas no PNP). A junção base-emissor funciona como um diodo polarizado diretamente. Existe, também, uma pequena corrente no sentido contrário devido aos portadores minoritários. Ela recebe o nome de *corrente de fuga*.

A segunda condição para o transistor funcionar como amplificador é que a junção base-coletor seja polarizada reversamente conforme a Figura 88.

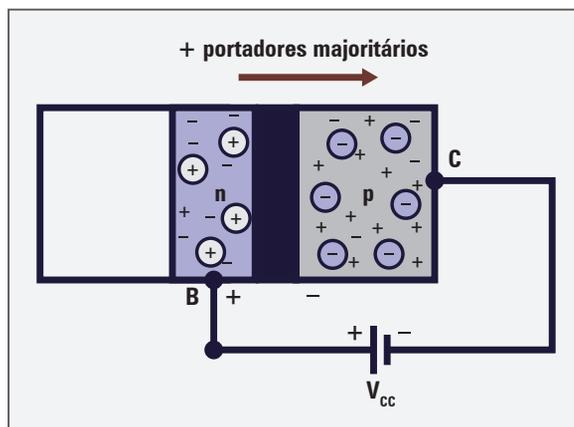


Figura 88 - Polarização reversa da junção base-coletor

Nesse caso, o potencial da fonte (V_{CB}) ou (V_{BC}) atrai os portadores majoritários do coletor, fazendo com que o elétron ou a lacuna que foi repelido no emissor chegue ao coletor e exista o fluxo de corrente pelo transistor. Somente quando as duas condições forem satisfeitas que ocorrerá o fluxo de corrente.



Corrente de fuga: corrente inversa de pequena proporção existente entre junções semicondutoras do tipo PN. O valor dessa corrente aumenta com a elevação da temperatura das junções.

Na Figura 89, observa-se que o fluxo de portadores majoritários se dirige, quase que totalmente, do emissor para o coletor. Isso ocorre em virtude da base ser mais estreita que o emissor e o coletor, e menos dopada que o emissor.

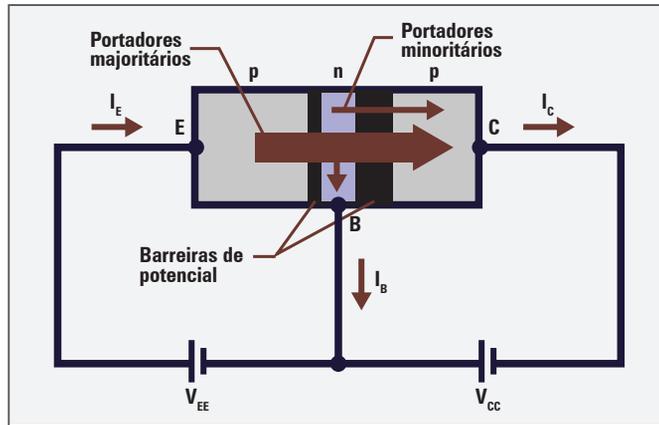


Figura 89 - Polarização completa do transistor

As tensões e correntes nos transistores NPN e PNP são mostradas nas Figuras 90.A e 90.B.

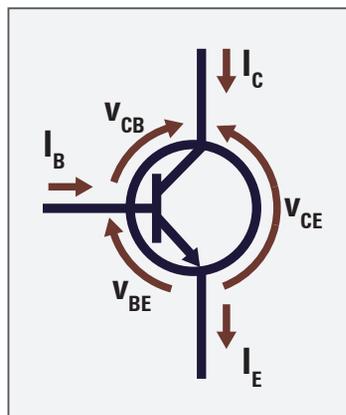


Figura 90.A - Transistor NPN

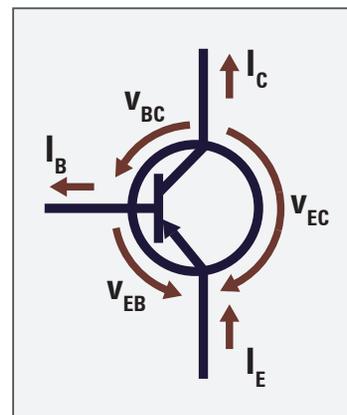


Figura 90.B - Transistor PNP

Para efeito de cálculo, duas equações são usadas a partir das leis de Kirchoff para tensão e corrente. Elas independem do tipo de transistor, seja ele NPN ou PNP.

$$I_E = I_C + I_B \quad V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$$

Em que:

(I_E) = corrente de emissor;

(I_C) = corrente de coletor;

(I_B) = corrente de base;

(V_{CE}) = tensão entre coletor e emissor;

(V_{BE}) = tensão entre base e emissor;

(V_{CB}) = tensão entre coletor e base.

A Figura 91 mostra a relação das tensões e correntes de um transistor.

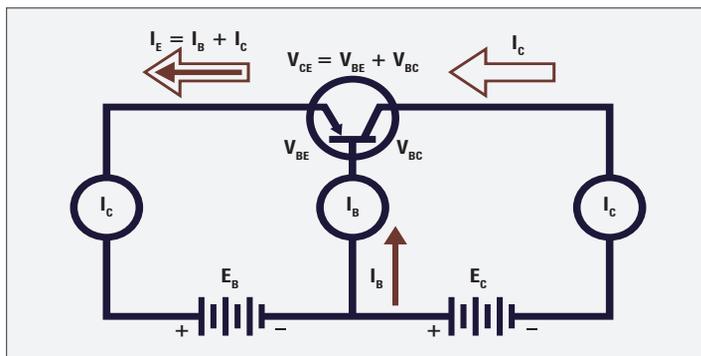


Figura 91 - Tensões e correntes do transistor

A corrente de base (I_B) é a menor de todas. Ela equivale a, aproximadamente, 5% da corrente de emissor (I_E), sendo os outros 95% a corrente de coletor (I_C). Seu valor é tão baixo que, em algumas aplicações, a (I_E) é igual à (I_C). Em relação à tensão, (V_{BE}) é a menor tensão do transistor, aproximadamente 0,7 V. As outras tensões são quase iguais, sendo (V_{CE}) a maior delas.

Como antes dito, a principal aplicação do transistor é a de amplificador de sinais. Entende-se por amplificação quando a amplitude do sinal de saída é maior que do sinal de entrada, e o **ganho do transistor** é que define o fator multiplicativo desse sinal, ou seja, quanto ele será amplificado.

Serão estudados os ganhos de corrente e tensão nas três possíveis configurações básicas que o transistor trabalha: base comum (BC), emissor comum (EC) e coletor comum (CC). O termo comum se refere ao terminal que é comum à entrada e à saída do circuito.

Na configuração BC, a base é comum à entrada e saída do circuito. Os outros dois elementos se dividem da seguinte maneira: emissor é ligado à entrada, e coletor à saída. Assim, na configuração BC (Figura 92):

- (I_E) é a corrente de entrada;
- (I_C) é a corrente de saída;
- (V_{BE}) é a tensão de entrada;
- (V_{BC}) é a tensão de saída.

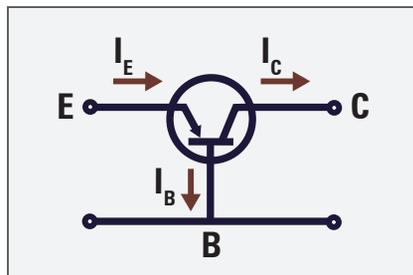


Figura 92 - Configuração BC

A partir da corrente e da tensão de entrada e saída da configuração BC, é possível conhecer os ganhos de tensão e corrente. Como o ganho é a relação do sinal de saída pela entrada, pode-se afirmar que:

- o ganho de corrente, representado pela letra grega alfa (α), é a relação de (I_C) por (I_E). Em geral, (I_C) é aproximadamente igual à (I_E), fazendo com que (α) seja próximo de 1;
- o ganho de tensão (A_v) é a relação de (V_{BC}) por (V_{BE}). Como (V_{BC}) é maior que (V_{BE}), (A_v) é sempre maior que 1.



Ganho do transistor: é a relação do sinal de saída pela entrada, em termos de tensão, corrente e potência. Para existir ganho, essa relação tem de ser maior que 1. Caso contrário, há perda ou atenuação.

A configuração BC é empregada em circuitos que necessitam de ganho de tensão maior que 1, pois o ganho de corrente é sempre próximo a 1. A Figura 93 mostra a relação entre a tensão de entrada (onda senoidal vermelha) e a tensão de saída (onda senoidal azul) em um circuito na configuração (BC).

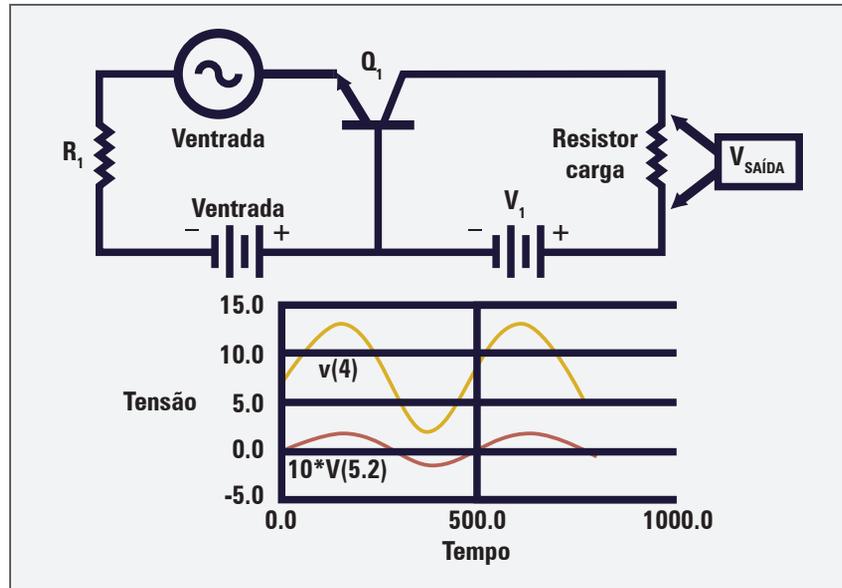


Figura 93 - Configuração BC

Na configuração CC, o coletor é comum à entrada e saída do circuito (Figuras 94.A e 94.B). Os outros dois elementos se dividem da seguinte maneira: base é ligada à entrada, e emissor à saída. Assim:

- I_B é a corrente de entrada;
- I_E é a corrente de saída;
- V_{BC} é a tensão de entrada;
- V_{CE} é a tensão de saída.

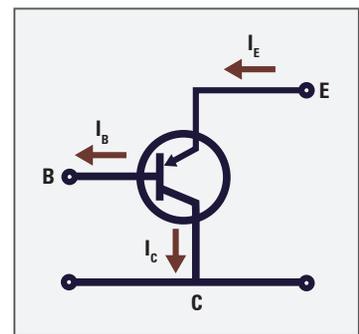


Figura 94 - Configuração CC

Na configuração CC, afirma-se que:

- o ganho de corrente, representado pela letra grega beta (β), é a relação de I_E por I_B . Como I_E é muito maior que I_B , o ganho de corrente é sempre maior que 1;
- o ganho de tensão (A_v) é a relação de V_{CE} por V_{BC} . Como V_{CE} é, aproximadamente, igual a V_{BC} , o ganho de tensão é quase igual a 1.

A configuração CC é muito utilizada para casamento de impedância, pois possui impedância de entrada alta e de saída baixa, sendo o oposto das outras configurações. A Figura 95 mostra a relação entre a tensão de entrada (onda senoidal vermelha) e a tensão de saída (onda senoidal azul) em um circuito na configuração CC.

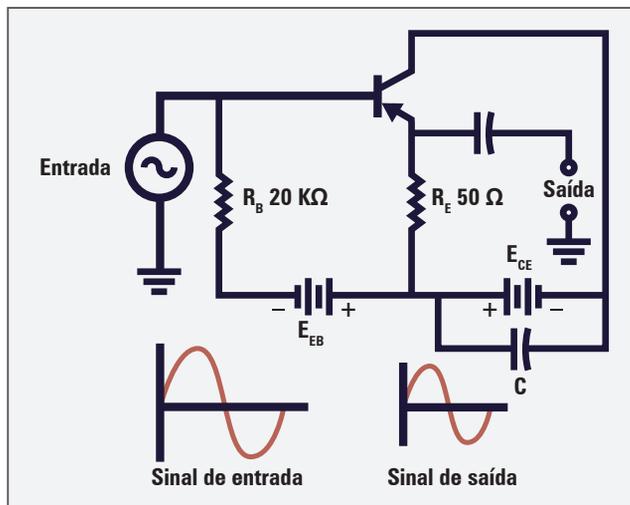


Figura 95 - Configuração CC

Na configuração EC, o emissor é comum à entrada e saída do circuito (Figuras 96.A e 96.B). Os outros dois elementos se dividem da seguinte maneira: base é ligada à entrada e coletor à saída. Assim, na configuração EC:

- (I_B) é a corrente de entrada;
- (I_C) é a corrente de saída;
- (V_{BE}) é a tensão de entrada;
- (V_{CE}) é a tensão de saída.

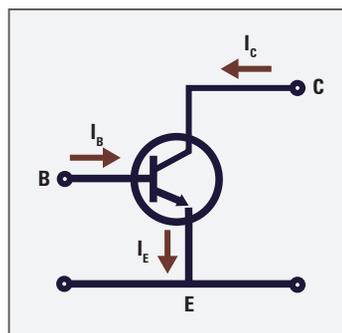


Figura 96 - Configuração EC

Na configuração EC, afirma-se que:

- o ganho de corrente, representado pela letra grega beta (β), é a relação de (I_C) por (I_B) . Como (I_C) é muito maior que (I_B) , o ganho de corrente é sempre maior que 1;
- o ganho de tensão (Av) é a relação de (V_{CE}) por (V_{BE}) . Como (V_{CE}) é muito maior que (V_{BE}) , o ganho de tensão também é sempre maior que 1.

A Figura 97 mostra a relação entre a tensão de entrada (onda senoidal vermelha) e a tensão de saída (onda senoidal azul) em um circuito na configuração EC. Nota-se que a tensão de saída está defasada de 180° da tensão de entrada, o que é uma característica da configuração EC.

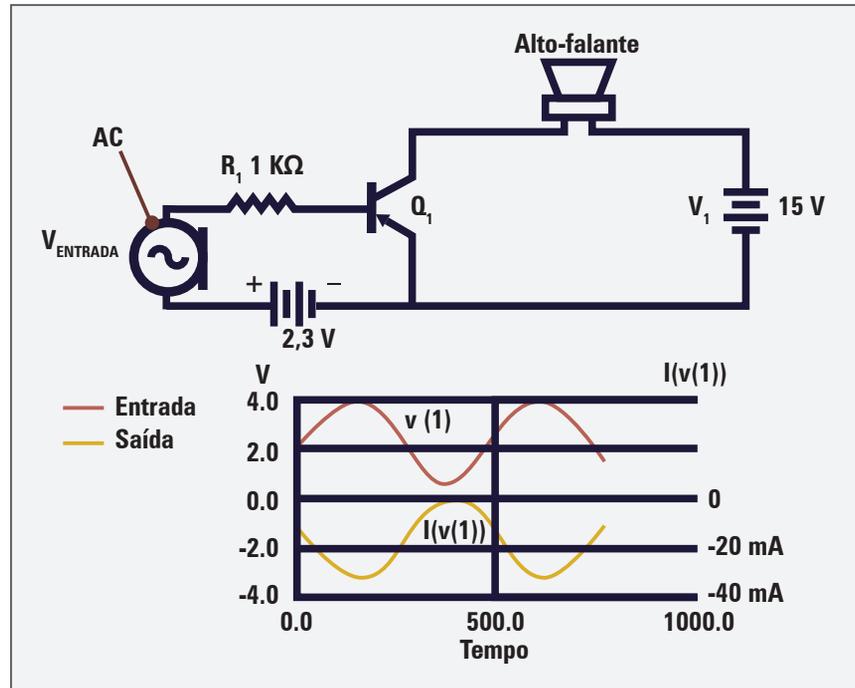


Figura 97 - Configuração EC

O fato de a configuração EC apresentar ganho de tensão e corrente faz com que ela seja a mais utilizada nos circuitos eletrônicos. Por esse motivo, é importante conhecer suas principais características.

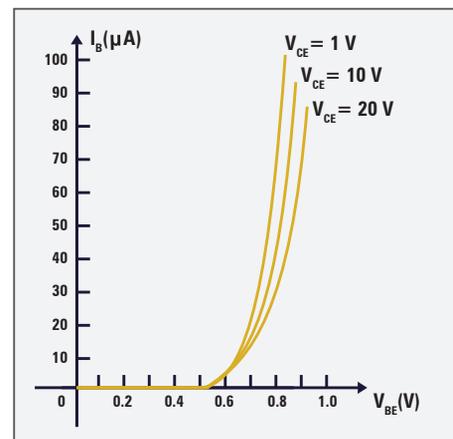
Configuração emissor comum (EC)

As principais características da configuração emissor comum são apresentadas a seguir.

a) Curva característica de entrada

A curva característica de entrada é formada em função de (I_B) (corrente de entrada) por (V_{BE}) (tensão de entrada) para uma faixa de valores de (V_{CE}) (tensão de saída), conforme o Gráfico 9. Observando a curva, nota-se que um pequeno aumento em (V_{BE}) (tensão de entrada) resulta em uma grande diferença em (V_{CE}) (tensão de saída).

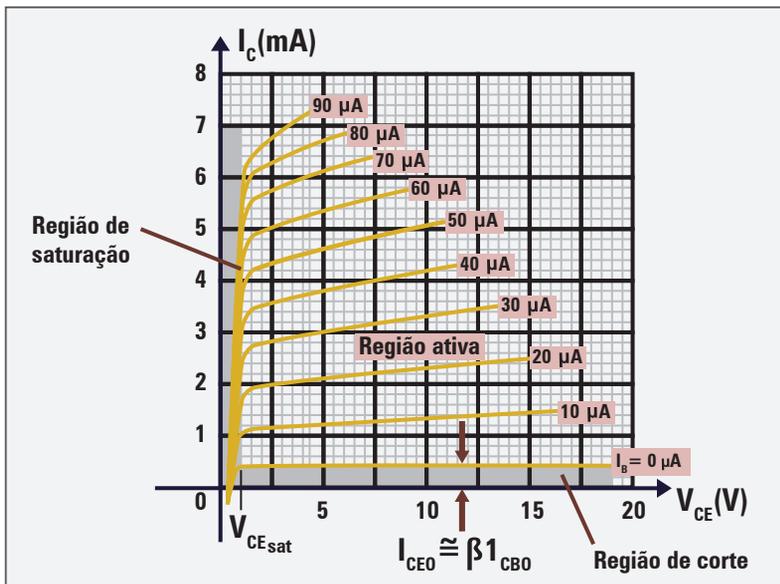
GRÁFICO 9 - Curva característica de entrada EC



b) Curva característica de saída

A curva característica de saída é formada em função da corrente de saída (I_C) pela tensão de saída (V_{CE}) para uma faixa de valores de (I_B), conforme o Gráfico 10. De acordo com a curva, quanto maior (I_B) (corrente de entrada), maior é a (I_C) (corrente de saída), mesmo (I_B) sendo muito pequena, na ordem de microamperes.

GRÁFICO 10 - Curva característica de saída EC



A curva apresenta três regiões de trabalho para o transistor: região de saturação, de corte e ativa. Na região de saturação, o transistor apresenta o menor valor de resistência possível. A corrente que passa por ele é máxima (I_C) e a tensão é mínima (V_{CE}). Nessa situação, o transistor compara-se a uma chave fechada.

A região de corte é o oposto da saturação. Conforme se vê na parte inferior do Gráfico 10, a corrente (I_C) é mínima, enquanto a tensão (V_{CE}) é máxima. Em corte, o transistor assemelha-se a uma chave aberta.

A outra região é a ativa. Ela compreende a maior parte curva de saída e, nesta região, o transistor funciona como amplificador de tensão, de corrente e de potência.

c) Ganho de corrente (β)

O ganho de corrente na configura EC é a relação entre a corrente de saída (I_C) pela corrente de entrada (I_B). Além de ser representado pela letra grega beta (β), ele também é comumente referido como *forward current transfer ratio* (h_{FE}).

$$h_{FE} = \beta = \frac{i_C}{i_B}$$

Como (I_C) é maior que (I_B), o ganho de corrente é sempre maior que 1, na configuração EC, e o transistor funciona como amplificador de corrente.



(h_{FE}): termo utilizado para análise de resposta do transistor trabalhando com sinal alternado, significando seu ganho de corrente, podendo ser chamado também de β (beta).

d) Ganho de tensão (A_v)

O ganho de tensão na configura EC é a relação entre a tensão de saída (V_{CE}) pela tensão de entrada (V_{BE}).

$$A_v = \frac{V_{CE}}{V_{BE}}$$

Por (V_{CE}) ser maior que (V_{BE}), o ganho de tensão é sempre maior que 1 na configuração EC e o transistor funciona como amplificador de tensão também.

2.2.1 Polarização de transistores

Para funcionar, o transistor precisa ser polarizado, o que consiste em fornecer os valores de tensão e corrente contínua (CC) para a base, o emissor e o coletor. Esses valores dependem do circuito a ser elaborado e das características de construção do transistor, as quais são especificadas pelo fabricante.

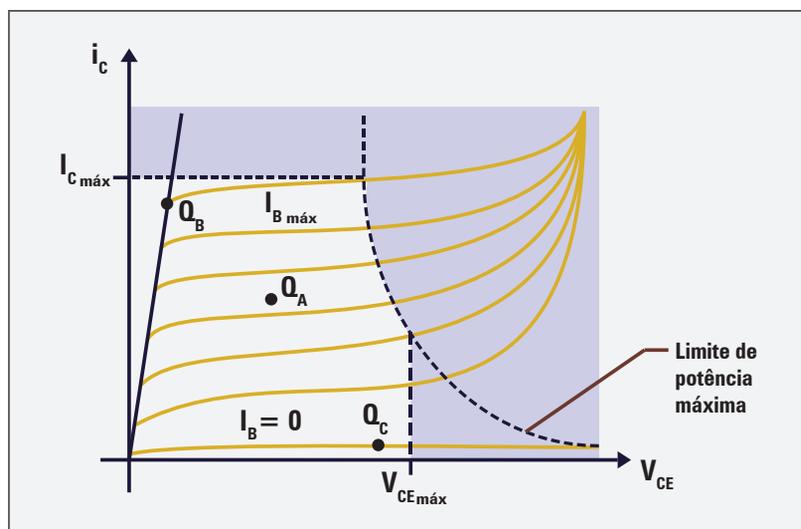
Os valores de corrente e tensão CC, para o transistor, estabelecem o ponto de operação, conhecido como **ponto quiescente (Q)**. O ponto (Q) é estipulado de acordo com o funcionamento do transistor dentro do circuito eletrônico. Assim, por exemplo, com um amplificador de áudio é estipulado um valor para o ponto (Q) do transistor, caso seja um oscilador eletrônico, será estipulado outro valor para (Q).

O ponto (Q) determina pontos de operação do transistor. Existem pontos mais comuns de funcionamento, são eles: ponto de corte, saturação e ativa. No Gráfico 11, é demonstrado o exemplo para esses três pontos de (Q).



Ponto quiescente (Q): ponto de operação do transistor, estabelecido em função dos valores da polarização de corrente contínua do circuito.

GRÁFICO 11 - Pontos quiescentes do transistor



O ponto (Qa) do Gráfico 11 é chamado de ponto da ativa, pois o transistor está constantemente ligado (ativo), trabalha na região ativa. No (Qa), é possível ter variação das correntes (I_B) e (I_C) e da tensão (V_{CE}) para valores maiores ou menores estipulados para (Qa). O ponto (Qb) é chamado

de ponto de saturação, pois o transistor está trabalhando no máximo de sua condução, não sendo possível aumentar seu trabalho, está saturado. No (Qb), só há variação das correntes (I_B) e (I_C) para um valor menor, e da (V_{CE}) para valores maiores do estipulado para esse ponto. O ponto (Qc) é chamado de ponto de corte, pois o transistor está no limiar do trabalho, está em *standby*, qualquer minúsculo sinal liga o transistor. No (Qc), só pode haver variação das correntes (I_B) e (I_C) para um valor maior, e da (V_{CE}) para valores menores do estipulado para esse ponto.

A teoria básica de transistor estabelece que, para o seu funcionamento normal, é necessário polarizar diretamente a junção base-emissor e inversamente a junção base-coletor. Assim, para as regiões de corte e saturação, que não são pontos de funcionamento normal, as polarizações precisam ser estas:

- região de corte - para o transistor operar nessa região, a junção base-emissor e a junção base-coletor deve ser polarizada inversamente. Nessa região, o transistor está desligado;
- região de saturação - para o transistor operar nessa região, a junção base-emissor deve ser polarizada diretamente e a junção base-coletor diretamente. Quando o transistor está operando na saturação, os níveis de sinais estão no máximo valor permitido.

As regiões ativa, de corte e saturação são usadas de acordo com a necessidade de funcionamento do transistor. Assim, para cada função, tem-se o transistor polarizado com o ponto quiescente conforme exigências eletrônicas do circuito, não existindo uma região melhor, mas, sim, a mais apropriada para o seu funcionamento.

Circuito transistorizado com polarização fixa

O circuito das Figuras 98.A e 98.B demonstra um transistor funcionando em emissor comum com polarização fixa. As correntes e tensões de configuração são determinadas mediante a análise de malhas de Kirchhoff. O transistor usado para o exemplo é do tipo NPN e o sentido das correntes está de acordo com as polaridades requeridas para esse circuito, porém, para usar um transistor tipo PNP, é só inverter as alimentações, o que produz uma inversão das correntes.

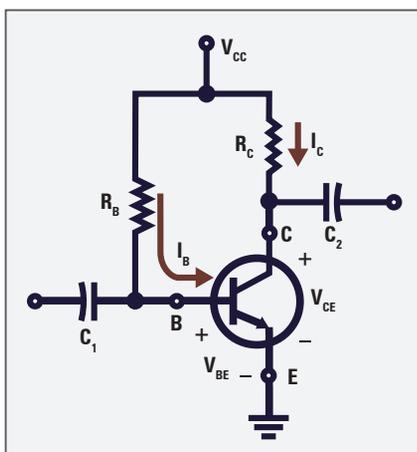


Figura 98.A - Circuito transistorizado para análise de malhas de polarização

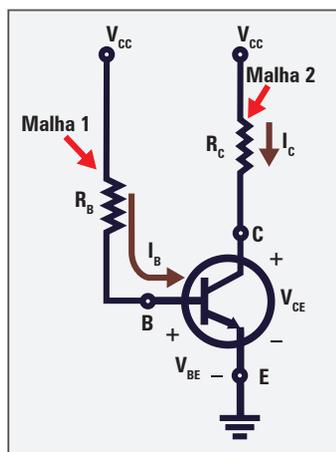


Figura 98.B - Identificação das malhas de polarização de um circuito transistorizado



Polarização: valores de tensão estabelecidos para o funcionamento de circuitos eletrônicos.

O circuito da Figura 98.A representa uma simplificação da Figura 98.B, assim é possível analisar o seu funcionamento. No circuito, existem duas malhas para serem analisadas, a de coletor e a de base. Por intermédio da análise dessas malhas, o transistor é polarizado e colocado no ponto de operação necessário ao projeto.

Para obter a equação da malha da base basta considerar a corrente de base (I_B) saindo da fonte de tensão (V_{CC}) e indo em direção ao terra, dessa forma, pela lei da malha de Kirchhoff, é obtido:

$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

Trabalhando a equação anterior é possível determinar o resistor de polarização de base (R_B) do circuito.

$$V_{CC} = R_B I_B + V_{BE} \quad \text{então: } R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B}$$

Os detalhes que precisam ser lembrados para obter as equações anteriores são:

- o sentido convencional da corrente estabelece a corrente saindo do ponto positivo e chegando no ponto negativo, na análise anterior saiu do (V_{CC}) (positivo) e foi para o terra (negativo);
- a soma das quedas de tensões na malha deve ser igual à tensão de alimentação da malha, desse modo, nas equações anteriores, (V_{CC}) tem valor igual a soma de (V_{BE}) com a queda de tensão no R_B ($V_{RB} = I_B \cdot R_B$);
- o valor de tensão típico para (V_{BE}) é 0,7 V para um transistor de silício, e 0,3 V para um transistor de germânio.

Antes de analisar a malha de coletor é importante lembrar a relação que existe entre a corrente de base (I_B) e coletor (I_C), a qual é chamada de (β) e determina o ganho de corrente do transistor.

A corrente de coletor (I_C) depende da corrente de base (I_B), e não do resistor de coletor (R_C), este resistor determina a tensão entre coletor-emissor (V_{CE}). Para calcular o valor de (R_C), aplica-se a lei de Kirchhoff para malhas.

$$+V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} = 0 \quad V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}$$

$$\text{Sendo } \beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{e} \quad I_E = I_C + I_B$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} \quad \text{ou} \quad R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C}$$

Por meio dessas equações, é possível polarizar um transistor na configuração de polarização (Figura 99) fixa para funcionar perfeitamente no ponto de operação ideal. Por exemplo, com base no circuito a seguir, determine os valores da (I_C), (V_{CC}), (β) e (R_B). As equações são utilizadas para a polarização fixa.

Solução:

$$I_E = I_C + I_B \quad I_C = I_E - I_B \quad I_C = 4 \text{ mA} - 20 \mu\text{A} = 3,98 \text{ mA}$$

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} \quad V_{CC} = (2 \text{ k}\Omega \cdot 3,98 \text{ mA}) + 7 \text{ V} = 14,96 \text{ V}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta = \frac{3,98 \text{ mA}}{20 \mu\text{A}} = 199$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} \quad R_B = \frac{14,96 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{20 \mu\text{A}} = 713 \text{ k}\Omega$$

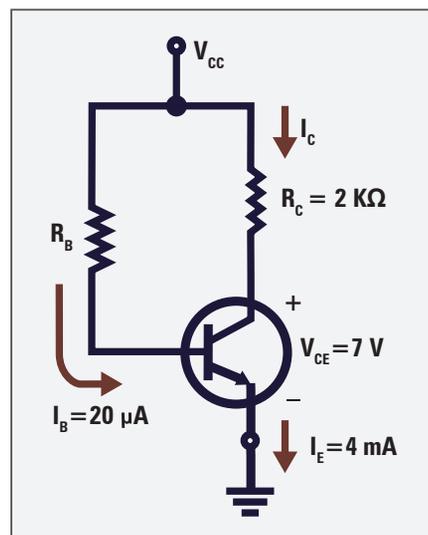
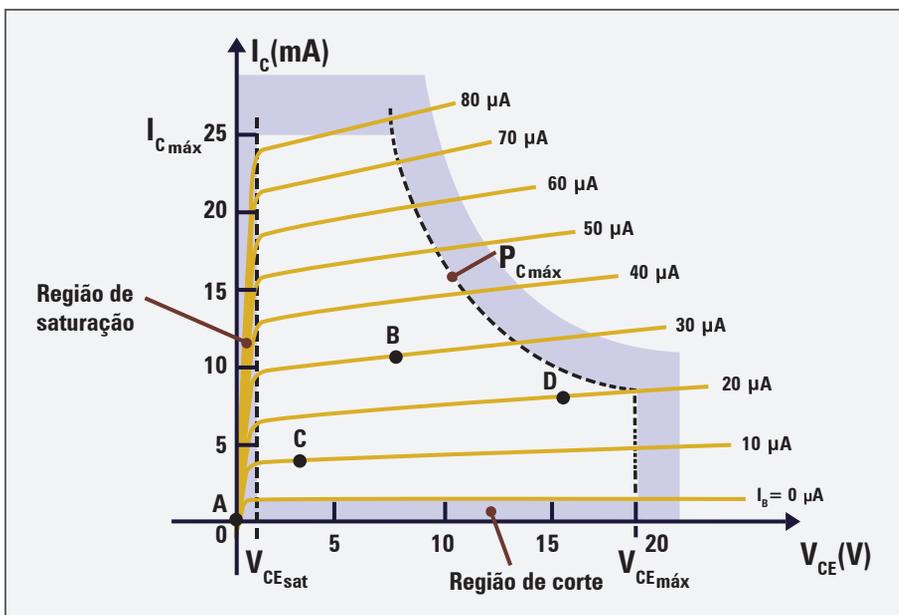


Figura 99 - Configuração de polarização fixa do transistor

2.2.2 Retas de carga

A reta de carga estabelece a faixa de variação dos valores para o ponto quiescente (Q) para um determinado transistor. Ela é traçada sobre a curva característica de saída, tensão x corrente e os dois pontos usados como base para o seu traçado são definidos de acordo com o circuito ao qual o transistor está ligado. O Gráfico 12 demonstra uma reta de carga traçada sobre a curva de saída de um transistor na configuração emissor comum.

GRÁFICO 12 - Regiões de operação do transistor



No Gráfico 12, os valores de (I_{Cmax}) e (V_{CEsat}) são para o ponto de saturação do transistor, e (V_{CEmax}) é o valor máximo para a tensão entre coletor e emissor quando está em corte.

Traçando reta de carga

Para traçar a reta de carga para circuitos transistorizados, é empregada a curva característica de saída do transistor e a equação da malha de saída do circuito a ser polarizado. Usando como base o circuito com polarização fixa e a curva de saída do transistor, ambos apresentados na Figura 100, traça-se a reta determinando dois pontos:

- ponto de corte, quando a corrente de coletor (I_C) é zero;
- ponto de saturação, quando a tensão entre coletor-emissor é zero.

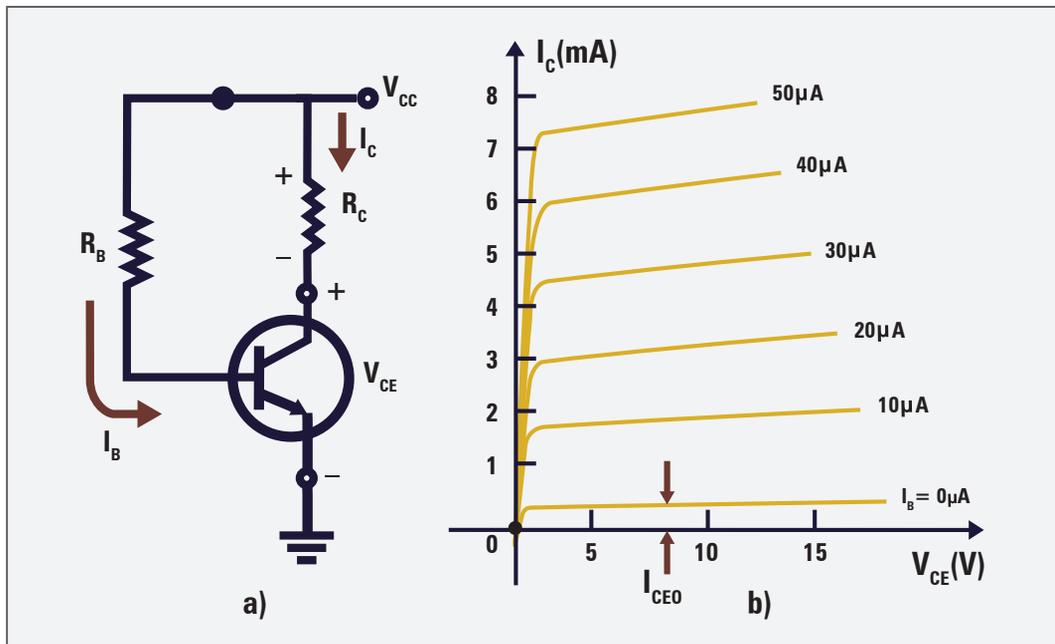
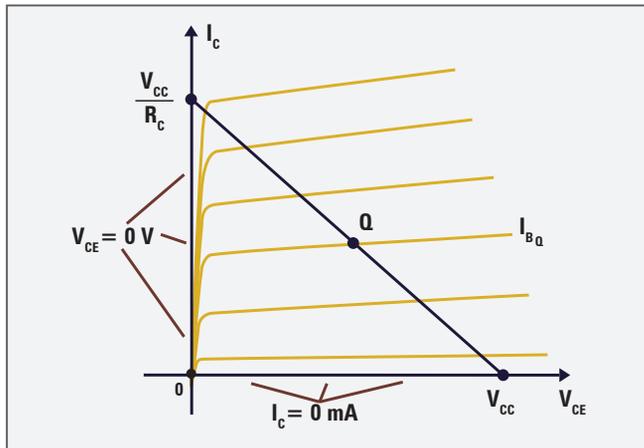


Figura 100 - Circuito com polarização fixa e curva de saída

A equação da malha de saída do circuito da Figura 100 é: $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ o ponto de corte é determinado considerando $I_C = 0 \text{ mA}$, então: $V_{CE} = V_{CC}$, com isso é definido o primeiro ponto no gráfico.

O ponto de saturação é determinado considerando $V_{CC} = 0 \text{ V}$, então: $I_c = \frac{V_{CC}}{R_c}$, com isso é definido o segundo ponto no Gráfico 13.

GRÁFICO 13 - Ponto de corte e saturação na reta de carga do transistor



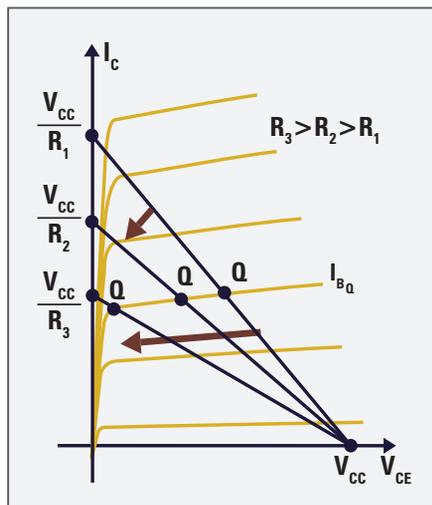
O ponto quiescente (**Q**) fica sobre a reta traçada no Gráfico 13 e varia o valor de (I_b), pela variação de (R_b), esse ponto caminha pela reta. A reta de carga de um circuito demonstra os possíveis pontos de operação do transistor e os limites permitidos para seu perfeito funcionamento.

Por exemplo, determinando os pontos da reta de carga de um circuito com transistor funcionando com polarização fixa que trabalha com $V_{CC} = 12 \text{ V}$ e $R_c = 2 \text{ K}\Omega$, são obtidos os pontos:

- para o corte: $V_{CE} = V_{CC} \quad V_{CE} = 12 \text{ V}$
- para a saturação: $I_c = \frac{V_{CC}}{R_c} \quad I_c = \frac{12 \text{ V}}{2 \text{ K}\Omega} = 6 \text{ mA}$

Caso o valor de (R_c) do circuito seja alterado, a reta muda seu ângulo, conforme demonstrado no gráfico a seguir.

GRÁFICO 14 - Movimento do ponto quiescente (**Q**) sobre a reta de carga



2.2.3 Estabilização da polarização com resistor

Os transistores são instáveis à variação de temperatura. Esse fenômeno é devido às características intrínsecas do material básico usado na sua confecção. Por causa dessas características, quando polarizado, o transistor apresenta uma pequena corrente indesejável, chamada de corrente inversa ou corrente de fuga (I_{CBO}). A (I_{CBO}) é a corrente que flui entre o coletor e a base, estando o emissor em circuito aberto, de acordo com a Figura 101. A (I_{CBO}) vai gerar no coletor a (I_{CEO}) corrente que flui entre coletor e emissor com a base em aberto, sendo determinada pela equação: $I_{CEO} = (\beta + 1) I_{CBO}$, nessa equação, (β) é o ganho de corrente do transistor, característica fornecida pelo fabricante do componente e varia para cada tipo de transistor.

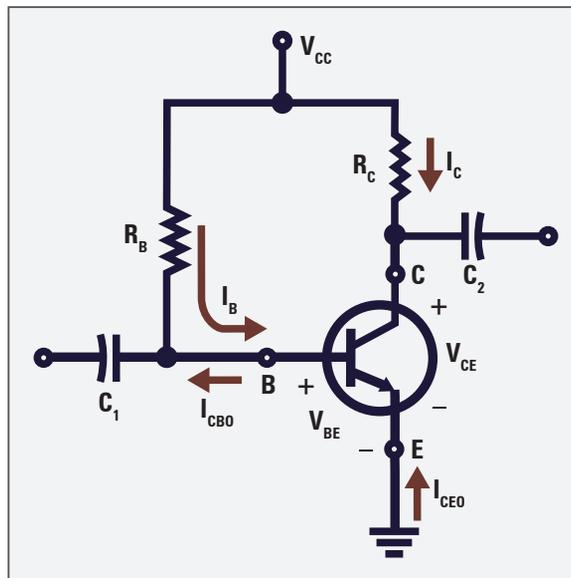


Figura 101 - Correntes de fuga do transistor

A (I_{CEO}), também chamada em algumas literaturas (I_{CO}), é especificada pelo fabricante e consta nas características do transistor. Seu valor é fornecido para determinadas temperaturas, geralmente 25 °C. O aumento de temperatura nas junções de um transistor começa pela elevação na temperatura ambiente ou mesmo em razão do funcionamento normal do circuito.

A variação de temperatura aumenta o valor do (β), o valor da tensão de polarização da base (V_{BE}) diminui e a corrente de fuga (I_{CEO}) dobra de valor para cada aumento na temperatura de 10 °C. Essas variações tiram o ponto de operação (**Q**) do transistor da posição, causando instabilidade e mau funcionamento do circuito.

Em qualquer situação, o circuito tem de estar em condições de manter-se em bom funcionamento. O bom funcionamento de um circuito depende de como ele está polarizado e estabilizado. A polarização é estabelecida para um transistor pela especificação dos valores para o ponto quiescente de trabalho. Uma operação confiável do transistor, dentro de um grande intervalo de temperatura, requer que a tensão e a corrente de polarização permaneçam estáveis. Todavia, variações das correntes de fuga, em função da variação de temperatura, prejudicam a estabilidade da polarização se circuitos de compensação não forem empregados.

No caso da (I_C) aumentar em função do aumento da (I_{CB0}), o ponto (Q) do circuito sofre um deslocamento ao longo da reta de carga. A mudança do ponto (Q) pode ser cumulativa e destruir o transistor. As medidas empregadas para contornar essa situação são os sistemas de polarização automática, ou seja, de estabilização da polarização.

Para contornar as variações que a temperatura e (β) causam no circuito de polarização fixa da Figura 102, é usado um resistor de emissor (R_E).

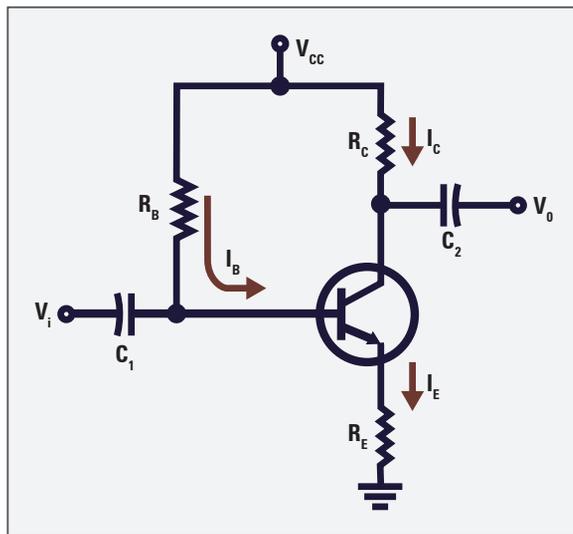


Figura 102 - Resistor de estabilização da polarização

A resistência (R_E) inserida no circuito trabalha para evitar os aumentos de corrente que ocorrem em função das variações de temperatura e (β). Para entender como essa resistência melhora a resposta do circuito para as variações citadas, analisa-se a equação da malha de base:

$$V_{CC} = V_{R_B} + V_{BE} + V_{R_E} \quad \text{ou} \quad V_{CC} = R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

A malha do coletor fornece a seguinte equação: $V_{CC} = V_{R_C} + V_{CE} + V_{R_E}$

Lembrando que a malha de base vai da alimentação (V_{CC}) até o terra, diferente do exemplo anterior quando (R_E) não fazia parte do circuito, agora é necessário considerá-lo na malha. A corrente de emissor (I_E) é determinada pela relação:

$$I_E = I_B + I_C \quad \text{ou} \quad I_E = (\beta + 1) I_B$$

Com as equações apresentadas a corrente (I_B) é escrita da seguinte maneira:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

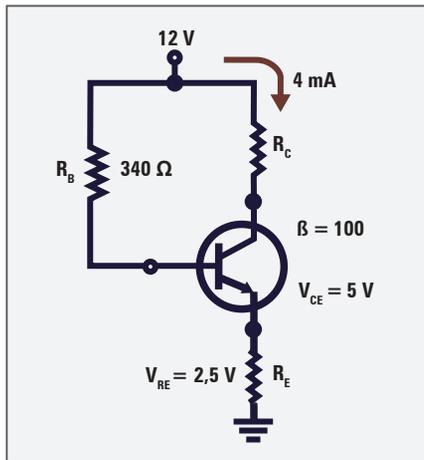


Figura 103 - Cálculo da polarização do transistor na configuração fixa com (R_E)

Na equação de (I_B), o termo $(\beta + 1)R_E$ reflete a malha de saída (coletor) para a entrada, sendo essa a característica que ajuda a manter a polarização estável. Considerando uma situação de aumento do (β) em função da variação de temperatura, a tendência são as correntes $I_B/I_C/I_E$ aumentarem. Contudo, observando a equação de (I_B) anterior, ao aumentar (β), o valor de (I_B) diminui e, conseqüentemente, (I_E) diminui, pois $I_E = I_B + I_C$ e $I_E = (\beta + 1)I_B$. Desse modo, a tendência de aumento das correntes gera uma realimentação para a malha de base em função de (R_E) e o efeito da temperatura é contornado sem causar problemas de funcionamento ao circuito.

Por exemplo, com base no circuito da Figura 103, são determinados os valores da (I_B), (I_E), (R_E) e (R_C). A resolução usa as equações para a polarização fixa com resistor de emissor.

Resolução:

$$V_{CC} = V_{R_B} + V_{BE} + V_{RE} \quad V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE} + V_{RE} \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - V_{RE}}{R_B} = \frac{12 \text{ V} - 0,7 \text{ V} - 2,5 \text{ V}}{340 \text{ K}\Omega} = 25,88 \mu\text{A}$$

$$I_E = I_C + I_B \quad I_E = 4 \text{ mA} + 25,88 \mu\text{A} \cong 4,025 \text{ mA}$$

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{2,5 \text{ V}}{4,025 \text{ mA}} = 621,1 \Omega$$

$$V_{CC} = V_{R_C} + V_{CE} + V_{RE} \quad V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} + V_{RE} \quad R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_{RE}}{I_C} = \frac{12 \text{ V} - 5 \text{ V} - 2,5 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 11,25 \Omega$$

Todos os equipamentos eletrônicos têm artifícios para evitar que as variações de temperatura ocasionem mau funcionamento. Os fabricantes garantem a eficiência para uma faixa de temperatura, pois, mesmo usando métodos de estabilização da polarização, como o (R_E), explicado anteriormente, os recursos de estabilização não funcionam fora da faixa de trabalho.

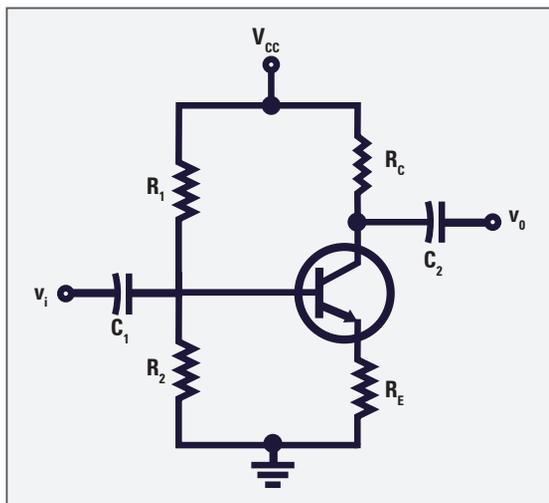


Figura 104 - Circuito de polarização por divisão de tensão na base

No circuito de polarização fixa com resistor de emissor (R_E), existe uma estabilidade de temperatura causada pela inserção desse resistor, porém, conforme visualizado nas equações anteriores, a estabilidade depende do ganho de corrente (β) do transistor. O problema é que o (β) é variável com a temperatura, portanto, os cálculos realizados para essa polarização não são muito confiáveis. Uma solução é utilizar configuração independente do (β) para manter a estabilidade das tensões e correntes de operação do transistor. Exemplo de circuito que tenha essas características é a polarização por divisão de tensão na base, conforme exemplificado na Figura 104.

Usando parâmetros adequados para a polarização do circuito da Figura 103, é possível depender pouco das variações do (β). A vantagem dessa configuração, com relação à polarização fixa, é a tensão fixa na base fornecida pelo divisor de tensão formado pelos resistores (R_1) e (R_2).

Para exemplificar, considerando um aumento das correntes do circuito da Figura 104 por meio de um aumento da temperatura, a tensão sobre o resistor (R_E) tende a aumentar, porque $V_{RE} = I_E \cdot R_E$. Todavia, (V_{R2}) é fixa, definida pelo divisor de tensão (R_1) e (R_2), como a tensão na base é determinada por $V_B = V_{R2} = V_{BE} + V_{RE}$. Como (V_{R2}) é fixa e (V_{RE}) tendeu a aumentar, a (V_{BE}) tem de diminuir para manter a igualdade da equação, com essa diminuição da (V_{BE}), o transistor reduz sua condução, levando-o a baixar suas correntes que tenderam a aumentar. O efeito do divisor de tensão na base é forçar as correntes a variar de modo a cancelar a variação ocorrida pela modificação da temperatura.

A correta polarização do transistor com divisor de tensão na base é feita pelo método de aproximação. Para usar esse método, utiliza-se a seguinte relação: $\beta R_E \geq 10 \cdot R_2$. Tal relação deve ser aplicada no circuito para que seja empregado o método aproximado de polarização, com esse método é obtida uma precisão muito boa e os cálculos são mais simplificados.

Considerando que a relação anterior é obedecida, as seguintes equações são utilizadas para polarizar o transistor na configuração de divisor de tensão na base.

Relação de condição: $\beta R_E \geq 10 \cdot R_2$

$$V_B = \frac{R_2 \cdot V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad V_E = V_B - V_{BE} \quad I_C = I_E$$

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE}$$

2.2.3.1 Estabilização da polarização com termistor

O termistor é empregado em circuitos transistorizados com vistas a ajudar na estabilização do ponto quiescente. Na Figura 105, o termistor tipo NTC é ligado em paralelo com a junção coletor-emissor do transistor.

Na Figura 104, por exemplo, caso a temperatura suba levando a corrente de fuga a aumentar, as correntes de base, o coletor e o emissor também se elevam, no entanto, como o NTC possui coeficiente de temperatura negativo, sua resistência diminui. Quando a resistência do NTC reduz, a corrente que flui por ele (I_T) é maior, forçando uma polarização inversa maior no emissor do transistor, pois a corrente (I_T) passa por (R_E) e deixa sua parte superior mais positiva.

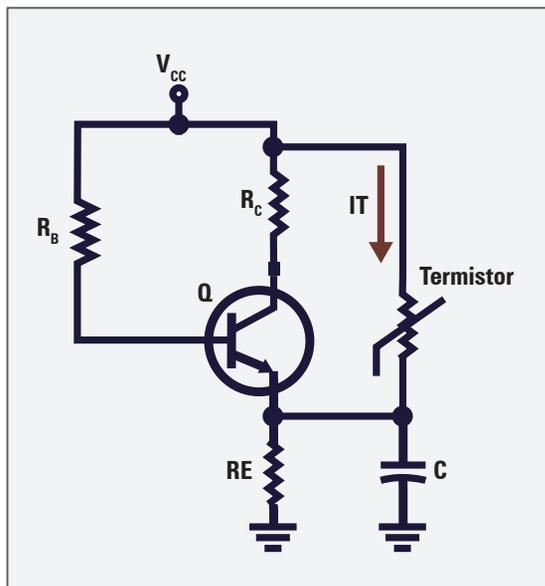


Figura 105 - Estabilização da polarização com termistor

Dessa forma, a tendência de aumento das correntes do transistor é logo controlada pela variação do termistor, o qual força a diminuição das correntes por meio da polarização inversa aplicada ao emissor do transistor e mantém a estabilização da polarização.

2.2.3.2 Estabilização da polarização com diodo

Para fazer a estabilização da polarização, é usado também o diodo. A vantagem do diodo sobre um termistor é a sua característica semicondutora igual ao do transistor, dessa forma, sua resposta para a variações de temperatura são iguais. Na Figura 106, a configuração fixa recebe um diodo ligado em paralelo com a junção coletor-emissor, com vistas a ajudar na estabilização da polarização.

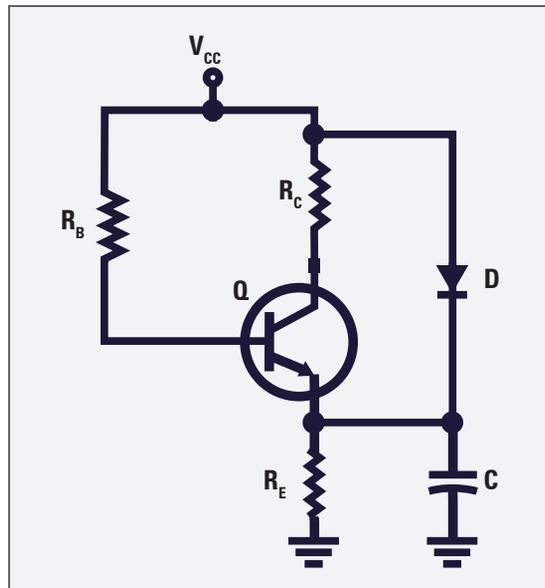


Figura 106 - Estabilização da polarização com diodo

Do mesmo modo que no circuito com termistor, quando a temperatura aumenta, as correntes do transistor tendem a se elevar. Como o diodo tem as mesmas características do transistor, sua corrente também aumenta, nesse sentido, tem-se uma elevação da polarização inversa aplicada ao emissor por meio do resistor (R_E). Conseqüentemente, a tendência de aumento das correntes é compensada pela resposta do diodo e pela estabilização da polarização.

2.2.4 Limitações dos transistores e curva de máxima dissipação de potência

Ao lançar um transistor no mercado, o fabricante fornece todas as informações sobre ele em seus manuais, *data sheets*, para facilitar o trabalho dos técnicos e projetistas de circuitos. Uma das principais informações fornecidas é a família de curvas características de saída do transistor, pois essas curvas permitem traçar a reta de carga e a curva de máxima dissipação de potência.

Para que um transistor não se danifique durante seu funcionamento, não basta que ele trabalhe dentro dos limites de dissipação de potência, é necessário, também, controlar os limites de corrente, de tensão e de temperatura máxima suportada pelo transistor. Portanto, antes de entrar no traçado da curva de máxima dissipação de potência, é relevante compreender considerações sobre tais limitações.



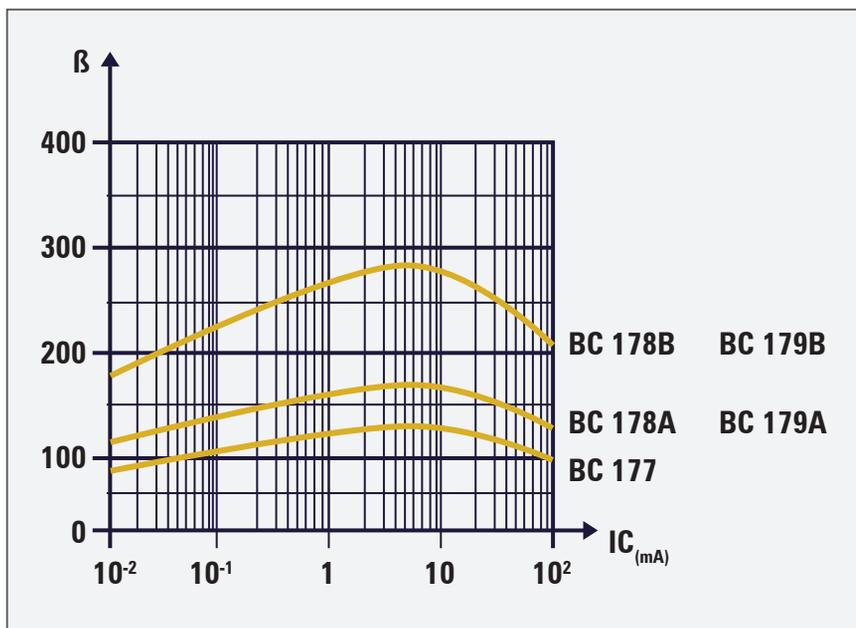
Data sheet: também conhecida como “folha de dados”, descreve, de forma resumida, características e informações do componente ou equipamento.

2.2.4.1 Limites de corrente

O fabricante especifica a corrente de coletor máxima que pode fluir no transistor, entretanto, desde que a potência dissipada não ultrapasse o valor máximo especificado no *data sheet*, a corrente de coletor é aumentada até um ponto que não destrói o material do transistor. É possível haver caso em que, mesmo sem exceder a potência especificada, a corrente seja suficientemente alta a ponto de destruir os fios de conexão dos dispositivos no circuito.

Embora o (β) dependa do transistor, ele sofre variações de acordo com o valor de (I_C). Para valores muito elevados de corrente, o (β) diminui. O Gráfico 15 mostra três curvas para alguns tipos de transistores do mercado, nelas, o (β) sofre variações de acordo com o valor da corrente de coletor (I_C).

GRÁFICO 15 - Curva de ganho (β) versus corrente de coletor



2.2.4.2 Limites de tensão

Para os limites de tensão, o fabricante fornece os valores máximos entre os três terminais, ou seja, os valores máximos de (V_{BE}), (V_{BC}) e (V_{CE}) quando essas junções são polarizadas inversamente. No funcionamento normal do transistor, a junção base-emissor é polarizada diretamente, mas o fabricante costuma dar a tensão máxima inversa, caso ela venha a ser polarizada inversamente. Assim, independente da polaridade das tensões aplicadas às junções, o fabricante informa as tensões máximas permitidas.

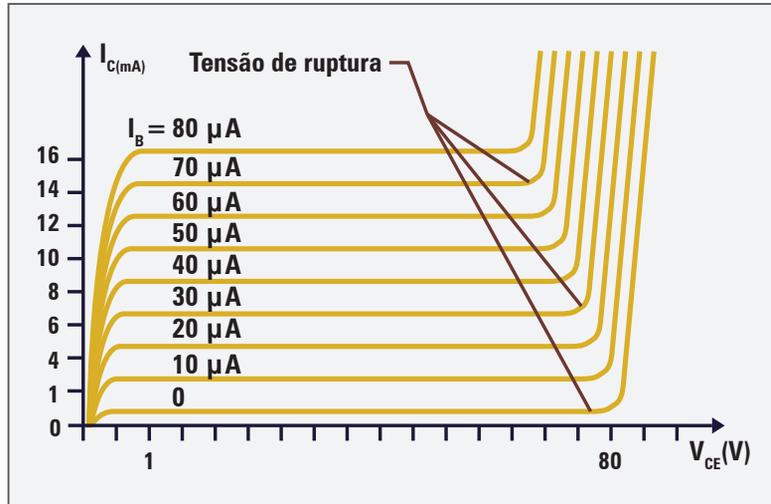
Os valores máximos para as junções são necessários em virtude do efeito de ruptura que ocorre quando se aumenta a tensão inversa além do valor limite estipulado em *data sheet*. Por exemplo,



Tensão de ruptura: máxima tensão inversa suportada pelo transistor ou diodo semiconductor.

se a tensão inversa entre base e coletor for aumentando, com $I_E = 0$, atinge-se a **tensão de ruptura** (tensão zener) e há um rápido aumento na corrente de coletor. Isso acontece também quando a corrente de emissor é diferente de zero. O Gráfico 16 mostra o valor de ruptura de um transistor.

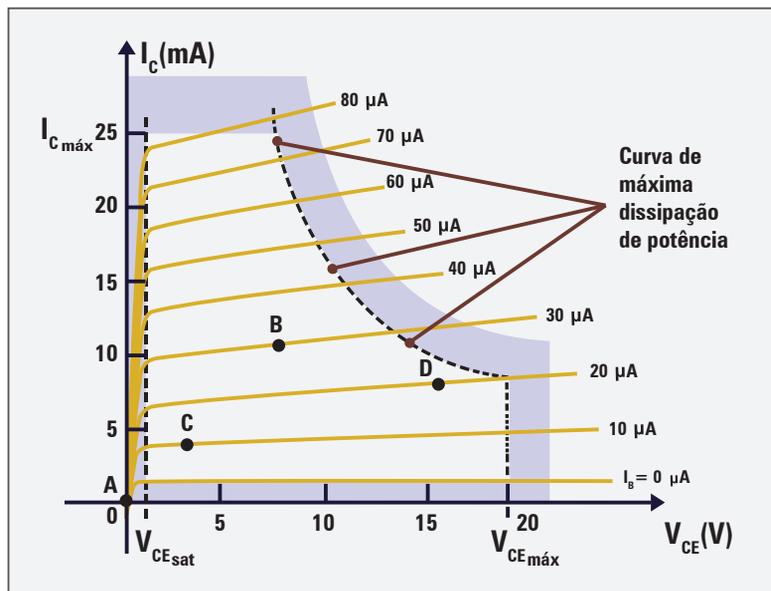
GRÁFICO 16 - Tensão de ruptura do transistor



2.2.4.3 Limites de potência

A limitação de potência é a mais importante para os transistores, bem como para todos os dispositivos semicondutores e componentes eletrônicos passivos. A potência máxima a ser dissipada por um componente é especificada no manual do fabricante e precisa ser respeitada no projeto. Fazer o componente trabalhar além da especificação do fabricante diminui o seu tempo de vida ou o destrói. A seguir, o Gráfico 17 traz a indicação de pontos de trabalho, pontos quiescentes, na curva de saída de um transistor e a indicação da curva máxima de potência.

GRÁFICO 17 - Indicação da máxima dissipação de potência do transistor



Esse gráfico apresenta pontos de operação que estão todos abaixo da curva de máxima dissipação de potência do transistor. Colocar os pontos quiescentes na região de operação deve ser sempre uma preocupação, pois é possível pôr o ponto quiescente além da curva, porém isso faz com que o transistor trabalhe constantemente quente, devido à potência dissipada. Essa situação de operação força o componente, acarretando a sua queima precoce.

O traçado da curva de dissipação de potência é feito sobre a curva característica de saída do transistor. Sendo a potência dissipada no transistor igual ao produto da sua corrente de coletor (I_C) pela tensão entre coletor e emissor (V_{CE}), é possível traçar a curva com a seguinte equação:

$$P_{MAX} = I_C \cdot V_{CE}$$

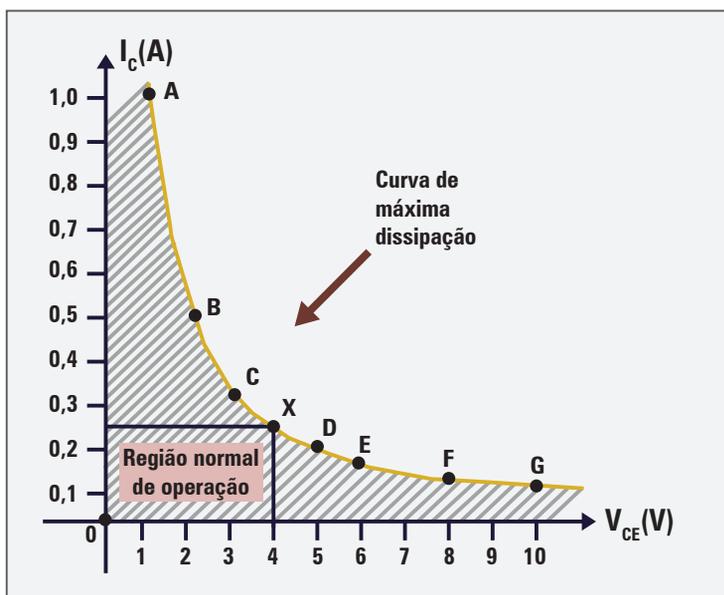
Para traçar a curva de potência, é obtido do *data sheet* do fabricante o valor da (P_{MAX}), de acordo com o transistor, e os valores de (V_{CE}), conforme o projeto. Para exemplo, considerando a (P_{MAX}) de 1 watt e variando a tensão (V_{CE}) de 1 a 6 volts, a Tabela 4 e o Gráfico 18 demonstram como é obtida a curva de máxima dissipação de potência.

Tabela 4 - Máxima dissipação de potência

Ponto	A	B	C	D	E	F
P_{MAX}	1 W	1 W	1 W	1 W	1 W	1 W
I_C (mA)	1.000	500	333	250	200	166
V_{CE} (V)	1	2	3	4	5	6

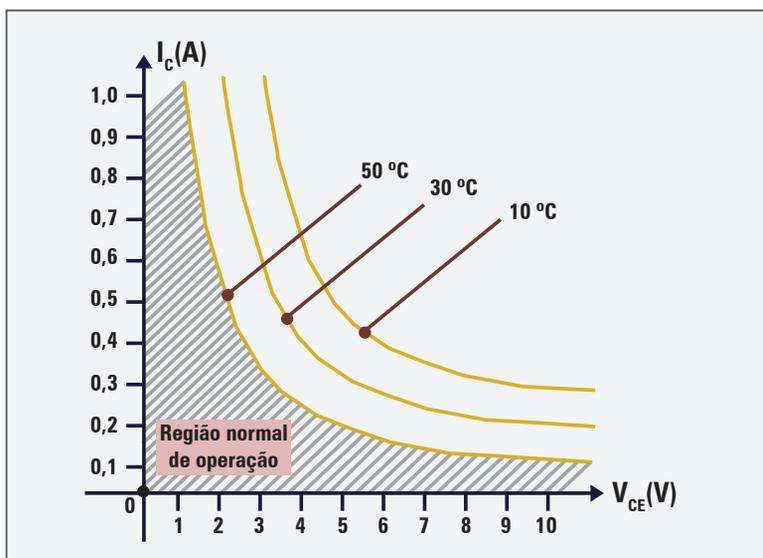
Fonte: Elaboração dos autores.

GRÁFICO 18 - Traçando curva de máxima dissipação de potência



A curva apresentada no Gráfico 19 foi traçada para a temperatura de trabalho de 25°. Para temperaturas maiores de funcionamento, a região de operação diminui.

GRÁFICO 19 - Efeito da temperatura sobre a curva de máxima dissipação de potência



Para melhorar a dissipação de temperatura e aumentar a região de operação, são usados dissipadores de calor juntos com os transistores. Outro recurso é manter o equipamento refrigerado, dessa forma, os componentes, transistores, diodos, entre outros não trabalham fora de suas faixas de temperatura de operação.

2.2.5 Amplificadores transistorizados



Quadripolos: representação gráfica para um circuito eletrônico que possui entrada e saída de sinal.

Os amplificadores são considerados **quadripolos** (Figura 107) ativos (dois terminais de entrada e dois terminais de saída). Significa que fornecem potência em seus terminais de saída, conforme um sinal aplicado em seus terminais de entrada. Isso desde que esses sinais estejam dentro da faixa de frequência para o qual o amplificador foi projetado e que o nível do sinal aplicado não seja demasiadamente grande a ponto de sobrecarregar o amplificador.



Figura 107 - Quadripolo amplificador

Nos equipamentos de rádio, os amplificadores são utilizados em osciladores, misturadores, amplificadores de radiofrequência de baixo e alto nível. São os amplificadores que geram a potência de (RF) dos transmissores de rádio, responsável pela intensidade dos sinais irradiados pela antena transmissora, e compensam, na recepção, a atenuação imposta pelo meio de transmissão às ondas eletromagnéticas captadas pela antena receptora.

Os princípios básicos de amplificação de sinais pelos transistores são aplicados em circuitos amplificadores transistorizados. A importância deles é avaliada pela grande variedade de emprego e de técnicas. Os amplificadores são classificados em concordância com as denominações apresentadas a seguir.

- a) Quanto à frequência:
 - amplificadores de áudiofrequência (AF);
 - amplificadores de frequência intermediária (FI);
 - amplificadores de radiofrequência (RF).
- b) Quanto à polarização:
 - classe (A);
 - classe (B);
 - classe (AB);
 - classe (C).
- c) Quanto ao sistema de acoplamento:
 - acoplamento RC;
 - acoplamento a transformador.
- d) Quanto ao emprego:
 - amplificadores de potência ou de corrente;
 - amplificadores de tensão.

2.2.5.1 Classificação dos amplificadores quanto à frequência

Os amplificadores são classificados de acordo com a faixa de frequência na qual funcionam. Dependendo da faixa que operam, são conhecidos como amplificadores de áudiofrequência (AF), amplificadores de frequência intermediária (FI) ou amplificadores de radiofrequência (RF).

As frequências de operação determinam o tipo de amplificador e a sua aplicação. Os amplificadores de áudiofrequência (AF) operam na faixa de frequência que vai de 20 Hz a 20 kHz. Essa faixa é sensível ao ouvido humano e, por essa razão, é chamada de faixa de áudiofrequência.

Os amplificadores de radiofrequência (RF) são usados em transmissores de rádio, como os transmissores de FM ou AM, pois precisam gerar sinais para a criação de uma onda eletromagnética de intensidade suficiente para superar as distâncias que necessitam propagar e, assim, serem detectadas pelo receptor e recuperadas para receber a informação transmitida. Para conseguir esse objetivo, os transmissores têm de dispor de amplificadores de potência adequados ao tipo de modulação a que se destinam.

Os amplificadores de frequência intermediária (FI) são usados em receptores super-heteródinos. Normalmente, esses amplificadores são sintonizáveis, assim amplificam apenas a frequência de FI e possuem uma pequena banda de passagem (BW) de amplificação.

Independente se o amplificador é para AF, RF ou FI, é importante frisar que o transistor é específico para cada aplicação. No catálogo de transistores das empresas fabricantes, existem



Frequência intermediária (FI): frequência de sinal usada internamente ao circuito eletrônico resultante da mistura de outros sinais de frequências diferentes.

(BW): originada do termo inglês *bandwidth* e também conhecida como largura de banda, representa a capacidade de transmissão de um dispositivo em termos de frequência.

diversos tipos de transistores que possuem características próprias para cada faixa de frequência na qual se pode trabalhar. Por exemplo, um amplificador de FI para uma frequência de 455 KHz precisa usar um transistor que consiga amplificar esse sinal sem distorcer, no catálogo de transistores dos fabricantes encontra-se o componente adequado para essa situação.

2.2.5.2 Classificação dos amplificadores quanto à polarização

Os amplificadores são classificados conforme a sua polarização. Ao ser aplicado um sinal alternado (CA) na entrada do amplificador, é gerado um sinal na sua saída e, de acordo com que variação de saída acompanha a entrada, classificam-se os transistores em quatro classes de funcionamento: (A), (B), (AB) e (C).

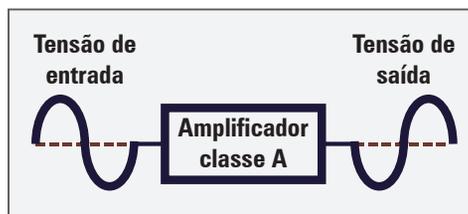


Figura 108.A - Sinal de entrada e saída do amplificador na classe (A)

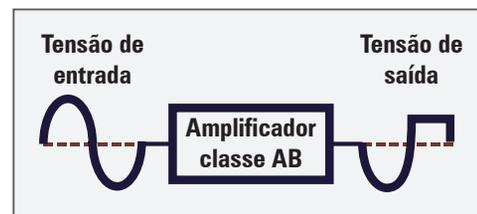


Figura 108.C - Sinal de entrada e saída do amplificador na classe (AB)

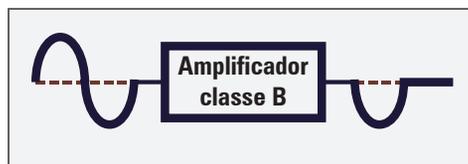


Figura 108.B - Sinal de entrada e saída do amplificador na classe (B)

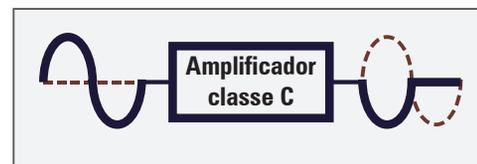


Figura 108.D - Sinal de entrada e saída do amplificador na classe (C)

Ao visualizar as Figuras 108.A, B, C e D, vê-se que a saída da classe (A) acompanha toda a variação do sinal de entrada e, na classe (B), o sinal na saída acompanha apenas metade do ciclo de entrada. Na classe (AB), o sinal na saída acompanha um pouco mais da metade da entrada; por sua vez, a classe (C) acompanha apenas uma pequena porção da variação de entrada.

2.2.5.3 Classificação dos amplificadores quanto ao sistema de acoplamento

Em qualquer equipamento eletrônico existe sempre a necessidade de transferência de sinais entre dois pontos, por exemplo, entre um gerador e a entrada do circuito, entre dois circuitos dispostos em cascata ou entre a saída de um circuito e a carga. Como o acoplamento é realizado, normalmente, entre pontos contendo potenciais elétricos diferentes, torna-se necessária a utilização de capacitores para isolar a corrente contínua entre os circuitos, preservando a sua polarização. Desse modo, o acoplamento é encarado como um filtro passa-alta que possui uma frequência de corte bem abaixo da menor frequência processada pelo circuito, ou seja, todo sinal com frequência superior à de corte são acoplados à fase seguinte.

Outra função essencial é o desacoplamento, que consiste na conexão de capacitores entre determinados pontos do circuito e a massa, com o fim de oferecer um caminho de baixa impedância para a corrente alternada, ao mesmo tempo em que é mantido inalterado o potencial contínuo ali existente.

Os principais tipos de acoplamento e desacoplamento utilizados em circuitos amplificadores são:

- por redes resistiva-capacitiva (RC);
- por transformador.

Na Figura 109, está exemplificado um circuito utilizando acoplamento e desacoplamento por transformador. Cada tipo de acoplamento/desacoplamento possui características próprias e seu uso é de acordo com a necessidade do projeto do circuito.

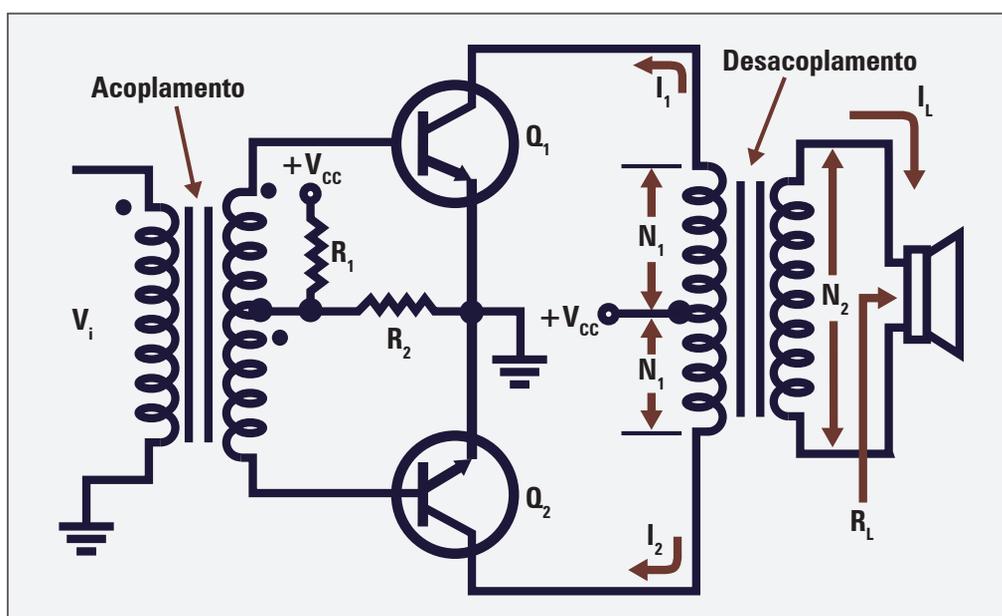


Figura 109 - Acoplamento e desacoplamento feito por meio de transformador

2.2.5.4 Classificação dos amplificadores quanto ao uso ou emprego

Os amplificadores são classificados quanto a seu uso em amplificadores de tensão, de potência ou de corrente. Os amplificadores de tensão são projetados para que os sinais de amplitude relativamente pequena, aplicada na entrada deste amplificador, possam produzir um sinal amplificado de maior tensão sobre a carga no circuito de saída. O ganho de um amplificador de tensão é a relação da tensão (CA) de saída pela entrada.

$$A_v = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

Na equação anterior, (V_{out}) é a tensão alternada (C_A) de saída e (V_{in}) a de entrada. Este tipo de amplificador é usado em receptor de rádio, a fim de aumentar o sinal de **RF** que chega ou **FI** ao nível apropriado para fazer funcionar o receptor. O amplificador de tensão também é empregado em inúmeras outras aplicações nos equipamentos eletrônicos. Sempre que houver a necessidade de aumentar a tensão de entrada para, em seguida, aplicá-la a outro dispositivo, o amplificador de tensão é o mais apropriado.

Os amplificadores de potência ou de corrente são projetados para entregar uma quantidade de potência à carga presente na saída. Como a potência é o produto da tensão pela corrente, um amplificador de potência tem de desenvolver sobre sua carga tensão suficiente para a circulação de uma grande corrente de saída. O ganho de potência é a relação entre a potência de saída pela entrada, conforme equacionado abaixo, em que (P_{out}) é a potência de saída e (P_{in}) a de entrada.

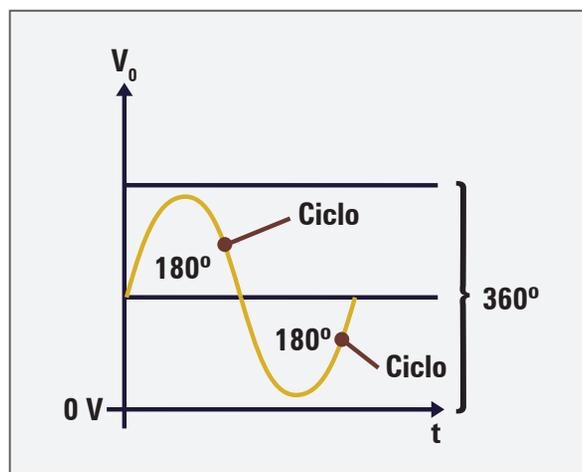
$$A_p = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$$

Os amplificadores de potência são empregados comumente como etapa de saída nos receptores. São usados também em transmissores de (**RF**), para aumentar a potência da portadora modulada até um nível desejado de transmissão, antes do sinal alimentar a antena.

2.2.6 Classes de operação dos amplificadores transistorizados

A polarização usada para o transistor determina sua classe de operação. Os amplificadores classe (**A**) operam (amplificam) durante as duas alternâncias (ciclos) do sinal de entrada (360°). Os de classe (**B**) operam durante 180° do sinal de entrada (meio ciclo), enquanto os de classe (**C**) operam por menos de 180° do sinal de entrada, menos de um ciclo de variação de entrada (Gráfico 20). Os amplificadores classe (**AB**) amplificam entre 180° e 360° do sinal de entrada.

GRÁFICO 20 - Ciclos do sinal aplicados à entrada dos amplificadores

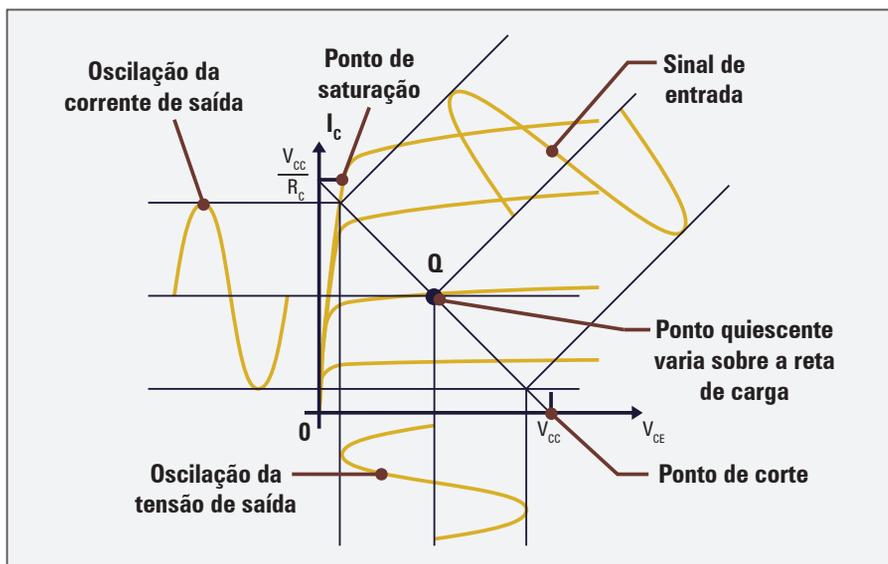


2.2.6.1 Classe (A)

O amplificador trabalhando na classe (A) é polarizado de forma que seu ponto de operação fique localizado no centro da região de funcionamento linear, compreendida entre os pontos de corte e saturação, assim, sua linearidade é boa e o amplificador gera menor distorção do que os polarizados em outras classes de operação (Gráfico 21). Por outro lado, o consumo de corrente é muito elevado, sendo o maior deles, mantendo-se constante mesmo na ausência de sinal amplificado. Seu uso é recomendado nos amplificadores de baixo nível que compõem os amplificadores sintonizados, pré-amplificadores, nos primeiros estágios dos transmissores de rádio, e em todas as aplicações em que o nível de potência não exceda alguns watts.

O primeiro passo para o estabelecimento da classe de operação é construir a reta de carga. Em seguida, seleciona-se o ponto quiescente de modo a permitir que um sinal de entrada não ultrapasse os pontos de corte e saturação do transistor, caso contrário, há distorção do sinal na saída do amplificador.

GRÁFICO 21 - Variações do sinal no amplificador classe (A)



O Gráfico 21 mostra, claramente, que, para o amplificador funcionar em classe (A), é necessário polarizar o circuito de modo a que o ponto (Q) fique no centro da reta de carga. Com isso, o sinal varia linearmente o ponto (Q) para um maior ou menor valor até os limites de operação do transistor, sendo eles o ponto de corte e de saturação.

2.2.6.2 Classe (B)

Os amplificadores de classe (B) operam na região ativa das curvas, durante um dos ciclos do sinal de entrada e permanecem em corte durante a outra. Desde que somente a metade do sinal de entrada é amplificada, os amplificadores classe (B) (Figura 110) são normalmente empregados em amplificadores tipo *push-pull*, que são amplificadores de potência formados por dois transistores que conduzem alternadamente, mas que produzem na saída um sinal replicado do sinal de entrada.



Push-pull: denominação para circuitos eletrônicos amplificadores em que os ciclos do sinal são amplificados separadamente e, depois, compostos novamente em um sinal único.

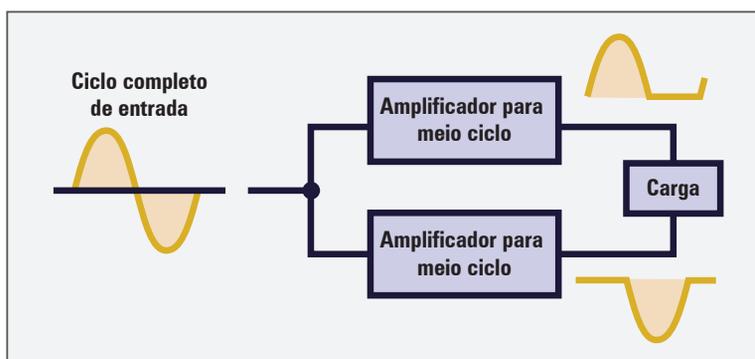
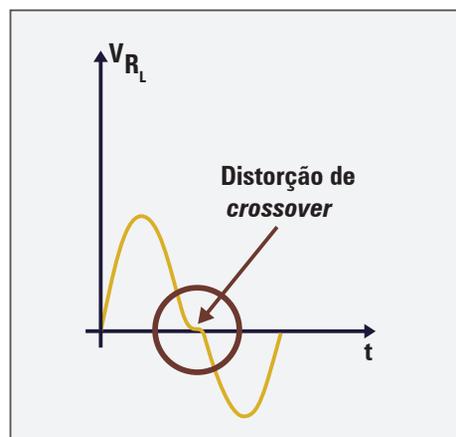


Figura 110 - Representação de um amplificador classe (B)

Na classe (B), o transistor fica na condição de corte até receber o sinal para conduzir. Quando recebe o sinal, ele deve fornecer a polarização inicial de (V_{BE}) para o transistor conduzir. Até a entrada, oferecer o valor necessário para o transistor conduzir a saída não acompanha a entrada, desse modo, surge uma distorção no sinal de saída chamada de *crossover* (Gráfico 22). Para melhorar essa distorção, polariza-se o transistor na classe (AB), assim o transistor encontra-se no limiar de condução por meio da polarização, quando o sinal for aplicado à entrada não será necessário fornecer a (V_{BE}) de condução inicial.

GRÁFICO 22 - Distorção de *crossover*



2.2.6.3 Classe (AB)

Quando o transistor opera na classe (B), um ciclo completo do sinal de entrada é desenvolvido na carga, conforme descrito anteriormente. O problema é a distorção por *crossover* causada na carga. Para diminuir esse problema, polariza-se o transistor para trabalhar na classe (AB), pois, nessa situação, ele conduz um pouco mais de 180° do sinal.

Para conseguir o efeito necessário para a polarização da classe (AB), é utilizada uma pequena polarização direta de entrada da base, assim o transistor fica no ponto de condução aguardando apenas a entrada do sinal para desenvolvê-lo na saída sobre a carga.

Na Figura 111.A, tem-se um amplificador *push-pull* polarizado para trabalhar na classe (B). Na Figura 111.B, apresenta-se um amplificador *push-pull* polarizado para trabalhar na configuração classe (AB), os resistores (R_1) e (R_2) provêm a polarização mínima para manter os transistores no ponto de condução. A modificação entre os circuitos proporciona a mudança de funcionamento, diminuindo a distorção de *crossover*.

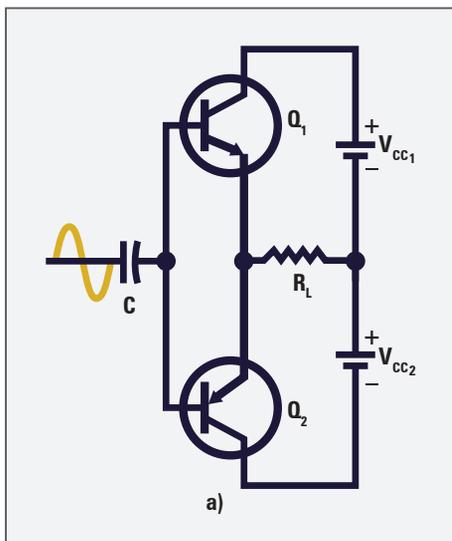


Figura 111.A - Amplificador *push-pull* classe (B)

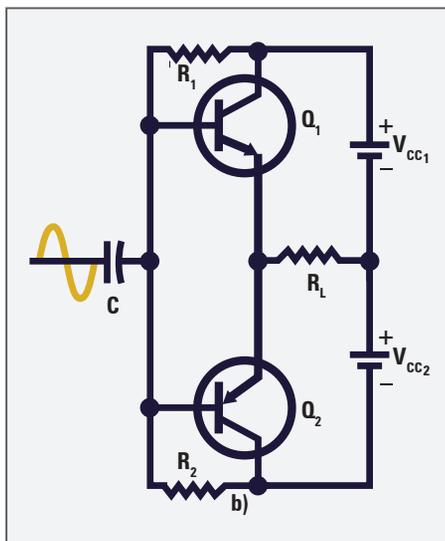


Figura 111.B - Amplificador *push-pull* classe (AB)

2.2.6.4 Classe (C)

O amplificador trabalhando em classe (C) opera em menos de 180° do ciclo do sinal de entrada. Essa classe é, normalmente, utilizada em circuitos sintonizados, por exemplo, osciladores eletrônicos. Na Figura 112, está exemplificado um amplificador em classe (C).

Embora conduza menos de 180° do sinal de entrada, para a frequência de sintonia do circuito tanque (L) e (C) a saída é um ciclo total de 360° . É importante frisar que apenas para a situação da frequência de sintonia do circuito da Figura 112 é possível retirar um sinal de ciclo completo. Para todas as outras situações, o sinal de saída é menor de 180° do sinal de entrada.

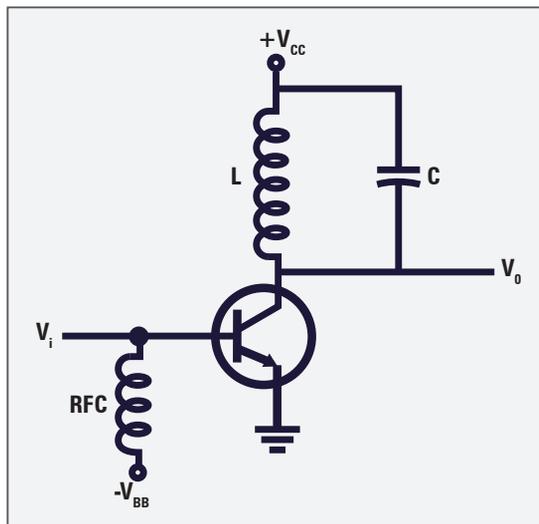


Figura 112 - Amplificador classe (C)

Sistemas de acoplamento entre amplificadores

Um único estágio amplificador não é suficiente nas aplicações em aparelhos como receptores, transmissores e outros equipamentos eletrônicos. Um ganho mais elevado é obtido pela conexão de vários estágios amplificadores, por isso a necessidade dos sistemas de acoplamento.

Um sistema de acoplamento tem de prover a transferência de sinal de um estágio para outro com um bom casamento de impedância, evitando perda de sinal entre os estágios.

Para haver a máxima transferência de sinal, o estágio de entrada precisa ter a impedância equilibrada com a da fonte de sinal e o estágio final deve ter a impedância equilibrada com a da carga. Do mesmo modo, a impedância de saída de um estágio precisa estar casada com a impedância de entrada do estágio seguinte. Além do equilíbrio de impedância, é de vital importância isolar a passagem de corrente contínua de uma etapa para outra.

Os tipos de acoplamento mais usados são os seguintes:

- a) redes RC;
- b) transformadores;
- c) sintonizado.

a) Acoplamento por rede (RC)

Na Figura 113, está representado um amplificador de dois estágios acoplados por uma rede (RC). O capacitor (C_1) de acoplamento tem dupla função: primeiro, isolar a tensão de CC presente no coletor de (Q_1) do primeiro estágio, para que não apareça na base do transistor (Q_2) do estágio seguinte; segundo, transferir o sinal de um estágio para o outro.

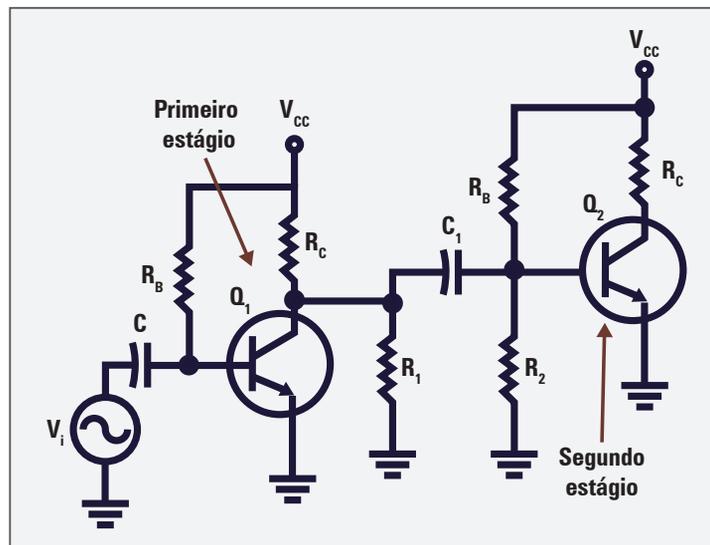


Figura 113 - Estágios amplificadores acoplados por rede (RC)

É importante que o capacitor de acoplamento tenha uma reatância reduzida para as tensões do sinal e, portanto, seu valor de capacitância precisa ser relativamente alto. Os valores típicos de capacitância vão de 1 a 30 μF . É necessário que o valor do capacitor seja alto em virtude da baixa impedância de entrada do estágio seguinte.

O sinal que sai do primeiro estágio desenvolve-se no resistor (R_1). O capacitor de acoplamento (C_1) e o resistor (R_2) (resistor de base) constituem a rede de acoplamento (R_c) entre os dois estágios. As frequências muito baixas são atenuadas pelo capacitor de acoplamento, porque a sua (XC) torna-se alta com a diminuição da frequência.

A resposta em altas frequências para o transistor está limitada pelo efeito *shunt* da capacitância emissor-coletor do primeiro estágio e da capacitância base-emissor do segundo estágio. À medida que aumenta a frequência do sinal aplicado ao transistor, suas junções base-emissor-coletor começam a apresentar um valor capacitivo, sendo esse valor tanto mais alto quanto a frequência aplicada. Porém, essa capacitância apresenta-se em paralelo com as junções, causando um desvio do sinal pelas capacitâncias, diminuindo a eficiência do transistor. Essa capacitância parasita surgida com o aumento da frequência é chamada de *shunt*.

O acoplamento (R_c) é bastante usado em circuitos transistorizados, por oferecer uma boa resposta de frequência, sendo de simples instalação, de peso e dimensões reduzidas e de preço relativamente baixo.

Embora ele ofereça uma boa resposta de frequência, não é o tipo de maior eficiência, em face das dificuldades em casar as impedâncias entre os estágios. Esse problema é sanado se a resistência de carga de coletor for mantida com um valor prático o mais baixo possível e aumentando-se a impedância de entrada do estágio seguinte, com um valor conveniente de resistência de emissor.

b) Acoplamento entre estágios amplificadores por transformador

O acoplamento entre estágios amplificadores por meio de transformadores é demonstrado na Figura 114. O enrolamento primário do transformador (T_1) é a impedância de carga de coletor do primeiro estágio formado pelo transistor (Q_1). O enrolamento secundário de (T_1) desenvolve o sinal de CA, para a base do transistor (Q_2) do segundo estágio e também age como caminho de retorno de CC da base.

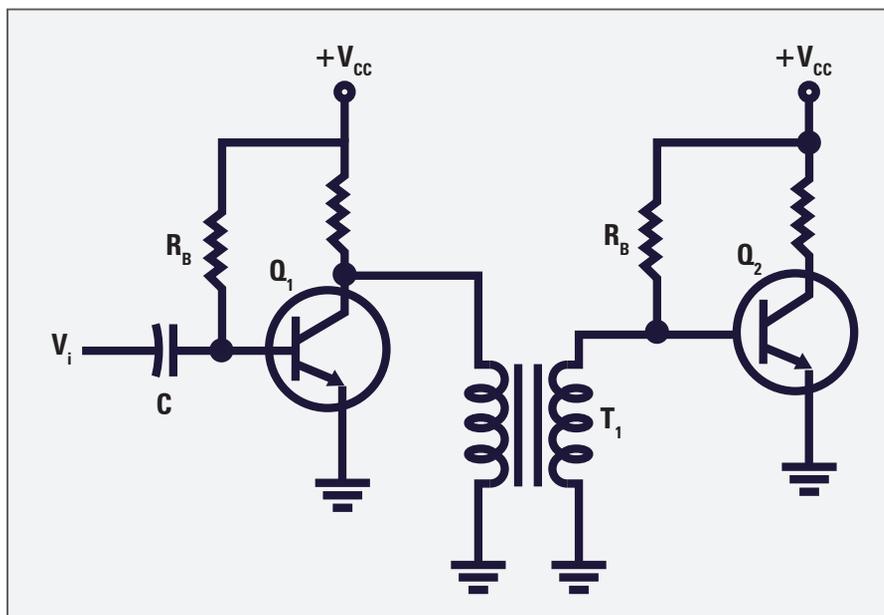


Figura 114 - Estágios amplificadores acoplados por transformador

O transformador (T_1) acopla o sinal da saída do coletor de (Q_1) para a base de (Q_2) e isola perfeitamente a corrente contínua de polarização de um estágio para o outro, além de fazer um bom casamento de impedância entre os estágios.

Os transformadores facilitam o equilíbrio entre a carga de saída do transistor (Q_1) e a entrada do transistor (Q_2) seguinte, fato necessário para se obter o máximo de ganho de potência.

A resposta de frequência de um estágio acoplado por intermédio de transformador não é tão boa quanto à do estágio acoplado por rede (R_C), devido a características do transformador. Além da resposta de frequência ser pobre, os transformadores são relativamente mais caros, mais pesados e ocupam maior área que os resistores e capacitores empregados no acoplamento (R_C).

c) Acoplamento entre estágios amplificadores sintonizados

O acoplamento por tanque sintonizado é empregado em estágios de (RF), e nunca em áudio. O circuito da Figura 115 mostra um estágio acoplado por tanque sintonizado. Os circuitos sintonizados são empregados em estágios de (RF) por oferecem uma alta seletividade ao sinal a ser amplificado discriminando os demais.

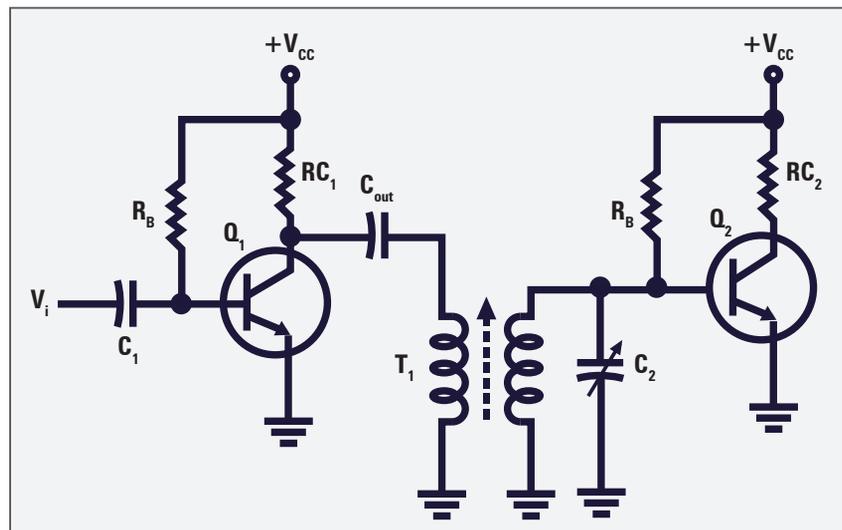


Figura 115 - Estágios amplificadores acoplados por sintonia

Na Figura 115, o transformador (T_1) possui núcleo de ferrite variável que juntamente com o capacitor variável (C_2) ficam sintonizados para uma frequência específica. Por exemplo, sintonizando (T_1) e (C_2) para a frequência de 10,9 MHz, somente esta é amplificada e passa de um estágio para o outro. As demais frequências que possam chegar ao transformador não passam para o estágio seguinte e, conseqüentemente, não são amplificadas.

2.2.7 Amplificadores de áudio

Os circuitos amplificadores de áudio são projetados especificamente para ampliar sinais da faixa de audiofrequência, sinais esses compreendidos entre 20 Hz e 20 KHz; para isso, o transistor precisa ser adequado para sinais de áudio e o sistema de acoplamento bem calculado para oferecer a melhor resposta de frequência para essa faixa.

É interessante lembrar que a finalidade de um amplificador é a de aumentar a tensão, a corrente ou o nível de potência de um sinal a um valor necessário, a fim de operar um dispositivo de saída.

Os amplificadores de tensão são estágios de amplificação projetados para produzir um grande valor de tensão por intermédio da carga do circuito de coletor. Os amplificadores de potência são estágios amplificadores construídos para fornecer grandes quantidades de potência para a carga no circuito de coletor. No amplificador de potência, é fundamental uma grande corrente no circuito de coletor.

Os amplificadores de potência e de tensão são reconhecidos pelas características dos componentes do circuito de coletor. Assim, um estágio amplificador construído para produzir um grande sinal de tensão por meio de uma alta (R_L) é um amplificador de tensão. Por outro lado, um amplificador projetado para desenvolver uma alta corrente de coletor por meio de uma (R_L) de baixo valor é um amplificador de potência.

Os pré-amplificadores de áudio são etapas de baixo nível que se destinam à amplificação de sinais originários de dispositivos, tais como microfones, detectores, cápsulas magnéticas, ou seja, dispositivos que fornecem um sinal muito débil de saída.

O circuito de entrada de um amplificador transistorizado deve ser alimentado com a corrente de saída de um pré-amplificador. Nesse caso, cada transistor é considerado como um amplificador de corrente ou potência, operando a um nível de corrente ou de potência mais elevado que o nível do estágio anterior e menos elevado que o do estágio seguinte.

2.2.7.1 Amplificador de áudio básico

O circuito da Figura 116 mostra um estágio amplificador básico de áudio. A polarização para esse amplificador é estabelecida pela corrente de base-emissor. Essa corrente desenvolve uma tensão que polariza diretamente o circuito de entrada.

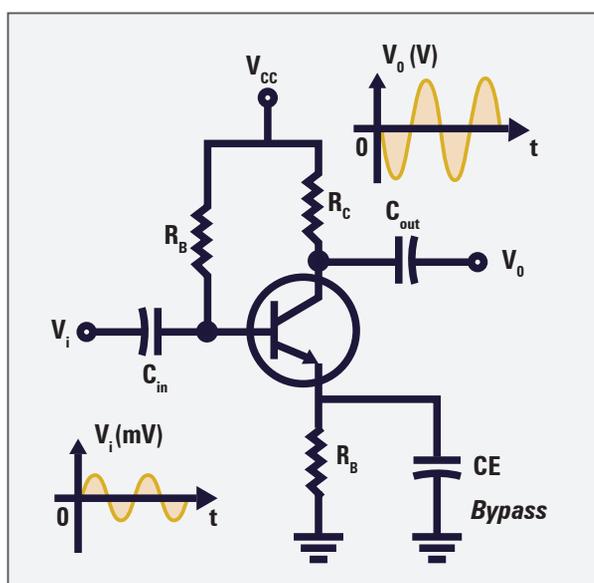


Figura 116 - Amplificador de áudio básico

No circuito da Figura 116, o resistor de base (R_B) limita a corrente de polarização, estabelecendo o ponto quiescente do circuito. Durante o ciclo positivo do sinal de entrada, a polarização direta aumenta, elevando a corrente de coletor, por meio de (R_C), e ampliando a queda de tensão sobre ele. Com o acréscimo de (VR_C), a tensão de coletor para terra diminui e a tensão de saída acompanha essa variação. Como demonstrado na Figura 116, um aumento positivo do sinal de entrada causa uma elevação negativa do sinal de saída, ocasionando inversão de fase, característica básica dessa configuração de amplificador. Para a variação do ciclo negativo de entrada, o raciocínio é o mesmo, bastando inverter as variações.

O capacitor (C_{IN}) acopla o sinal de entrada e o (C_{OUT}) desacopla para a saída. O resistor (R_E) é o de estabilização do emissor e está ligado em paralelo com o capacitor de desvio (CE), também conhecido como *bypass*.

Na Figura 116, é possível observar que a amplitude do sinal de entrada é da ordem de milivolts (mV), enquanto a saída é da ordem de volts (V), isso ocorre devido à amplificação do estágio.

2.2.7.2 Amplificador divisor de fase

A Figura 117 mostra um divisor de fase de um estágio usando um transistor do tipo NPN. A corrente de saída do transistor (Q_1) flui através de (R_3) e de (R_2), que são as cargas de coletor e emissor, respectivamente, possuindo valores iguais. O resistor (R_1) é o de polarização de base.

Quando o sinal de entrada auxilia a polarização direta, a base do transistor (Q_1) se torna mais positiva, logo a corrente de saída (I_C) aumenta. Esse crescimento na corrente de saída ocasiona a diminuição da tensão do coletor, pois eleva a tensão sobre (R_3) e a do emissor aumenta, em virtude da elevação da (I_E) passando por (R_2).

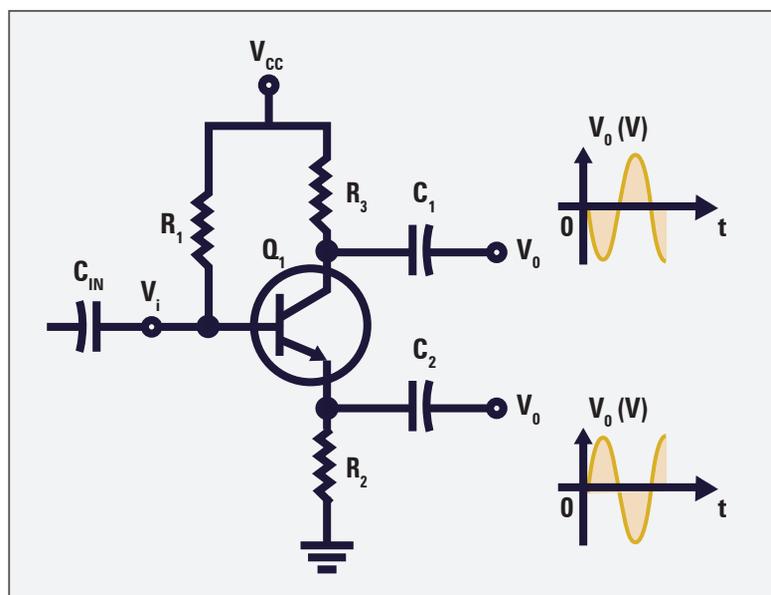


Figura 117 - Amplificador divisor de fase

Quando o sinal de entrada polariza inversamente a base de (Q_1), a corrente de saída (I_c) diminui causando uma inversão de polaridade nas tensões através de (R_3) e de (R_2). Isso produz dois sinais de saída defasados de 180° . O sinal desenvolvido em (R_3) é acoplado ao circuito de entrada do estágio seguinte, através de (C_1). O sinal desenvolvido em (R_2) é acoplado ao circuito de entrada do estágio seguinte, por meio de (C_2). Esses dois capacitores bloqueiam a (CC). Colocando no circuito os valores de (R_2) e (R_3) iguais, tem-se os sinais de saída em oposição de fase, porém com amplitudes iguais.

Uma desvantagem do divisor de fase é o fato de não amplificar o sinal, ele apenas divide o sinal de entrada para duas saídas com fases opostas, 180° defasados.

2.2.7.3 Amplificador de potência de áudio

Em todos os tipos de aparelhos transistorizados, sejam eles receptores, transmissores ou outro, o fator determinante do consumo é o estágio de saída. Logo, o consumo é decisivo para o dimensionamento da fonte de alimentação.

Em um rádio AM típico, por exemplo, a impedância final da carga é de $3,2 \Omega$, referente a um alto falante pequeno. O estágio final de amplificação fornece uma corrente suficiente para acionar essa impedância, assim, consome boa potência da alimentação do circuito.

No estágio de saída, a influência da temperatura é mais acentuada, devido à dissipação interna provocada pelas condições de trabalho realizado em níveis de potência maiores do que os dos demais estágios. Para valores de potência elevados, é imprescindível que se mantenha os transistores com dissipadores de calor para preservar o ponto quiescente o mais estável possível (Figura 118).

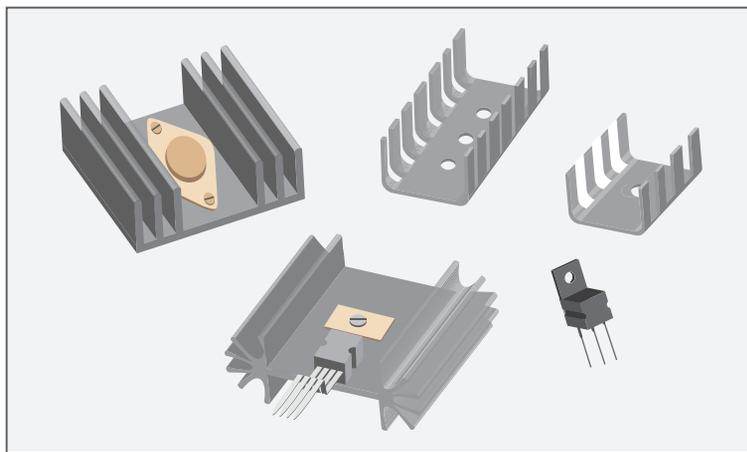


Figura 118 - Dissipadores de potência para transistores

Os transistores de potência, ou grande sinal, geram mais de 0,5 watt. Ressalta-se que os transistores de pequeno sinal, menos de 0,5 watt, são tipicamente aplicados na entrada dos sistemas, em que a potência do sinal é baixa, e os transistores de grande sinal são empregados na saída dos sistemas, em que a potência dos sinais é alta.



Fase: indica a posição de um sinal variável no tempo, sendo o seu valor dado em ângulo e/ou polaridade.

Os amplificadores de potência operando em classe (A) de saída simples são usados em equipamentos nos quais não são necessárias grandes potências da saída e que uma alta eficiência de potência não é um fator dominante. A Figura 118 mostra um circuito de uma etapa amplificadora de potência operando em classe (A).

Para a máxima eficiência, calcula-se uma carga de tal maneira a aproveitar o máximo da tensão e da corrente do coletor.

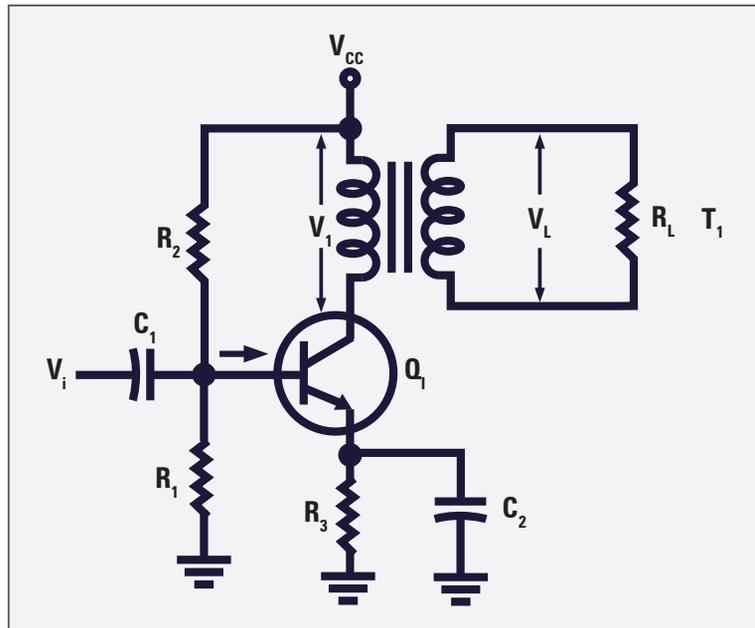


Figura 119 - Amplificador de potência em classe (A)

No circuito da Figura 119 sem sinal aplicado, a potência retirada da fonte será igual ao produto entre (V_{CE}) e (I_C). Essa potência será consumida por (Q_1) e, logicamente, não ultrapassará o valor estático máximo indicado pelo fabricante. Ao se aplicar um sinal ao transistor, é obtida potência na carga, mas a potência tomada da fonte não se altera, porque a corrente média ou (CC) exigida pelo coletor permanece constante. Então, conclui-se que a potência dissipada pelo transistor diminui com a aplicação do sinal. Se o transistor não se aquecer excessivamente, enquanto não lhe for aplicado nenhum sinal, não há possibilidade de queimar por aquecimento.

Quando se emprega um sinal à entrada do circuito, durante o ciclo positivo tem-se um aumento na polarização direta base-emissor e, conseqüentemente, uma elevação da queda de tensão no primário de (T_1) e uma diminuição na tensão de coletor de (Q_1). Quando o ciclo de entrada for negativo, a polarização direta diminui, reduzindo a corrente de coletor e a tensão no primário do transformador (T_1), e aumentando a tensão no coletor de (Q_1). Essas variações são acopladas à carga pelo transformador de saída.

No circuito da Figura 119, os resistores (R_1) e (R_2) determinam a polarização de (Q_1). O resistor (R_3) é o de estabilização de polarização que está ligado em paralelo com (C_2), cuja finalidade é manter constante a (V_E) de (Q_1). O capacitor (C_1) acopla o sinal à base de (Q_1) e o transformador (T_1) provoca a transferência do sinal para a carga, casando a impedância da saída do transistor com a

bobina móvel do alto falante. Para que a operação em classe (A) não produza distorção, o ponto quiescente está localizado na região média da reta de carga.

Na operação em classe (A), é obtida uma forma de onda de saída com a máxima fidelidade, ou seja, uma reprodução exata da forma de onda de entrada, obrigando o transistor a conduzir durante todo o ciclo do sinal de entrada para que não haja distorção. Para se obter uma saída livre de distorção, é necessário que a corrente e a tensão de coletor variem em uma faixa linear da curva característica do transistor. A configuração emissor comum é quase sempre escolhida para os estágios de potência por apresentar um ganho de potência mais elevado.

2.2.7.4 Amplificador de potência *push-pull*

Um amplificador *push-pull* é um circuito composto de dois transistores, (NPN) ou (PNP), e um transformador. Para esse circuito oferecer uma saída sem distorção, precisa receber dois sinais iguais e defasados de 180°, provenientes de um divisor ou inversor de fase. O amplificador em *push-pull* fornece uma potência que é o dobro da provida por um amplificador simples.

Na Figura 120, tem-se o desenho de um amplificador tipo *push-pull*. Esse circuito está polarizado na classe (B), pois não possui resistores que forneçam polarizações iniciais para as bases de (Q_1) e (Q_2). Estando na classe (B), o sinal de entrada (V_i) tem de prover a polarização inicial de (V_{BE}) para que os transistores conduzam.

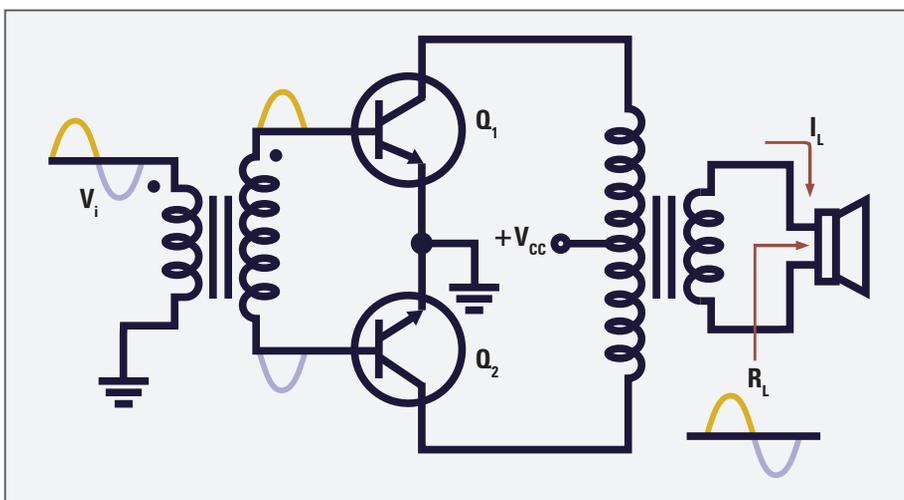


Figura 120 - Amplificador *push-pull* em classe (B)

O sinal, ao ser aplicado na entrada do circuito *push-pull* da Figura 119, é levado em oposição de fase para a base dos transistores (Q_1) e (Q_2). A oposição de fase é conseguida em função das características do transformador de entrada, nele o ciclo positivo de entrada apresenta-se positivo na base de (Q_1) e o mesmo ciclo aparece negativo na base de (Q_2).

O sinal após ser amplificado pelos transistores (Q_1) e (Q_2), cada qual amplificando um dos ciclos da entrada, passa pelo transformador de saída e, então, é acoplado ao alto falante para a reprodução do sinal amplificado.

O amplificador da Figura 121 trabalha em classe (B), dessa forma a distorção causada por *crossover* aparece na carga e, dependendo da sua intensidade, compromete a qualidade do circuito. Para diminuir esse problema, é polarizado o circuito *push-pull* na classe (AB), assim a distorção de *crossover* torna-se pequena (Figura 121).

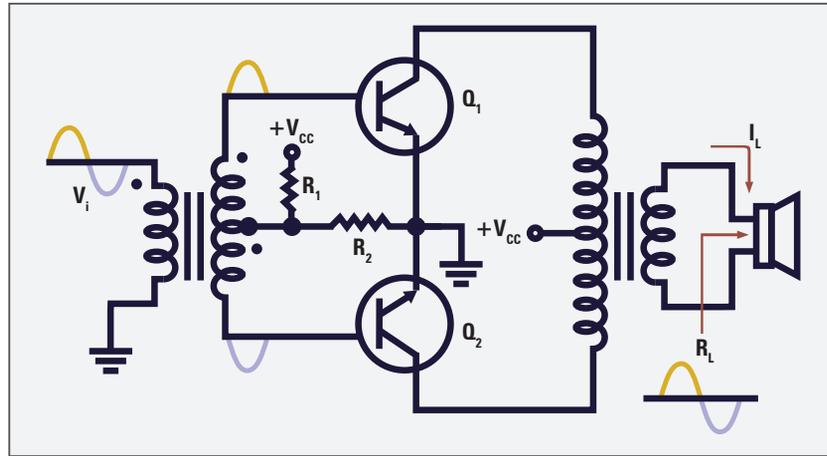


Figura 121 - Amplificador *push-pull* em classe (AB)

Os resistores (R_1) e (R_2) são os responsáveis por fornecer uma pequena polarização para a base dos transistores (Q_1) e (Q_2), assim o sinal de entrada não precisa polarizar a base através da (V_{BE}) para que eles conduzam, os resistores mantêm os transistores na iminência da condução, aguardando apenas o sinal entrar pelo transformador para ser amplificado.

2.2.7.5 Amplificador de potência em simetria complementar

O amplificador em *simetria* complementar é polarizado em classe (B) e sua característica principal é usar dois transistores complementares, um (NPN) e outro (PNP), com vistas a amplificar o sinal para a saída.

Alguns transistores bipolares são fabricados com características simétricas. Tais transistores são chamados de par complementar. Por exemplo, o AC 187 (NPN) é complementar do AC 188 (PNP). Se esses transistores forem conectados em um único estágio, conforme mostra a Figura 122, suas características simétricas são aproveitadas.

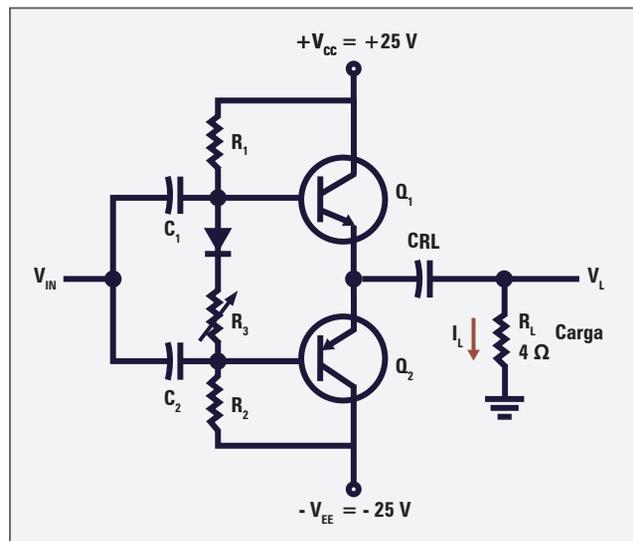


Figura 122 - Amplificador em simetria complementar



Simetria: Termo utilizado para descrever igualdade.

Nesse tipo de configuração, o sinal de entrada é aplicado diretamente às bases dos dois transistores, que são curto-circuitadas entre si. No ciclo positivo de (V_{IN}), tem-se apenas o transistor (Q_1) conduzindo. Nesse ciclo, a corrente (I_L) circula por (Q_1) e pela carga. No ciclo negativo, (Q_1) deixa de conduzir e (Q_2) passa a fazê-lo, desse modo, a corrente da carga agora passa por (Q_2) e (R_L).

Nota-se que, em ambos os ciclos, há corrente circulando pela carga e, como esta se encontra acoplada aos emissores de (Q_1) e (Q_2), é desnecessário o uso de um transformador para o casamento de impedância.

A principal vantagem do amplificador em simetria complementar é que ele não necessita do estágio inversor de fase e do transformador de saída. Embora o circuito da Figura 122 funcione com duas fontes de alimentação, é possível ter um circuito amplificador em simetria complementar com uma única fonte.

2.2.7.6 Amplificador de potência em configuração Darlington

Um tipo comum de conexão realizada entre transistores é a conexão Darlington, conforme apresentado na Figura 123. Nessa configuração, os transistores proporcionam um ganho de corrente (β) altíssimo, pois o (β) total é o produto dos betas (β) individuais de cada transistor da configuração.

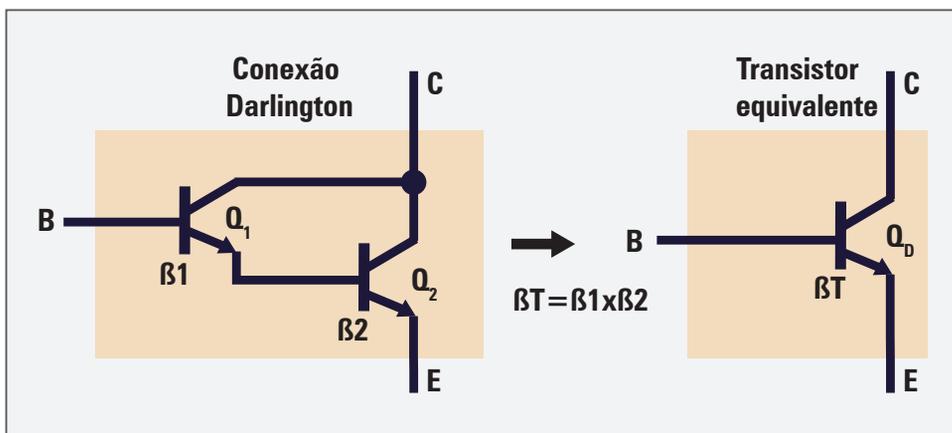


Figura 123 - Transistor Darlington

Como demonstrado na Figura 123, o ganho de corrente da ligação Darlington é o produto dos betas individuais dos transistores: ($\beta_T = \beta_1 \times \beta_2$). No mercado existem transistores Darlington que vêm encapsulados no mesmo componente, dessa forma, não é necessário ligar dois transistores separadamente para obter a configuração Darlington.

Com transistores do tipo Darlington, é possível desenvolver circuitos amplificadores, conforme a Figura 124, simples com alto ganho de corrente, característica muitas vezes necessária como composição de circuitos eletrônicos maiores e mais complexos.

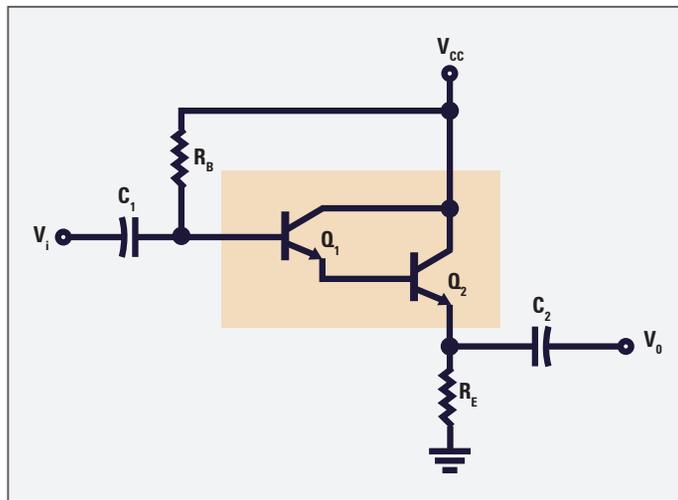


Figura 124 - Amplificador com transistores formando a conexão Darlington

2.2.8 Osciladores eletrônicos

Os osciladores eletrônicos são circuitos que geram um sinal alternado de saída que se repete continuamente no tempo. Esse sinal é gerado pelo próprio circuito oscilador, não sendo necessária uma fonte de sinal externa. Muitos circuitos eletrônicos oferecem na saída aquele tipo de sinal, no entanto, é preciso que um sinal alternado externo seja aplicado na entrada. Os osciladores não necessitam de um sinal de entrada, pois produzem o próprio sinal, por meio de seu funcionamento (Figuras 125.A e 125.B).

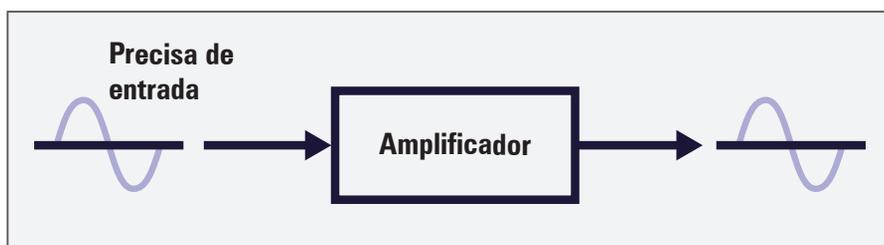


Figura 125.A - Amplificador eletrônico recebendo um sinal de entrada



Figura 125.B - Oscilador eletrônico sem recepção de sinal de entrada

Considerando todas as espécies de circuitos eletrônicos básicos e suas variações, constata-se a existência de dezenas de tipos de osciladores. Basicamente, dividem-se os osciladores em dois grandes grupos: de ondas senoidais e não senoidais. Como todos os osciladores, independente de qual grupo esteja classificado, possuem o mesmo princípio básico de funcionamento, é necessário entender apenas o funcionamento de um oscilador básico para ter condições de compreender todos os outros.

O princípio básico de funcionamento de um oscilador senoidal está fundamentado em um amplificador que possui uma porção do sinal apresentado na saída realimentando para a entrada. Assim, o circuito oscilador fornece sua própria entrada por meio do retorno a ela de uma porção do sinal de saída.

Para o oscilador manter sua oscilação, conforme o princípio descrito, é preciso satisfazer duas condições básicas: a porção do sinal que realimenta o circuito tem de realimentar positivamente, ou seja, deve estar em fase com o sinal que está na entrada; e o sinal usado para realimentar precisa ter potência suficiente para superar as perdas da entrada do circuito. A realimentação positiva também é chamada de realimentação regenerativa, pois mantém a oscilação inicial do circuito.

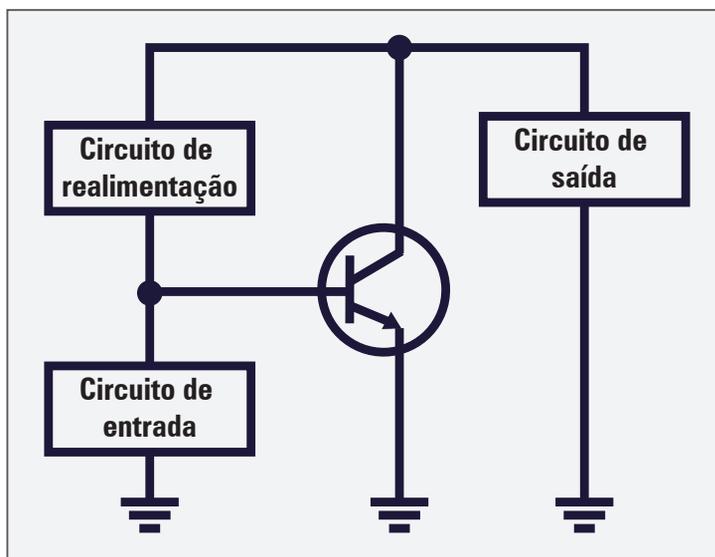


Figura 126 - Características de um oscilador básico

Os osciladores de onda senoidal têm de obedecer aos princípios listados anteriormente e possuir os circuitos de entrada, saída e de realimentação, conforme demonstrado na Figura 126. Uma característica importante que os osciladores senoidais (Figura 127) precisam ter é a estabilidade de frequência, ou seja, a frequência gerada não pode sofrer alteração. Quando o oscilador não possui frequência fixa de geração, é chamado de não estável.

Os osciladores podem ter mais de um componente amplificador, por exemplo, vários transistores, desde que todos formem um circuito que possa entrar em oscilação e mantenha essa oscilação fixa e constante.

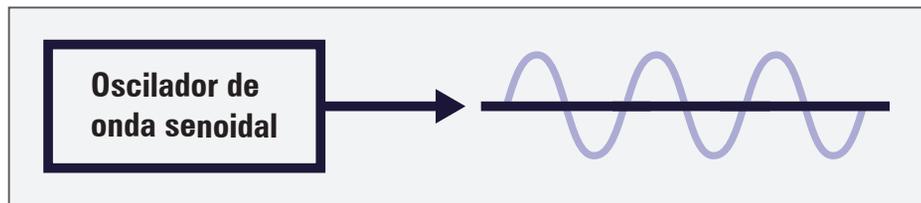


Figura 127 - Oscilador de onda senoidal

Os osciladores são classificados quanto à frequência que produzem: osciladores de audiofrequência (AF), radiofrequência (RF), micro-ondas, ou seja, a denominação depende da faixa de frequência que gera. No que concerne à sua função: osciladores locais (OL), osciladores de frequência de batimento, entre outras denominações dependendo da tarefa desempenhada no circuito.

2.2.8.1 Oscilador básico

O circuito da Figura 128 é um oscilador básico com transformador. Os osciladores precisam receber uma realimentação positiva e em fase na sua entrada para manterem-se oscilando. Na figura que segue, o componente responsável por isso é o transformador (T_1).

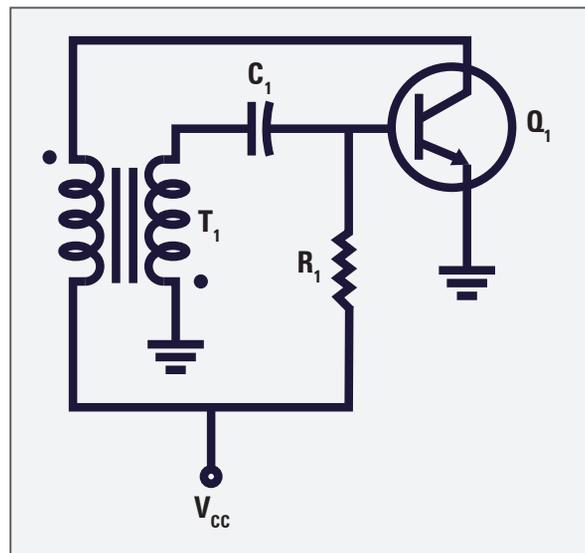


Figura 128 - Oscilador básico

Quando o circuito é ligado, uma pequena corrente de coletor flui, passando pelo primário do transformador. Essa variação é levada para a base pelo secundário de (T_1). No secundário, o sinal induzido está em fase com a polarização requerida para o transistor conduzir, ou seja, tensão positiva na sua base que aumenta a condução do transistor até a saturação. Chegando ao máximo, a corrente de coletor começa a diminuir em função da variação do campo indutivo do transformador, levando o transistor ao corte.

O ciclo de corte e saturação do transistor repete continuamente enquanto houver realimentação positiva do circuito. No transformador, os pontos pretos desenhados ao lado das bobinas representam a relação de fase dele, logo, quando o ponto do primário tem potencial positivo, o ponto do secundário também é positivo. É essa relação de fase que proporciona a correta realimentação do circuito.

O capacitor (C_1) do circuito acopla as variações transferidas do coletor para a base por meio de (T_1). A frequência de oscilação desse circuito depende dos valores de (C_1) e de (R_1), eles fixam uma frequência de ressonância em razão da constante de tempo $CT=R_1 \times C_1$, sendo assim fixada a frequência de oscilação do circuito. Outras frequências não podem ser geradas adequadamente, pois qualquer frequência diferente da ressonância do circuito não fornece uma realimentação positiva adequada e, desse modo, a oscilação não se mantém, gerando uma realimentação degenerativa.

2.2.8.2 Oscilador indutivo-capacitivo (LC)

O oscilador eletrônico possui problemas comuns no seu funcionamento, como a variação da frequência de oscilação e as distorções na onda por conta dos pontos de corte e saturação do transistor utilizado no circuito.

Um recurso empregado com vistas a sanar os problemas apontados é o uso do circuito sintonizado com indutor e capacitor, conhecido também como filtro tanque (LC). No circuito (LC), o indutor e o capacitor são ligados em paralelo, formando tanque, determinando uma frequência de oscilação para o circuito (Figura 129). É necessário, também, que o tanque (LC) esteja ligado à entrada de um circuito amplificador (transistor). O tanque (LC) possui grande **seletividade**, eliminando os desvios na frequência de oscilação do circuito, o amplificador precisa prover o ganho essencial ao sinal gerado e criar um sinal de realimentação para manter o circuito oscilando.



Seletividade: característica que determina a eficiência de separação entre duas frequências próximas por parte do circuito sintonizável do equipamento eletrônico.

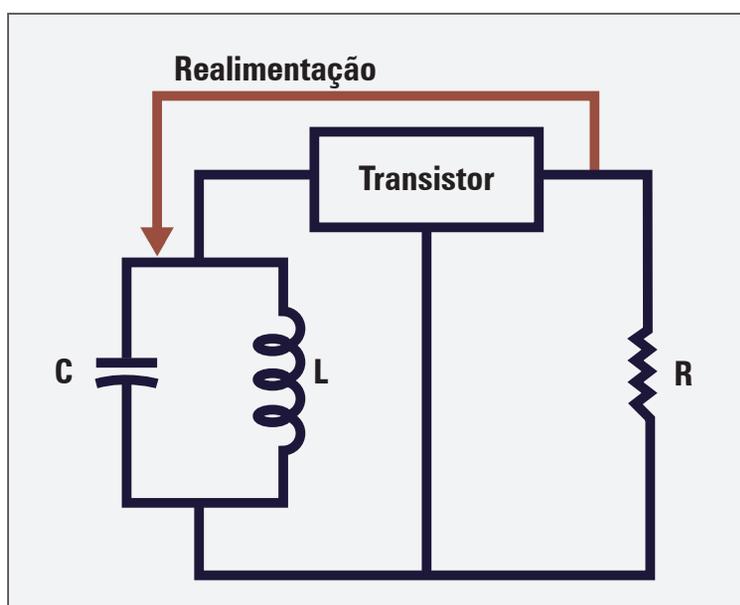


Figura 129 - Oscilador indutivo-capacitivo (LC)

Quando o circuito (**LC**) é ligado, a oscilação do tanque mantém-se em função do armazenamento de energia presente na bobina (indutor) e capacitor, pois trocam energia entre eles. O capacitor descarrega sua carga no indutor e vice-versa, porém, como no circuito real uma parte da energia trocada é perdida, a troca entre os componentes para, interrompendo a oscilação. Por isso, a realimentação é necessária, pois supre a energia perdida no tanque, de modo que o oscilador não pare de funcionar.

A frequência de oscilação depende da equação:

$$F_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L/C}}$$

em que (**L**) é o valor do indutor do tanque em Henry e (**C**) o valor do capacitor em Farad. Essa frequência determinada é mantida em função da realimentação positiva do tanque, observando a Figura 128, é possível ver que a realimentação gera uma tensão que se soma à tensão do tanque, suprimindo as perdas e mantendo o tanque oscilando.

2.2.8.3 Oscilador Armstrong

O oscilador Armstrong possui esse nome em função do desenvolvedor desse circuito, sendo ele um dos mais antigos tipos de osciladores. Basicamente, é um oscilador com tanque sintonizável com realimentação por transformador. A Figura 130 demonstra um oscilador Armstrong, em que (**Q₁**) é um transistor amplificador, alimentado por uma fonte (**V_{CC}**) positiva. O tanque sintonizável é formado por (**L₁**) e (**C₁**) acoplado por meio de (**C₂**) à base de (**Q₁**). A frequência de oscilação do circuito é determinada por (**C₁**) e (**L₁**).

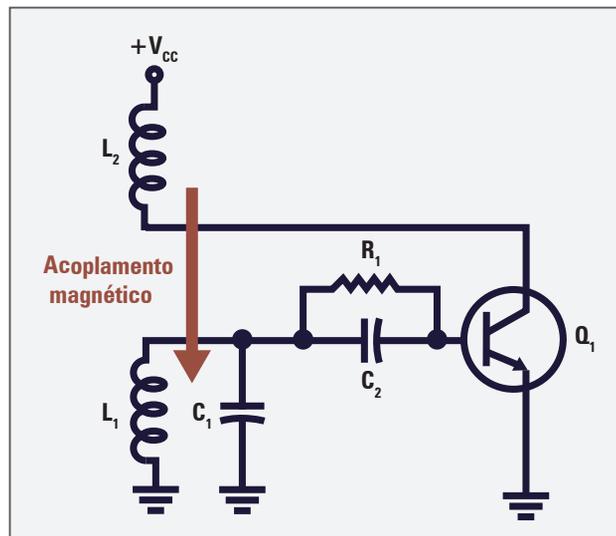


Figura 130 - Oscilador Armstrong

Ao ligar o circuito, o tanque fornece a tensão (**CA**) para a base de (**Q₁**) e, assim, é amplificada. Uma porção da onda (**CA**) amplificada por (**Q₁**) retorna à entrada por meio do acoplamento

existente entre (L_2) e (L_1). A quantidade de energia e a fase são dependentes da relação entre (L_1) e (L_2), dessa forma, por meio da troca de energia entre as bobinas, o valor de tensão e a fase acoplada de (L_2) para (L_1) devem ser suficientes para a manutenção da oscilação do circuito.

Conforme a teoria vista anteriormente, a realimentação precisa ser positiva, para que o arranjo entre (L_1) e (L_2) gere a fase adequada a fim de estabelecer a realimentação positiva. O resistor (R_1) adequa o valor de tensão para ser aplicado à base de (Q_1).

2.2.8.4 Oscilador Hartley

O oscilador Hartley é formado por um circuito tanque em que a bobina possui derivação central, assim uma parte da bobina faz parte do circuito de entrada e a outra da saída. Com esse artifício da derivação, é possível usar apenas uma bobina para retroalimentar e fornecer a frequência de oscilação.

A Figura 131 mostra um oscilador Hartley básico, sendo o circuito tanque formado por (L_1) e (C_1), os quais determinam a frequência de oscilação do circuito. Para facilitar a análise de funcionamento, a bobina (L_1) é dividida em (L_{1a}) e (L_{1b}). A base de (Q_1) está ligada a (L_{1a}), enquanto o coletor está ligado ao (L_{1b}). Quando o circuito é ligado, uma variação da corrente de coletor é acoplada via (C_3) e (L_{1b}) para a base de (Q_1), essa pequena variação dá início a oscilação do tanque que acopla o sinal, via (L_{1a}) e (C_2), para a base de (Q_1) onde será amplificado.

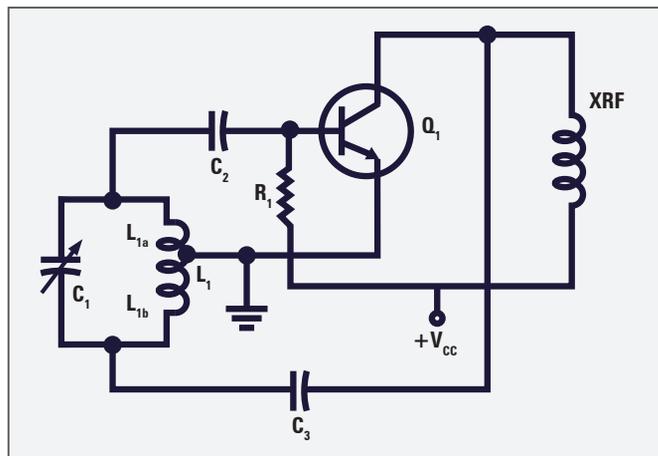


Figura 131 - Oscilador Hartley

O sinal de base amplificado é realimentado por (C_3) novamente ao tanque e, em consequência, à base de (Q_1), para repetir o ciclo. A quantidade de espiras de (L_1) é projetada para fornecer a voltagem necessária à manutenção da oscilação do circuito, a relação de fase que também é importante, pois é necessário prover realimentação positiva para a base de (Q_1), é estabelecida por (L_1). O capacitor (C_1) é variável, portanto, a frequência de oscilação do Hartley depende do ajuste desse componente, variando dentro de uma faixa de frequência, visto que:

$$F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L/C}}$$

O choque de (RF) (XRF), ligado ao coletor de (Q_1), serve para impedir que componentes de (CA) sigam para a fonte de alimentação e deixem passar a (CC) necessária à polarização do transistor.

2.2.8.5 Oscilador Colpitts

O oscilador Colpitts é formado por um circuito tanque com a capacitância dividida, em que uma parte dela está no circuito de entrada e a outra, no de saída. Essa situação é oposta ao oscilador Hartley, no qual se tem a indutância dividida para realimentar.

A Figura 132 mostra um oscilador Colpitts básico, sendo o circuito tanque formado por (L_1), (C_1) e (C_2), os quais determinam a frequência de oscilação do circuito. O capacitor resultante (C_{eq}) entre (C_1) em série com (C_2), determina a frequência de ressonância do tanque, conforme a equação:

$$F_R = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L/C_{eq}}}$$

A base de (Q_1) está conectada à (C_1) enquanto o coletor está ligado ao (C_2), ambos os capacitores variáveis. Quando o circuito é acionado, uma variação da corrente de coletor é realimentada via (C_4) e (C_2) para a base de (Q_1), essa pequena variação dá início à oscilação do tanque que acopla o sinal, via (C_1) e (C_3), para a base de (Q_1), onde é amplificado.

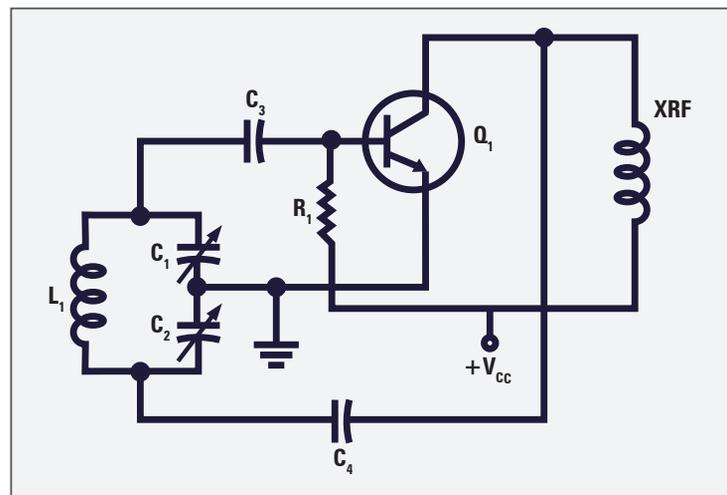


Figura 132 - Oscilador Colpitts

O sinal de base amplificado é realimentado por (C_4) novamente ao tanque e, conseqüentemente, à base de (Q_1), para repetir o ciclo. O valor da capacitância resultante de (C_1) em série com (C_2) em paralelo com (L_1) é projetado para fornecer a voltagem necessária à manutenção da oscilação do circuito. A relação de fase também é importante, pois é imperativo fornecer uma realimentação positiva para a base de (Q_1), é estabelecida por (C_1) e (C_2). Esses capacitores são variáveis, desse modo, a frequência de oscilação do Colpitts depende do ajuste de tais componentes, podendo variar dentro de uma faixa de frequência. O choque de (RF) (XRF), ligado ao coletor de (Q_1), serve para impedir que componentes de (CA) sigam para a fonte de alimentação e deixe passar a (CC) essencial à polarização do transistor.

2.2.8.6 Oscilador a cristal

Os circuitos tanques (LC) empregados nos osciladores antes apresentados cumprem adequadamente com o papel de estabelecer a frequência dos osciladores, porém, quando é necessária uma grande estabilidade de frequência, os tanques (LC) não são adequados. As variações na frequência causadas pelo tanque (LC) ocorrem devido a variações nos valores do capacitor e indutor do tanque, em função da temperatura e da própria carga dos componentes.

Para obter uma grande estabilidade de frequência, usam-se os osciladores a cristal, neles o elemento que determina a frequência de oscilação é um cristal, o qual é, normalmente, feito de quartzo. O cristal de quartzo apresenta uma característica físico-elétrica chamada de efeito piezoelétrico. Esse efeito produz cargas elétricas opostas nas faces de um cristal ao sofrer uma pressão, e essas cargas invertem quando sofrem uma tração, conforme demonstrado nas Figuras 133.

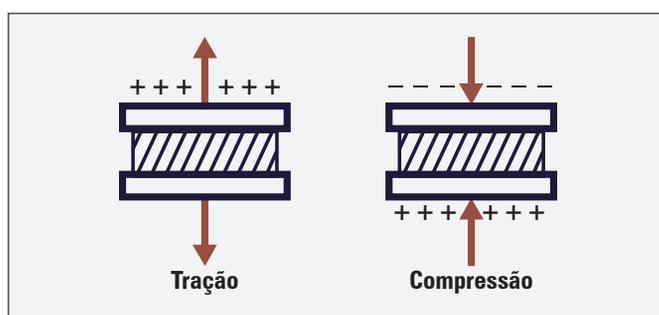


Figura 133 - Polaridades geradas pelo efeito piezoelétrico no cristal de quartzo causadas por tração e por compressão

O efeito piezoelétrico do cristal de quartzo gera amplitude de vibração que depende da frequência natural de vibração do cristal e da frequência elétrica do sinal (CA) usado para excitá-lo. Empregando um sinal (CA) na mesma frequência natural do cristal, são geradas grandes amplitudes de vibração; porém, se usar uma frequência (CA) diferente da natural do cristal para excitá-lo, é gerado vibração de baixa amplitude.

Vários fatores determinam as características do cristal como composição, corte e dimensão física. A frequência de oscilação natural do cristal depende principalmente da sua espessura, quanto mais fina for a espessura, maior será a frequência de oscilação do cristal.

Em virtude das características apresentadas, o cristal de quartzo é fabricado para uma frequência nominal específica e só funciona com o fim de montar oscilador para aquela frequência. Por exemplo, um cristal para a frequência de 455 KHz é utilizado para montar um oscilador para esse valor de frequência.

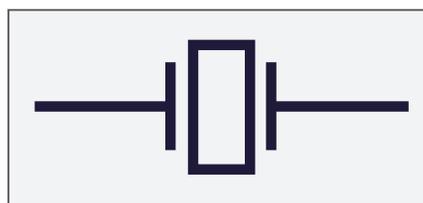


Figura 134.A - Símbolo eletrônico do cristal de quartzo

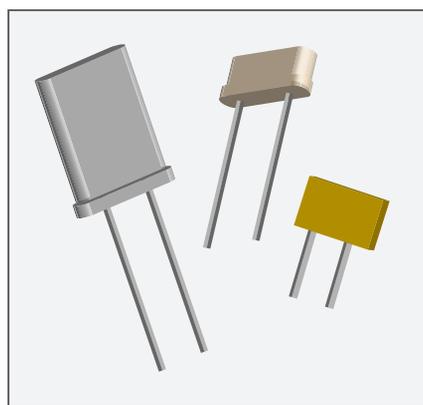


Figura 134.B - Aspecto físico do cristal de quartzo



Cristal de quartzo: componente eletrônico baseado no cristal de quartzo, é utilizado em osciladores eletrônicos devido a sua grande estabilidade de frequência.

Efeito piezoelétrico: efeito ocorrido em cristais de quartzo, onde é gerado tensão elétrica em função da pressão mecânica realizada no cristal.

2.2.8.7 Oscilador Hartley com cristal

Na Figura 135, o cristal de quartzo é utilizado em um oscilador tipo Hartley no caminho da realimentação. Devido às características do cristal, a frequência de oscilação do circuito é muito estável. Para a frequência de ressonância do cristal, a sua impedância (resistência equivalente) é mínima, assim, o sinal de realimentação passa por (C_3) e cristal sendo realimentado para o tanque. Para qualquer frequência diferente da ressonância do cristal, sua impedância é muito alta, com isso, o sinal não é acoplado para o tanque e, conseqüentemente, a oscilação do tanque não sai do valor padrão de ressonância, que tem de ser a mesma do cristal utilizado na realimentação.

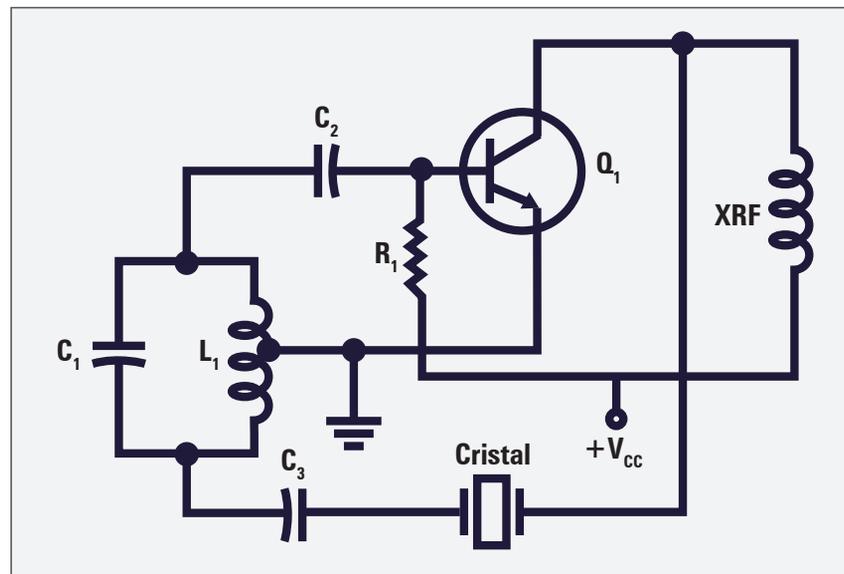


Figura 135 - Oscilador Hartley com cristal de quartzo

O tanque LC (L_1 e C_1) do circuito da Figura 135 varia sua frequência de ressonância em função das características de carga e temperatura, conforme explicado anteriormente, porém o cristal não deixa isso acontecer. Como só a frequência de ressonância do cristal consegue passar por sua impedância, sempre que o tanque tender a sair dessa frequência, a realimentação força o tanque para a frequência de oscilação correta.

2.2.9 Multivibradores

Os multivibradores são um dos circuitos mais utilizados em equipamentos eletrônicos. Eles são osciladores, porém são considerados, dentro da divisão dos tipos de osciladores de geradores de ondas, não senoidais.

Com o desenvolvimento dos sistemas eletrônicos, houve a necessidade de se criar circuitos que operam ou que forneçam sinais ou formas de ondas não senoidais. Esses sinais incluem tensões de onda quadrada, onda retangular ou pulsos.

O multivibrador é um circuito eletrônico capaz de produzir uma tensão de saída de onda quadrada ou retangular. Esses sinais são contínuos, como uma cadeia repetitiva de ondas quadradas, ou um simples impulso produzido a intervalos de tempo definidos. Basicamente, o multivibrador é um circuito de dois estágios, em que a saída de um é novamente acoplada à entrada do outro estágio para manter a oscilação.

A classificação dos multivibradores é feita de acordo com a forma de funcionamento do circuito. Assim, os multivibradores são classificados em astável, monoestável e biestável.

O multivibrador astável gera uma série contínua ou uma cadeia de pulsos, sem necessidade de sinal de entrada, um pulso disparador. Por esse motivo, os multivibradores astáveis são também denominados multivibradores de oscilação livre.

O multivibrador monoestável precisa de um pulso disparador ou de comutação para produzir uma onda quadrada ou retangular. Esse tipo de circuito é comumente chamado de multivibrador de um disparo.

O multivibrador biestável necessita de dois pulsos de comutação para produzir uma onda quadrada ou retangular. Por isso, é denominado como multivibrador de dois disparos ou *flip-flop*.

Multivibrador astável

É conhecido também como multivibrador (Figura 136) de oscilação livre, pois não necessita de pulsos de comutação de entrada para o seu funcionamento. É formado, basicamente, por dois transistores em que, simultaneamente, quando um é levado a corte, o outro é levado à saturação. O corte de um transistor produz um pulso que satura o outro. Esse multivibrador possui duas condições de instabilidade, ou seja, os estados de saturação e corte de cada transistor é momentâneo e altera de acordo com a frequência de oscilação do multivibrador.

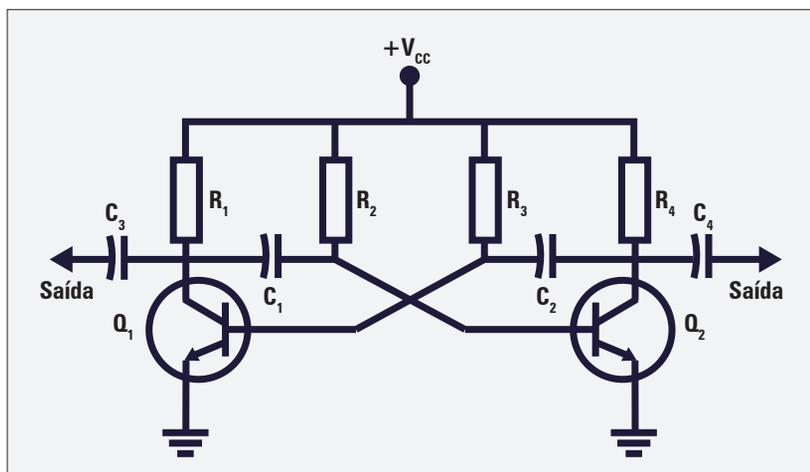


Figura 136 - Multivibrador astável

A Figura 136 ilustra o circuito de um multivibrador astável. Para que esse multivibrador forneça onda quadrada, é necessário que o circuito esteja balanceado, ou seja, o transistor (Q_1) deve ser igual ao (Q_2), (R_1) igual ao (R_4), (R_2) igual a (R_3) e (C_1) igual a (C_2). Respeitando a relação de igualdade, simetria entre os componentes, o circuito gera onda quadrada no coletor de (Q_1) e (Q_2).

Caso todos os componentes fossem exatamente iguais e se os transistores conduzissem a mesma quantidade de corrente, o circuito jamais oscilaria livremente. O início das oscilações dá-se em razão de que, na prática, os componentes nunca são exatamente iguais, então o multivibrador astável principia a oscilação por causa da pequena diferença entre os componentes correspondentes do circuito.

Considerando que inicialmente o transistor (Q_1) entre em corte logo após ligar o circuito, conseqüentemente (Q_2) será levado para saturação, isso ocorre devido às pequenas diferenças entre os componentes. A condição dos transistores permanece inalterada até os capacitores (C_1) e (C_2) alterarem suas cargas através dos resistores. Quando os capacitores alteram suas cargas, os transistores mudam seus estados, (Q_1) satura e (Q_2) passa para o corte.

Quando o transistor está em corte, a tensão entre coletor e emissor (V_{CE}) é igual a ($+V_{CC}$) e, quando está saturado, a (V_{CE}) é aproximadamente zero volt, assim a tensão de coletor, que é igual a (V_{CE}) nesse circuito, varia a tensão entre zero e ($+V_{CC}$), formando a onda quadrada de saída (Figura 137).

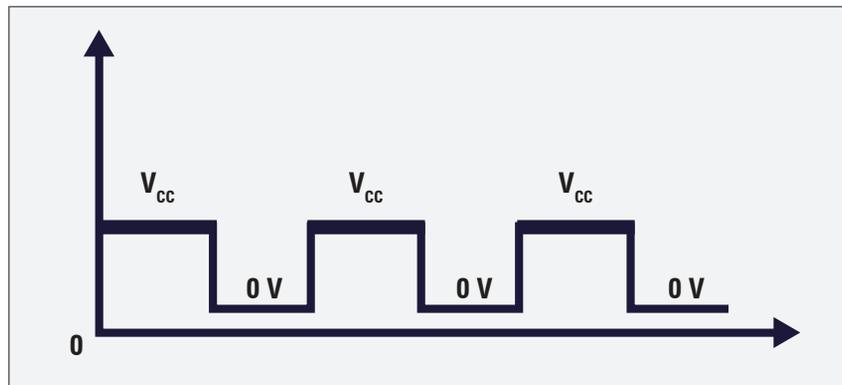


Figura 137 - Forma de onda de saída do multivibrador astável

A onda de saída, que pode ser quadrada ou retangular, é retirada no coletor de (Q_1) ou (Q_2), por meio dos capacitores de desacoplamento (C_3) e (C_4). Ressalta-se que, para tirar uma onda quadrada dos coletores, é necessário que o circuito esteja balanceado.

Resumindo

Os semicondutores são estruturas essenciais empregadas na construção de componentes eletrônicos como diodos e transistores. É por meio dos cristais (**P**) (positivo) e (**N**) (negativo) que toda a eletrônica moderna está apoiada.

Os diodos semicondutores são inseridos em inúmeros circuitos eletrônicos, entre eles os retificadores de meia onda e onda completa, que, juntamente com os elementos de filtragem e regulagem, geram as tensões contínuas necessárias ao funcionamento da maioria dos equipamentos eletrônicos.

Os transistores, para funcionarem corretamente, devem ser polarizados em corrente contínua, colocando o ponto de trabalho, ponto quiescente, na posição correta da reta de carga. Com a polarização correta contínua, é aplicado o sinal alternado no transistor para que ele execute a função desejada no circuito.

Os transistores possuem limitações de tensão e potência, as quais precisam ser respeitadas quando é calculada a sua polarização, assim ele compõe diversos tipos de circuitos eletrônicos, todos de grande importância para os equipamentos modernos a bordo das aeronaves.

Circuitos como amplificadores, osciladores, multivibradores são circuitos básicos montados com base no transistor, possibilitando o funcionamento de sistemas mais complexos muito maiores.

Capítulo 3

Transistor de efeito de campo e dispositivos de controle

O transistor de efeito de campo, em inglês, *field effect transistor* (FET), vem sendo utilizado na indústria eletrônica devido às suas características que o torna um componente muito pequeno e de fácil integração em circuitos integrados (CI). Cada vez mais a miniaturização dos equipamentos exige componentes modernos e eficientes como o FET. A produção de CI com muitos circuitos internos é possível graças a concepção do FET e suas variações como o transistor de efeito de campo de metal-óxido-semicondutor, em inglês, *oxide semiconductor field effect transistor* (MOSFET). Microprocessadores e microcontroladores que equipam os computadores pessoais, celulares e diversos outros equipamentos do nosso dia a dia são possíveis por meio do funcionamento de FET e MOSFET.

Os dispositivos de controle são componentes eletrônicos responsáveis pelo funcionamento e controle de equipamentos elétricos, como, por exemplo, motores de corrente contínua e alternada. Sistemas de ar condicionado, controle de luminosidade de painéis, abertura e fechamento de portas eletrônicas são algumas das aplicações que fazem uso de dispositivos de controle.

3.1 Transistor de efeito de campo

O transistor de efeito de campo, em inglês, *field effect transistor* (FET), é um componente de três terminais muito utilizado na eletrônica e possui funções parecidas com as dos transistores bipolares. A principal diferença entre eles é que o transistor bipolar é um componente controlado por corrente, enquanto o FET é controlado por tensão. São componentes de altíssima impedância (resistência) de entrada e baixo ruído.

3.1.1 Funcionamento do JFET

O *junction* FET (JFET), transistor de efeito de campo de junção, é do tipo canal (N) (negativo) ou canal (P) (positivo). Possui três terminais: fonte (*source*), dreno (*drain*) e porta (*gate*). Nas Figuras 138.A e 138.B, tem-se o símbolo eletrônico e o aspecto de construção do JFET.

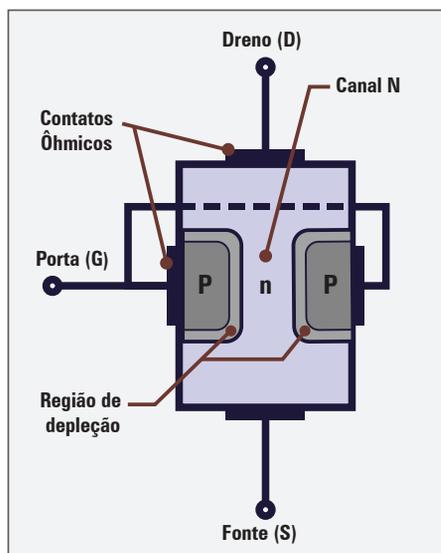


Figura 138.A - Aspecto de construção do JFET

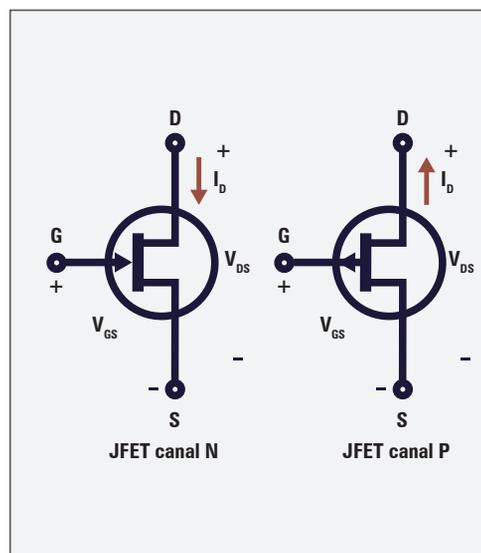


Figura 138.B - Símbolo eletrônico do JFET canal (N) e (P)

As Figuras 138.A e 138.B demonstram a existência de um canal direto entre dreno e fonte, assim, quando uma tensão entre esses terminais (V_{DS}) é inserida, surge uma corrente de dreno (I_D) que encontra em seu caminho apenas a resistência do material que forma o canal. Embora pareça que a corrente (I_D) não pode ser controlada pelo canal do JFET, existe um efeito, causado pelo aumento da tensão (V_{DS}) e, conseqüentemente, há o aumento da (I_D), que vai determinar um máximo de valor para (I_D). O máximo valor para (I_D) é chamado de (I_{DSS}), corrente de saturação do canal do JFET. É importante salientar que, para obter (I_{DSS}), é necessário deixar a tensão de porta (G) igual a zero volt (0 V).

O estrangulamento (*pinch-off*) do canal, momento quando (I_D) atinge o valor de (I_{DSS}), ocorre pois as cargas elétricas que passam por intermédio do canal acumulam pela região de depleção até o momento que não permitem um aumento da passagem das cargas. Assim, é determinada a (I_{DSS}) para um valor máximo de (V_{DS}), chamado de tensão de estrangulamento ou tensão *pinch-off*.



Estrangulamento (*pinch-off*): termo que identifica a tensão necessária para estrangular o canal do JFET canal P ou N.

A Figura 139 demonstra o efeito do acúmulo das cargas na região de depleção e o gráfico com os pontos de estrangulamento do JFET.

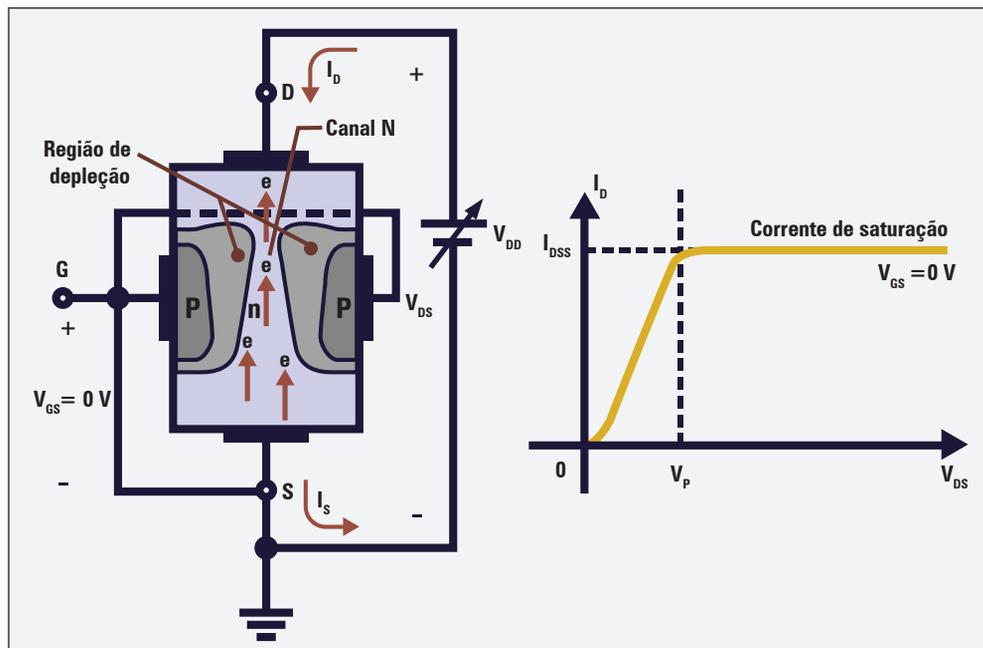


Figura 139 - Funcionamento do JFET e curva de (V_p) e (I_{DSS})

Quando a tensão passa entre a porta (G) e a fonte (S) para um valor diferente de zero ($V_{GS} \neq 0\text{ V}$), o JFET é levado a atingir o estrangulamento (I_{DSS}) mais rápido, com tensões menores de (V_{DS}). Para funcionar, a polaridade de (V_{GS}) deve ser negativa, pois as cargas negativas presentes na região de depleção precisam ser intensificadas, a fim de estrangular mais facilmente. Quando a tensão (V_{GS}) é grande o suficiente para cessar o fluxo de (I_D), chama-se essa tensão de (V_p), e ela estabelece uma ($I_D = 0\text{ mA}$) ou muito próximo desse valor.

Na Gráfico 23, do lado esquerdo da tensão de *pinch-off*, o JFET trabalha como uma resistência variável, sendo nessa região que o componente atua para funcionar como amplificador.

GRÁFICO 23 - Curva característica do JFET canal (N)

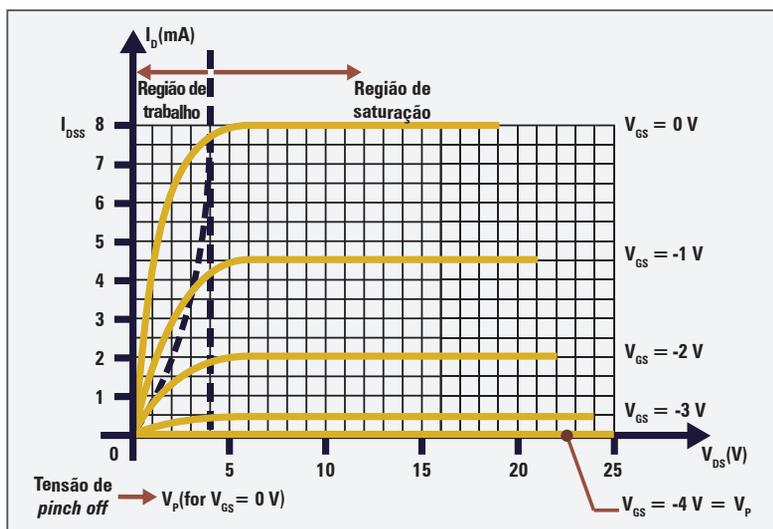
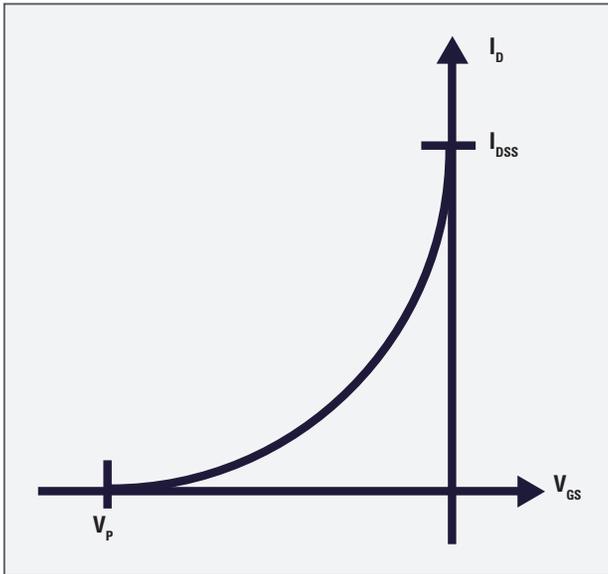


GRÁFICO 24 - Curva de transferência do JFET



A tensão de *pinch-off* também é chamada de (V_p), porém essa é para quando a tensão de porta (G) é zero. A tensão ($V_{GS} = -4\text{ V} = V_p$) do gráfico supracitado é a tensão (V_p) com (V_{GS}) diferente de zero, no caso -4 V , que proporciona uma corrente de dreno nula ($I_D = 0\text{ mA}$).

A curva de transferência ou de transcondutância do JFET demonstra como (I_D) varia em função da tensão (V_{GS}) aplicada na porta, essa curva é observada na Gráfico 24.

A curva do Gráfico 24 é traçada utilizando a equação de Shockley, a qual relaciona os parâmetros constantes de (I_{DSS}) e (V_p) e o parâmetro variável de (V_{GS}). A equação de Shockley é apresentada a seguir:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

A curva de transferência nem sempre é fornecida pelo fabricante do componente, porém ela pode ser obtida pela equação de Shockley, visto que o fabricante fornece outros parâmetros do JFET no *data sheet* do componente, como tensão de *pinch-off* e corrente de saturação (I_{DSS}).

3.1.2 Polarização do JFET

Polarizar um JFET é estabelecer o ponto de trabalho, ponto quiescente de operação em corrente contínua, portanto, determina-se (I_{DQ}), (V_{GSQ}) e (V_{DSQ}). A potência que o JFET dissipa é determinada pela equação: $P_D = V_{DSQ} \times I_{DQ}$.

Como outros componentes eletrônicos, cuidados são necessários antes de realizar a polarização do JFET. Um exemplo é respeitar a máxima potência dissipada pelo componente e a tensão máxima entre dreno e fonte, ambos parâmetros fornecidos pelo fabricante.

A polarização chamada de autopolarização utiliza apenas uma fonte de alimentação, não sendo necessária uma fonte para (V_{GS}). Para tal, utiliza-se um resistor (RS), em série com a fonte do JFET, de modo a gerar uma tensão reversa na junção porta-fonte.

Uma realimentação negativa é fornecida pelo resistor (RS), pois, se a corrente de dreno (I_D) aumenta, a tensão sobre (RS) também aumenta, fazendo subir a tensão reversa porta-fonte (V_{GS}), estreitando o canal e reduzindo novamente a corrente (I_D). Por isso o nome autopolarização, esse

efeito é possível porque, devido às características de alta impedância (resistência) de entrada do JFET, é considerado a corrente de entrada (porta) ($I_G=0\text{ mA}$), assim o efeito da resistência (R_S) é transferido para a entrada, conforme as Figuras 140.A e 140.B.

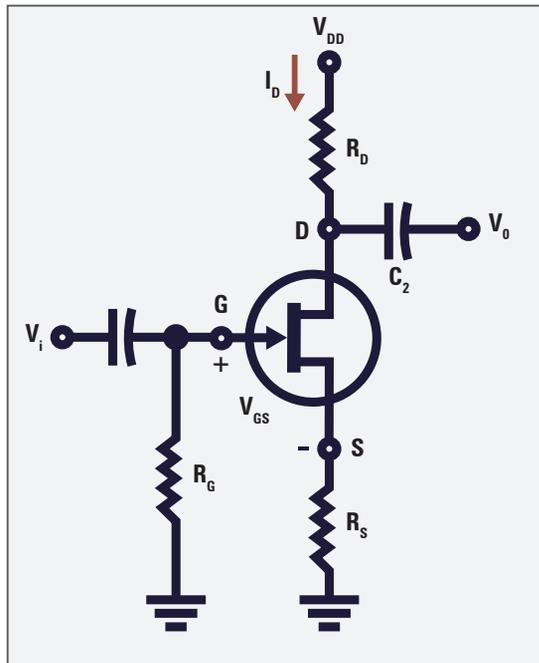


Figura 140.A - Configuração com autopolarização de um JFET

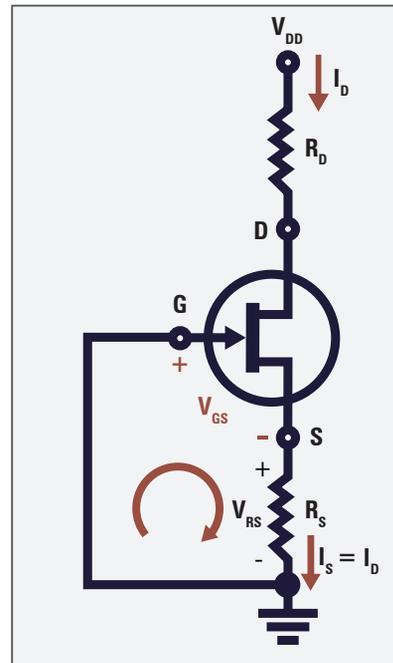


Figura 140.B - Efeito da (R_S) no circuito com autopolarização

O circuito apresentado nas Figuras 140.A e 140.B é polarizado usando as seguintes equações:

$$I_D = I_S \quad V_{RD} = I_D \cdot R_D \quad V_{GS} = I_D \cdot R_S \quad V_{DD} = R_D \cdot I_{DQ} \cdot V_{DSQ} + R_S \cdot I_{DQ}$$

É importante observar que as equações mostradas, mais a de Shockley, são suficientes para estabelecer o ponto quiescente do JFET, mas existe, também, a opção de polarizar utilizando as curvas fornecidas pelo fabricante do componente. No caso da polarização pelas curvas, o ponto quiescente é colocado no meio da curva de transferência.

3.1.3 Funcionamento do MOSFET

O transistor de efeito de campo de metal-óxido-semicondutor, em inglês, *oxide semiconductor field effect transistor* (MOSFET), possui esse nome porque, na sua construção, o contato metálico do terminal de porta é separado do substrato por uma camada isolante de dióxido de silício (SiO_2). Devido a essa característica de construção, a impedância de entrada do MOSFET é ainda maior que a do JFET, fazendo com que a corrente de porta seja praticamente nula.

O MOSFET proporcionou grande avanço tecnológico na eletrônica, porque é de fácil fabricação, tem alto desempenho (alta impedância de entrada e baixo ruído) e possui fácil integração em larga escala. Com um alto grau de integração, é possível colocar muitos MOSFETs dentro de um circuito integrado, diminuindo drasticamente as dimensões dos circuitos eletrônicos. Os MOSFETs são divididos em dois tipos: depleção e intensificação.

a) MOSFET tipo depleção

O MOSFET tem algumas diferenças importantes com relação ao JFET. Não existe ligação elétrica direta entre a porta e o canal do MOSFET, sendo uma camada de dióxido de silício (SiO_2) colocada na construção do componente entre aquelas partes.

Tomando-se como exemplo o MOSFET canal (N), aterrando-se o substrato (P) e aplicando-se uma tensão positiva à porta, surge um campo elétrico entre porta e substrato, que atrai para a região próxima à porta uma quantidade de elétrons. Se esse campo elétrico for suficientemente grande, a quantidade de elétrons atraídos é responsável pelo aumento de elétrons no canal do MOSFET e, assim, eleva a corrente dreno-fonte, a Figura 141 demonstra esse funcionamento.

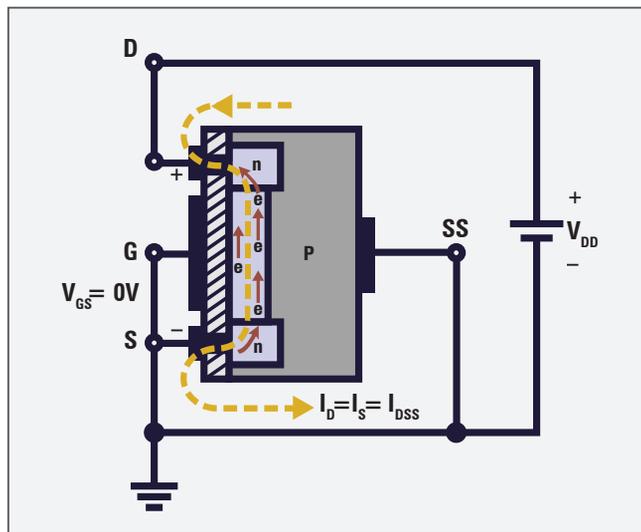
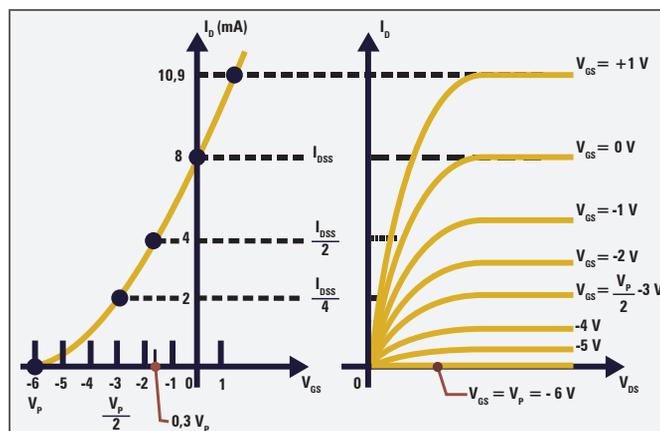


Figura 141 - Funcionamento do MOSFET tipo depleção canal (N)

O Gráfico 25 exemplifica as curvas características de corrente de dreno e tensão entre dreno/fonte ($I_D \times V_{DS}$) e a curva de transferência entre corrente de dreno e tensão porta-fonte ($I_D \times V_{GS}$) para um MOSFET de depleção canal (N). Observa-se que, para ($V_{GS} \leq 0$), esse dispositivo funciona de modo semelhante ao JFET e, para ($V_{GS} > 0$), ele funciona como um MOSFET de acumulação, mas com corrente inicial maior que zero (I_{DSS}).

GRÁFICO 25 - Curvas características do MOSFET depleção canal (N)



A equação de Shockley rege a curva de transferência do mesmo modo como era chamado no JFET:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

O símbolo eletrônico utilizado para desenhos de esquemas elétricos está na Figura 142. Conforme a simbologia, o substrato pode ou não estar disponível como terminal utilizável.

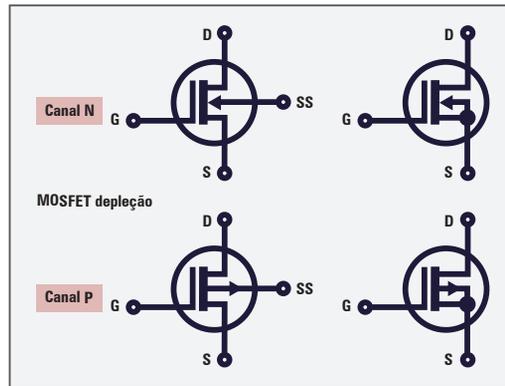


Figura 142 - Símbolo eletrônico do MOSFET depleção

Para analisar o funcionamento do MOSFET canal (P), basta inverter as polaridades aplicadas aos terminais porta (G), dreno (D) e fonte (S) do componente e inverter os sentidos das correntes, pois o funcionamento é o mesmo. A utilização do MOSFET canal (N) ou (P) depende das necessidades de projeto, um circuito eletrônico necessita de um canal (N), e não de um canal (P).

A polarização do MOSFET depleção segue o mesmo método do JFET, inclusive o de autopolarização. Esta última emprega apenas uma fonte de alimentação, não sendo necessária uma fonte para (V_{GS}). Isso é feito utilizando um resistor (RS) em série com a fonte do JFET.

Uma realimentação negativa é fornecida pelo resistor (RS), pois, se a corrente de dreno (I_D) aumenta, a tensão sobre (RS) também aumenta, fazendo elevar a tensão reversa porta-fonte (V_{GS}) estreitando o canal e reduzindo novamente a corrente (I_D). Por isso o nome autopolarização. Esse efeito é conseguido porque, devido às características de altíssima impedância de entrada do MOSFET, considera-se a corrente de entrada ($I_G = 0 \text{ mA}$), assim o efeito da resistência (RS) é transferido para a entrada, conforme a Figura 143.

O circuito apresentado na Figura 143 é polarizado, assim como o JFET, usando as seguintes equações:

$$I_D = I_S \quad V_{RD} = I_D \cdot R_D \quad V_{GS} = I_D \cdot R_S \quad V_{DD} = R_D \cdot I_{DQ} + V_{DSQ} + R_S \cdot I_{DQ}$$

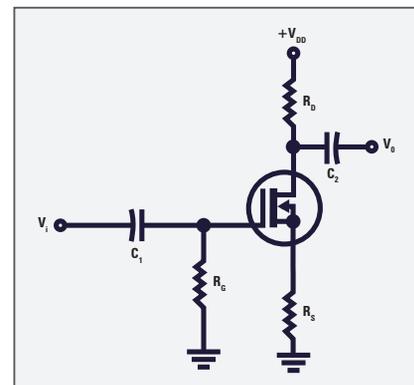


Figura 143 - MOSFET depleção na configuração autopolarização

É relevante observar que as equações apresentadas, mais a equação de Shockley, são suficientes para estabelecer o ponto quiescente do MOSFET depleção, mas existe também a opção de polarizar usando as curvas fornecidas pelo fabricante do componente. No caso da polarização pelas curvas, o ponto quiescente é colocado no meio da curva de transferência. Os MOSFETs tipo depleção ou intensificação possuem uma camada isolante de (SiO_2) muito fina que é facilmente destruída por um campo elétrico criado entre a porta e o substrato. Conseqüentemente, alguns cuidados especiais precisam ser tomados no manuseio desses componentes. Como o simples toque com a mão pode danificá-los, em razão do depósito de cargas estáticas em seus terminais, alguns MOSFETs têm diodos de proteção embutidos entre a porta e o substrato, tornando o componente imune a esse tipo de problema.

b) MOSFET tipo intensificação

O MOSFET tipo intensificação, também chamado de acumulação, possui algumas semelhanças com o MOSFET depleção, porém tem características bem diferentes de funcionamento. O MOSFET intensificação não segue a equação de Shockley de transferência e a corrente de dreno (I_D) é nula enquanto não é atingido determinado valor de tensão (V_{GS}).

É possível analisar o funcionamento do MOSFET intensificação, usando como exemplo o canal (N), aterrando-se o substrato (P) e aplicando uma tensão positiva à porta, assim surge um campo elétrico entre porta e substrato que atrai elétrons para a região próxima à primeira. Se esse campo elétrico for suficientemente grande, a quantidade de elétrons atraídos produz um canal (ponte) entre os terminais de dreno e fonte, de acordo com as Figuras 144.A e 144.B.

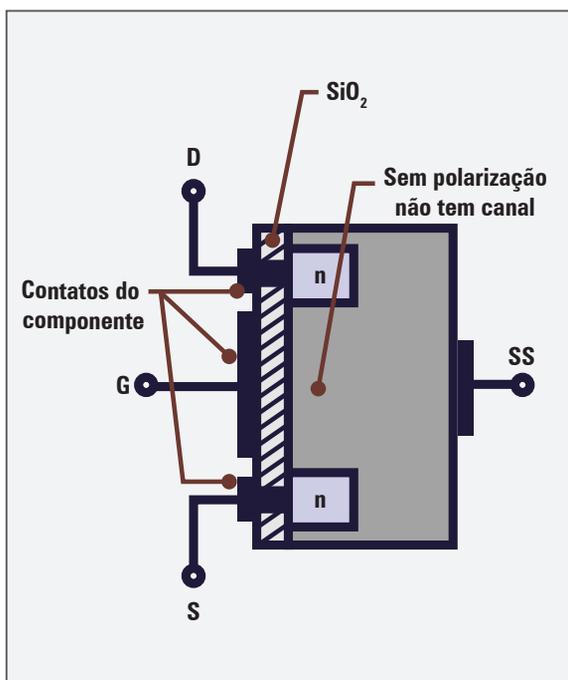


Figura 144.A - Aspecto de construção do MOSFET canal (N)

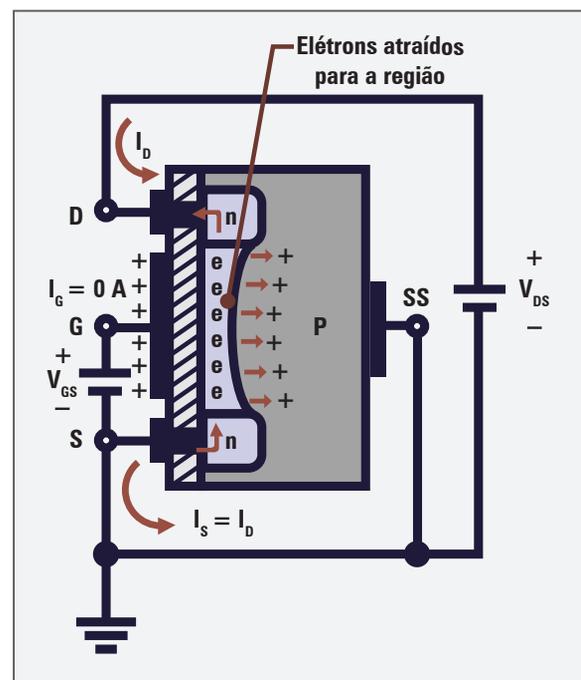
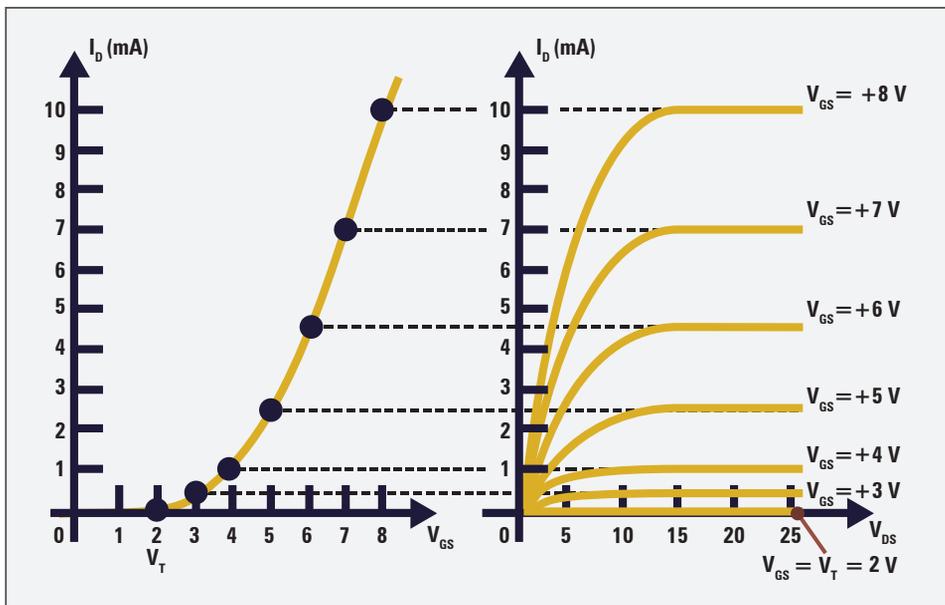


Figura 144.B - Funcionamento das cargas eletrônicas no MOSFET intensificação canal (N)

O material próximo à porta é do tipo (P), onde os portadores são lacunas (cargas positivas), o campo elétrico faz com que no canal os elétrons tornem-se majoritários, criando uma camada de inversão denominada canal (N). Aumentando mais a tensão na porta, uma maior quantidade de elétrons é atraída, alargando o canal, diminuindo sua resistência e permitindo que circule uma corrente maior entre o dreno e a fonte.

O Gráfico 26 demonstra as curvas de corrente de dreno e tensão entre dreno/fonte ($I_D \times V_{DS}$) e a curva de transferência entre corrente de dreno e tensão porta-fonte ($I_D \times V_{GS}$) para um MOSFET de intensificação canal (N). O Gráfico 26 mostra que ($V_{GS} < V_T$) a corrente (I_D) é praticamente zero. A partir de (V_T), denominada tensão de limiar, o aumento de corrente é mais intenso, devido à diminuição na resistência entre dreno e fonte.

GRÁFICO 26 - Curvas características do MOSFET intensificação canal (N)



O símbolo eletrônico empregado para desenhos de esquemas elétricos está na Figura 145. Conforme a simbologia, o substrato pode estar disponível ou não como terminal utilizável.

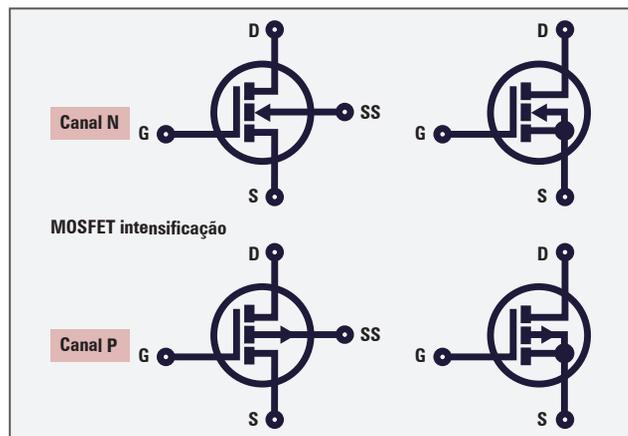


Figura 145 - Símbolo eletrônico do MOSFET intensificação

A polarização do MOSFET intensificação é parecida com as outras polarizações de FETs estudadas, sendo a polarização com realimentação uma das mais utilizadas. Na Figura 146, são demonstrados a configuração com realimentação e o circuito equivalente.

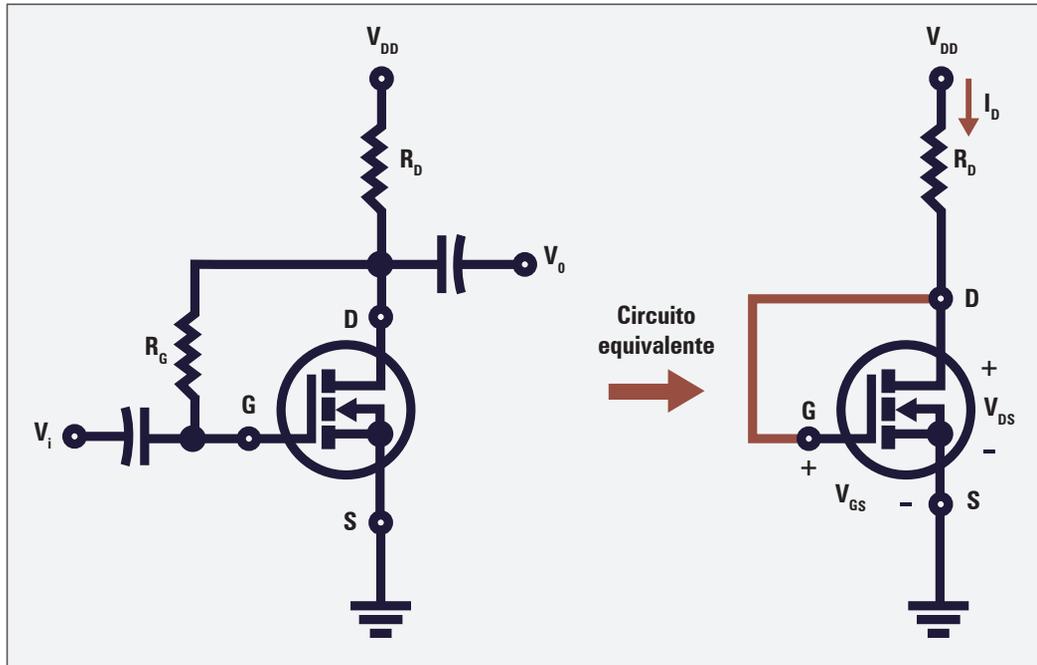


Figura 146 - Polarização do MOSFET canal (N) intensificação e circuito equivalente

O circuito apresentado na Figura 146 é polarizado usando as seguintes equações:

$$V_{DS} = V_{GS} \quad V_{GS} = V_{DD} - I_D R_D \quad V_{GS} = V_{DD} \quad V_{DD} = R_D \cdot I_{DQ} + V_{DSQ}$$

Os MOSFETs são empregados em muitos circuitos eletrônicos diferentes e podem, em virtude do processo de fabricação, ser utilizados na produção de circuitos integrados de portas lógicas, usadas como base de circuitos digitais. Isso se justifica pelo fato de esse dispositivo dissipar baixíssima potência e por possibilitar a integração em larga escala, ocupam pouco espaço na fabricação de *chips* com grandes quantidades de componentes.

Os MOSFETs têm altíssima impedância de entrada e isolamento entre porta e dreno, características que contribuem para sua utilização em circuitos de voltímetros, medidores de tensão em multímetros digitais, circuitos de comunicação ótica utilizados em sistemas de fibras óticas e pré-amplificadores de grande impedância de entrada.

3.2 Dispositivos de controle

Tiristores são os dispositivos de controle mais comuns. São semicondutores de quatro camadas (PNPN), empregados para fins de chaveamento, com diversas aplicações relacionadas ao controle de altos valores de corrente, como motores, por exemplo. Algumas de suas características mais importantes são alta velocidade de chaveamento (comutação), tempo de vida útil elevado, pequeno volume e resistência. É considerado o grande responsável pela evolução da eletrônica

de potência entre os anos 60 e 70. Dentre os tiristores mais comuns, estão o retificador controlado de silício (SCR) e o triodo de corrente alternada (TRIAC). Além desses, outros tiristores também serão estudados.

3.2.1 Retificador controlado de silício

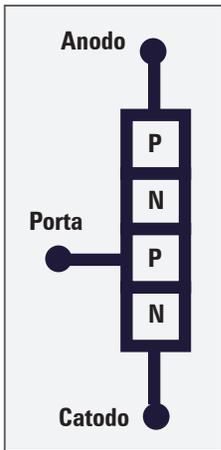


Figura 147.A - Estrutura interna do SCR

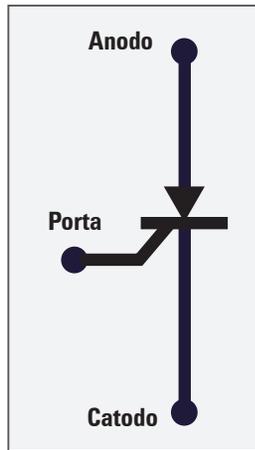


Figura 147.B - Símbolo do SCR

O retificador controlado de silício, em inglês, *silicon controlled rectifier* (SCR), exemplificado nas Figuras 145.A e 145.B, é um dispositivo de quatro camadas que permite a passagem de corrente somente em um sentido. Possui três terminais: anodo (A), catodo (K) e gatilho ou porta (G), e sua maior aplicação se encontra nos circuitos de controle de potência, funcionando como dispositivo de chaveamento a valores elevados de frequência.

O SCR pode ser comparado a dois transistores interligados entre si, resultando em um componente com quatro camadas. As Figuras 148.A e 148.B mostram o equivalente do SCR a partir de dois transistores.

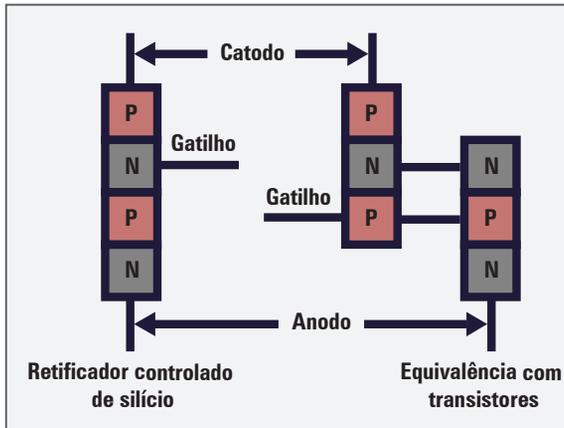


Figura 148.A - Equivalência do SCR com dois transistores

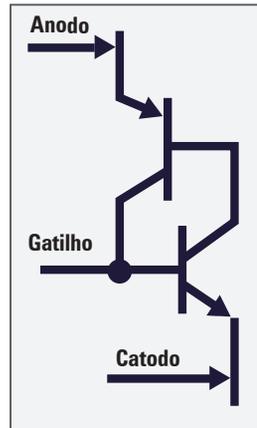
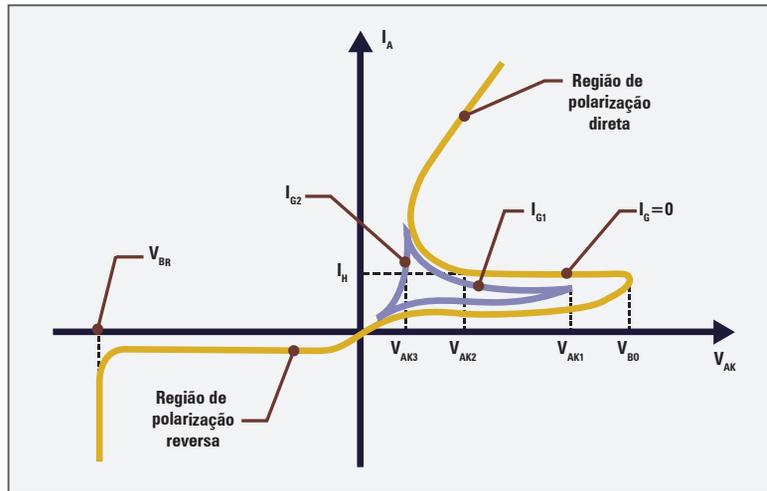


Figura 148.B - Diagrama esquemático do SCR

Para o SCR conduzir (funcionar como uma chave fechada), é necessário que a junção anodo-catodo seja polarizada diretamente e que um pulso positivo seja aplicado no gatilho. Quando essas condições são satisfeitas, o SCR conduz corrente entre anodo e catodo. Normalmente, o pulso aplicado à porta é de curta duração e, após o SCR conduzir, não há a necessidade da aplicação de outros pulsos. Ele permanece funcionando até que a corrente do circuito caia abaixo da corrente de manutenção (I_H) do SCR, fazendo com que ele volte ao estado inicial e se comporte como uma chave aberta, sem fluir corrente entre anodo e catodo. Se for aplicado um pulso negativo no gatilho ou se a junção anodo-catodo for polarizada inversamente, o SCR funciona como um diodo polarizado inversamente, sem conduzir corrente.

A curva característica no Gráfico 27 demonstra o funcionamento do SCR. Quanto maior o pulso aplicado no gatilho, menor é a tensão necessária entre anodo e catodo (V_{AK}) para o SCR conduzir.

GRÁFICO 27 - Curva característica do SCR



De acordo com a curva característica anterior, existe uma forma de disparar o SCR sem aplicar pulso positivo no gatilho, ou seja, (I_G) igual a zero. Esse método consiste em aplicar uma tensão entre anodo e catodo (V_{AK}) igual à máxima tensão de bloqueio direto (V_{BO}), recebendo o nome de disparo por sobretensão. Para os casos em que (V_{AK}) é diferente de (V_{BO}), o valor de I_G é diferente de zero.

O circuito da Figura 149 é uma aplicação do SCR com fonte contínua. A fonte de alimentação (V) polariza diretamente a tensão (V_{AK}) do SCR, porém ele ainda não conduz corrente elétrica e funciona como uma chave fechada. Quando a chave (**Sw1**) é pressionada, um pulso positivo é aplicado ao gatilho, fazendo com que o SCR passe do estado de bloqueio para o de condução. Nesse momento, o SCR é uma chave fechada e a corrente passa pelo circuito, alimentando a carga. Após o pulso ser aplicado ao gatilho e disparar o SCR, a chave (**Sw1**) pode voltar à posição inicial porque o SCR permanece conduzindo corrente. Ele só passa ao estado de bloqueio se a alimentação do circuito fornecer valor de corrente menor que a **corrente de manutenção** (I_H).



Corrente de manutenção I_H :
mínima corrente necessária para manter o tiristor conduzindo. Para qualquer valor de corrente menor que I_H , o tiristor para de conduzir.

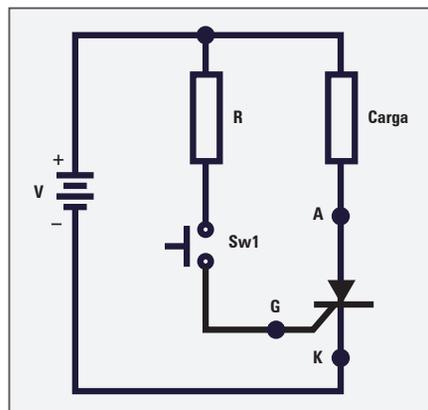


Figura 149 - Aplicação do SCR

A Figura 150 é exemplo de aplicação do SCR em circuitos de corrente alternada. Durante o semiciclo positivo do sinal de entrada, o SCR é polarizado diretamente e um pulso positivo é aplicado ao gatilho por meio do resistor (R) e do diodo (D), ocasionando o acendimento da lâmpada. Durante o semiciclo negativo, o SCR é polarizado reversamente e faz com que a lâmpada permaneça apagada. O diodo (D) não permite que pulsos negativos sejam aplicados ao gatilho dele.

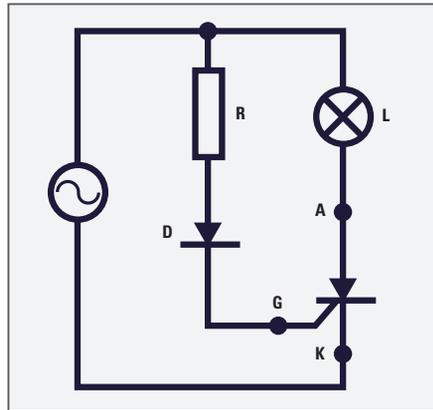


Figura 150 - Aplicação do SCR

O resistor (R) e o diodo (D) são os responsáveis por controlar o momento de disparo (também conhecido como ângulo de disparo) do SCR. Quanto maior for o valor de (R), mais tempo leva para o SCR disparar e faz com que a lâmpada fique menos tempo acesa. Dessa forma, é possível controlar a quantidade de potência entregue à carga ao modificar o ângulo de disparo do SCR. As Figuras 151.A, B, C, D e E mostram a relação entre o ângulo de disparo e a tensão média aplicada à carga de um circuito utilizando o SCR como elemento de disparo.

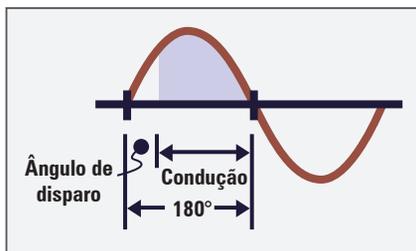


Figura 151.A - Sinal de entrada

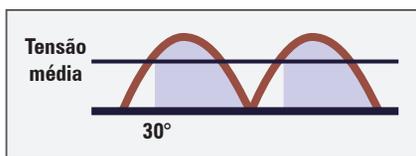


Figura 151.B - Sinal de entrada com ângulo de disparo de 30°

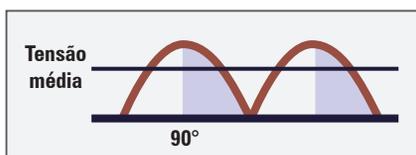


Figura 151.C - Sinal de entrada com ângulo de disparo de 90°

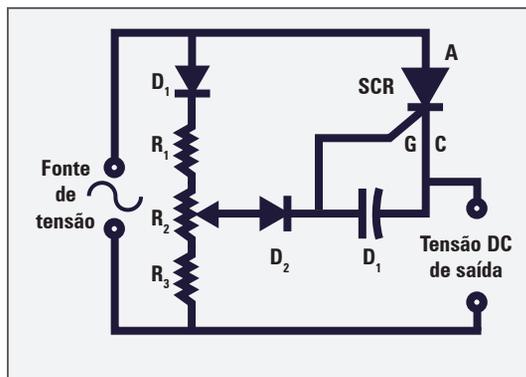


Figura 151.D - Circuito com SCR

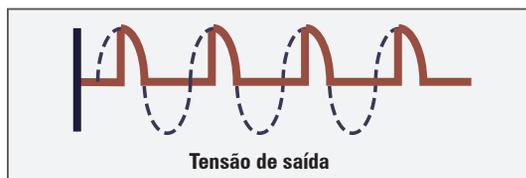


Figura 151.E - Sinal de saída com ângulo de disparo de 90°

O circuito acima usa o SCR como elemento de disparo. O diodo (D_2) evita que os pulsos negativos cheguem ao gatilho e os componentes (D_1), (R_1), (R_2) e (R_3) são os responsáveis pelo ângulo de disparo do SCR. O resistor (R_2) é variável, podendo alterar o ângulo de disparo do SCR. No exemplo anterior, tem-se duas ondas de saída: uma com o ângulo de disparo de 30° e a outra de 90° . Na primeira situação, com um ângulo de disparo menor, a tensão média aplicada à carga é maior, diferentemente do que ocorre quando o ângulo é de 90° . O ajuste do ângulo de disparo do SCR fica a critério do projetista, sendo alterado de acordo com as necessidades do projeto.

3.2.2 Triodo de corrente alternada (TRIAC)

TRIAC é um componente que se equivale a dois SCRs ligados em antiparalelo e é capaz de conduzir corrente elétrica nos dois sentidos, disparado por pulsos positivos ou negativos (Figuras 152.A, B e C). Foi fabricado para trabalhar com corrente alternada e apresenta os seguintes terminais: anodo 1 (A1), anodo 2 (A2) e gatilho ou *gate* (G).

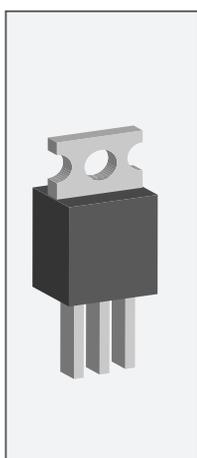


Figura 152.A -
Aspecto físico
do TRIAC

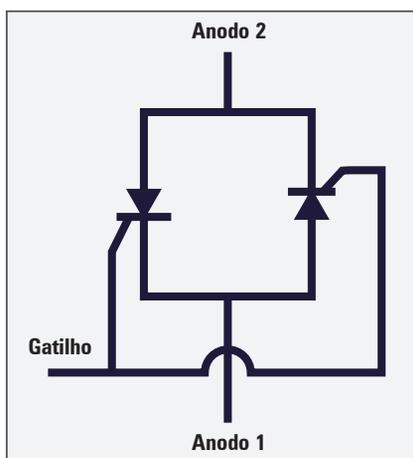


Figura 152.B - Circuito
equivalente do TRIAC

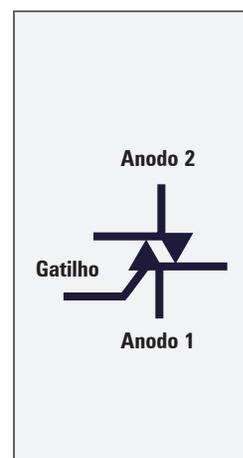


Figura 152.C
- Símbolo do
TRIAC

A curva característica demonstra o funcionamento do TRIAC (Figura 153). Diferencia-se do SCR por conduzir corrente em ambas as polarizações: diretamente e inversamente, além de disparado por pulsos positivos ou negativos.

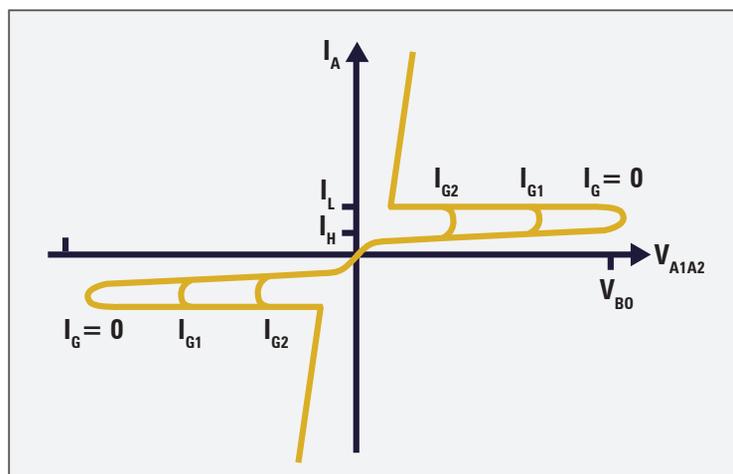


Figura 153 - Curva característica do TRIAC

Da mesma forma que o SCR, o TRIAC necessita de um pulso, seja ele positivo ou negativo, para ser disparado. O disparo por sobretensão, quando (V_{AK}) assume o valor de (V_{BO}), também pode ser utilizado, porém não é um método comum.

No circuito da Figura 154, a carga é alimentada durante os semiciclos positivo e negativo do sinal de entrada, com exceção do tempo que o TRIAC leva para ser disparado (entre t_0 e t_1). O ângulo de disparo é controlado pelo resistor (R) no circuito a seguir.

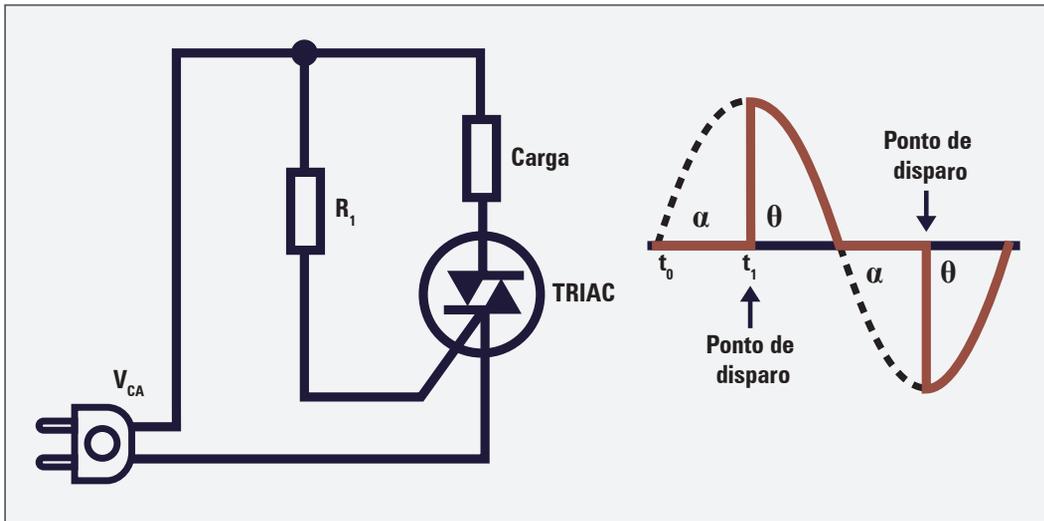
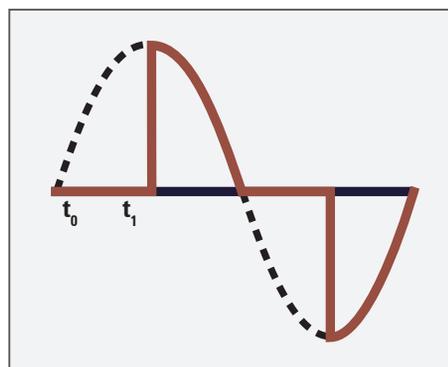


Figura 154 - Circuito com TRIAC e ângulo de disparo do TRIAC

Caso o resistor (R) seja modificado para um valor maior, o ângulo de disparo aumenta e a carga recebe menos potência, conforme mostra o Gráfico 28.

GRÁFICO 28 - Ângulo de disparo do TRIAC



Outra aplicação comum do TRIAC é realizar o controle do ângulo de disparo do circuito por meio de um capacitor, conforme a Figura 155. Nesse circuito, o capacitor se carrega com tensão suficiente para disparar o TRIAC, sendo a constante de tempo (CT) formada por (P_1), (R_1) e (C_1). Assim, é possível controlar a intensidade do brilho da lâmpada alterando o valor do potenciômetro (P_1) e, conseqüentemente, da CT do circuito.

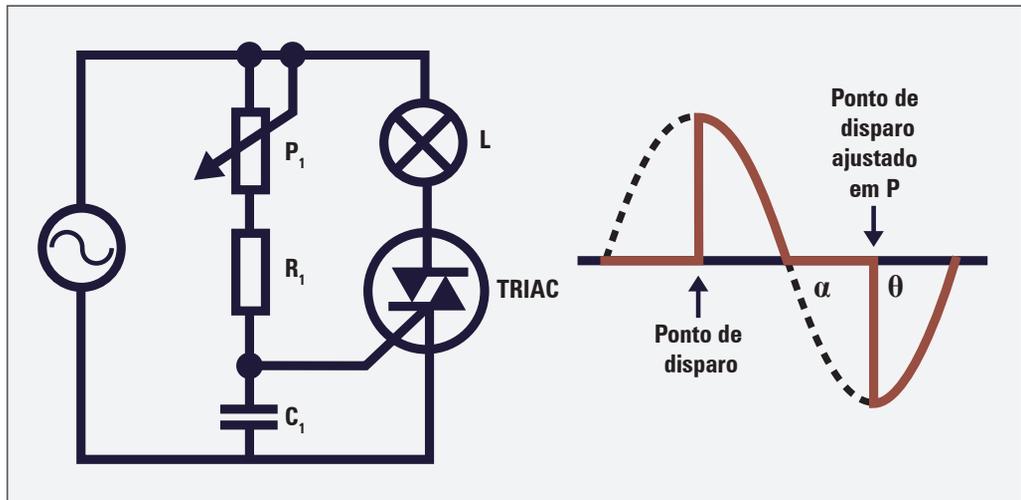


Figura 155 - Aplicação do TRIAC

3.2.3 Diodo de corrente alternada (DIAC)

DIAC é um dispositivo de quatro camadas que conduz corrente quando polarizado direta ou reversamente. Para conduzir, é necessário um valor mínimo de tensão de disparo. Ele se comporta da mesma maneira nas duas formas de polarização. Seus terminais são chamados de (A1) e (A2) (Figura 156).

A maior aplicação do DIAC é como elemento de disparo de um TRIAC. O circuito da Figura 157 faz o controle de iluminação de uma lâmpada utilizando um DIAC para disparar o TRIAC.

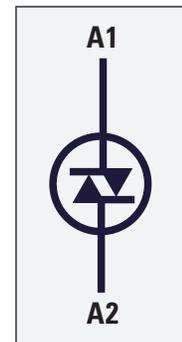


Figura 156 - Símbolo do DIAC

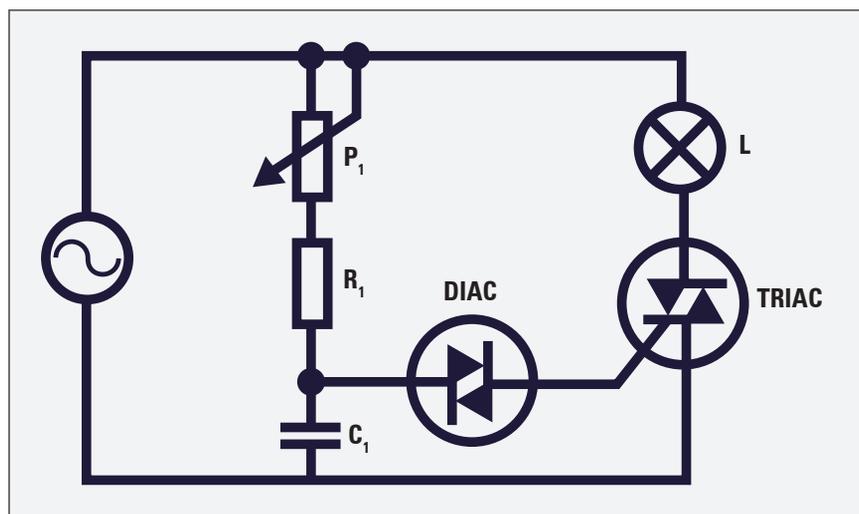


Figura 157 - Aplicação do TRIAC

O DIAC é utilizado como elemento de disparo em um circuito para utilizar tensões de disparo com valores maiores, exercendo melhor controle da potência aplicada à carga. Por esse motivo, ele é comumente utilizado em circuitos de controle de velocidade, iluminação e aquecimento.

3.2.4 Quadrac

Quadrac (Figura 158) é um dispositivo eletrônico formado pela junção de um TRIAC e um DIAC no mesmo invólucro. É aplicado em circuitos de controle de potência como *dimmers* e chuveiros.

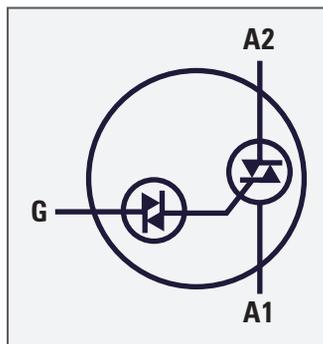


Figura 158 - Símbolo do quadrac

3.2.5 Diodo Shockley

Shockley é um diodo (Figura 159) de quatro camadas com apenas dois terminais: anodo e catodo. Seu funcionamento se assemelha ao do SCR, mas, por não ter o terminal de gatilho, não há a necessidade de um pulso de disparo.

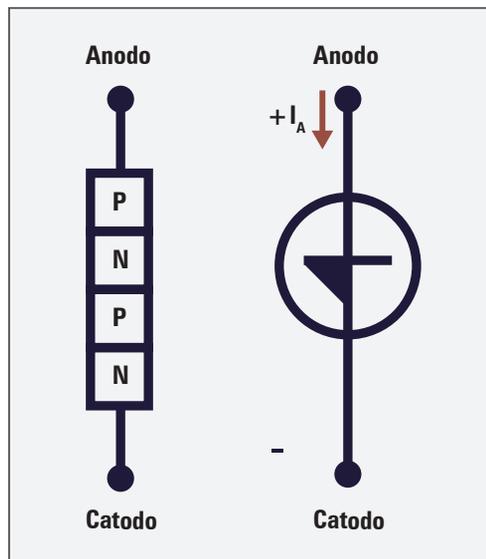
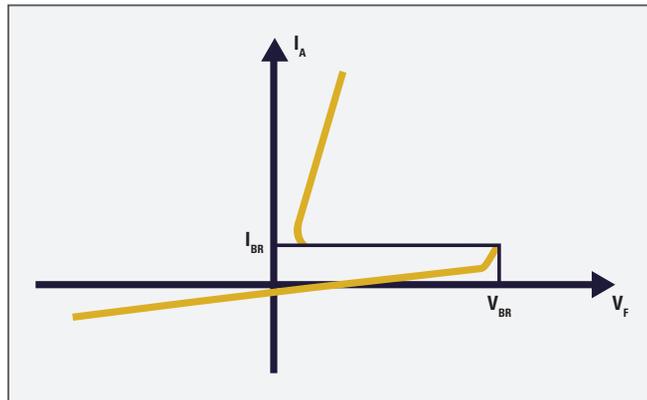


Figura 159 - Símbolo do diodo Shockley

A curva característica do diodo demonstra seu funcionamento. Quando a tensão entre anodo e catodo atinge o valor da tensão de ruptura (V_{BR}), o diodo se comporta como uma chave fechada e conduz corrente, conforme o Gráfico 29.

GRÁFICO 29 - Curva característica



O diodo Shockley é muito utilizado como elemento de disparo do SCR. No circuito da Figura 160, quando a tensão do capacitor atinge a tensão de ruptura do diodo (V_{BR}), o Shockley conduz e permite a passagem de um pulso positivo no gatilho do SCR, fazendo-o disparar. A partir desse momento, o SCR conduz e a corrente circula pela carga, não havendo a necessidade de outros pulsos de disparo.

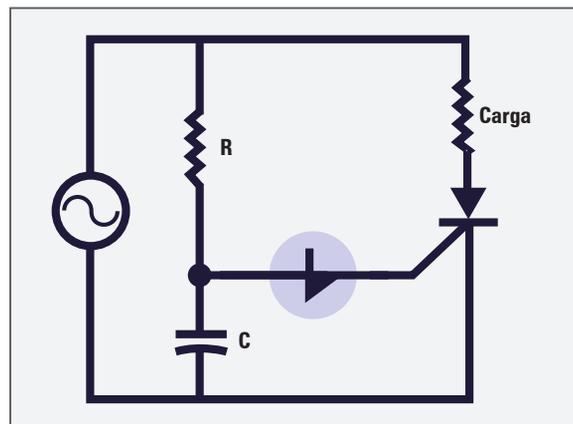


Figura 160 - Aplicação do diodo Shockley

3.2.6 Diodo túnel

O diodo túnel é um dispositivo de dois terminais e possui vários símbolos, conforme a Figura 161.

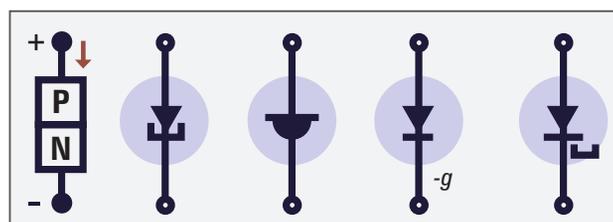


Figura 161 - Símbolos do diodo túnel

Esse componente apresenta uma característica que o diferencia dos outros diodos, chamada de região de resistência negativa. Nessa região, o aumento da tensão nos terminais do diodo resulta em diminuição da corrente que passa por ele.

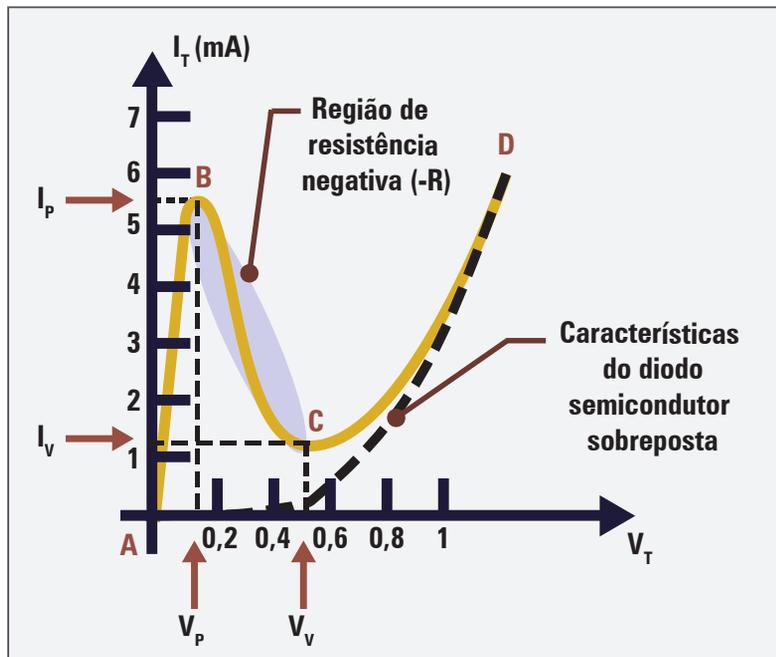


Figura 162 - Curva característica do diodo túnel

Essa característica do diodo túnel é devido ao fato de ele receber uma dopagem muito alta em seu processo de fabricação, chegando a ser até mil vezes maior que a de um diodo comum. O alto nível de dopagem acarreta uma barreira de potencial muito fina, facilitando a passagem dos elétrons a altas velocidades. Por essa razão, são empregados em circuitos de computadores que trabalham com taxas de transmissão superiores a 1 giga-hertz.

A análise do funcionamento do diodo túnel é baseada na curva característica da Figura 162. Polarizando-o diretamente, ele se comporta como um diodo comum, até que a tensão sobre ele atinja o valor de pico (ponto B). A partir desse ponto, ele atua na região de resistência negativa, em que um aumento da tensão resulta em diminuição da corrente até atingir o ponto de vale (ponto C). Após esse ponto, ele volta a se comportar como um diodo comum, em que um aumento da tensão ocasiona aumento da corrente (do ponto C ao D).

As maiores aplicações do diodo túnel estão nos circuitos osciladores. Como oscilador de relaxação, consegue trabalhar com velocidades superiores aos transistores de unijunção (TJU).

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que os transistores de efeito de campo de junção (JFET) são componentes também semicondutores que possuem a característica de elevada impedância de entrada e características de amplificação, assim como os transistores. Eles podem ser do tipo canal (**N**) ou (**P**).

Estando o JFET polarizado com tensões contínuas, poderá executar funções como amplificador de sinais alternados. A evolução do JFET gerou outros tipos de transistores de efeito de campo como o MOSFET. É possível que este seja de canal (**N**) ou (**P**), possui impedância muito maior que o JFET comum e, devido às características de fabricação, trabalha com maiores potências dissipadas, o que o torna um componente muito utilizado para aplicações de potência.

Os dispositivos de controle como SCR, TRIAC, DIAC e outros são componentes fundamentais ao controle de equipamentos elétricos como motores, lâmpadas, sistemas de ventilação, diversos recursos que necessitam um controle de potência aplicada.

Capítulo 4

Sensores eletrônicos

O princípio de funcionamento de um sensor consiste em alterar uma característica interna em função de alguma modificação no ambiente ou no circuito onde está instalado. Os sensores eletrônicos estão presentes nos mais diversos equipamentos. Os carros e aviões mais modernos possuem um grande número de sensores para indicar nível de combustível, temperatura do motor, temperatura externa e outros. Essas informações são importantes pois garantem segurança para motoristas, pilotos e passageiros.

No campo da segurança, os sensores são largamente aplicados em sistemas de alarmes residenciais, contra incêndio, em salas de estoque e em sistema de iluminação, o tipo de sensor a ser utilizado depende de cada aplicação.

4.1 Sensor de umidade

O sensor de umidade (Figura 163) varia sua resistência interna em função da umidade relativa do ar (URA). A variação da umidade é inversamente proporcional à variação da resistência do sensor, quanto maior a URA, menor a resistência.

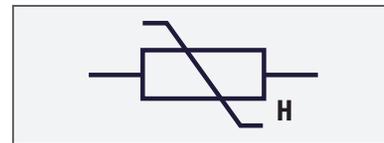


Figura 163 - Sensor de umidade

Este sensor é utilizado em locais onde é necessário o controle da umidade, como, por exemplo, nos estoques de alimentos. Para isso, é necessário um circuito que informe que a URA não está dentro dos limites estipulados.

Na Figura 164, tem-se um circuito programado para apontar quando a URA está acima do limite estipulado. O aumento da URA diminui a resistência do sensor, resultando no aumento da corrente de base (I_b) e da polarização direta da junção base-emissor de (Q_1). O aumento de (I_b) ocasiona o aumento de (I_c), que produz valor de corrente para acionar o relé, criando um caminho para a corrente fluir e ativar o alarme.

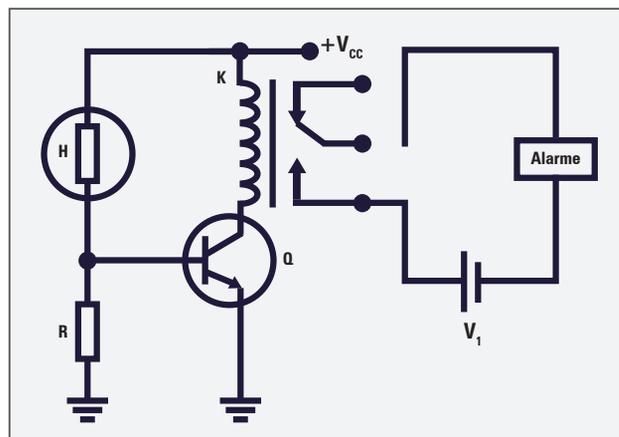


Figura 164 - Detector de variação de URA

4.2 Varistor

É um sensor que varia sua resistência em função da tensão. A resistência do varistor é inversamente proporcional à tensão aplicada sobre ele. Assim, a resistência diminui à medida que aumenta a tensão aplicada. É conhecido como *voltage dependent resistor* (VDR), em português, resistor dependente de tensão (Figura 165).

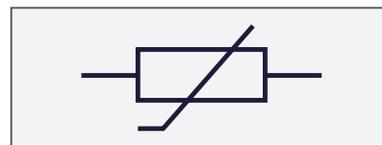


Figura 165 - Símbolo do VDR

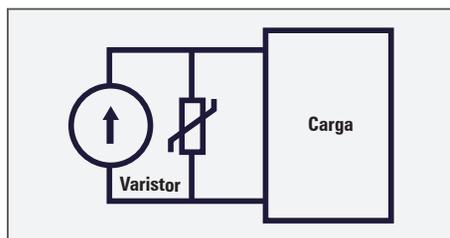


Figura 166 - Aplicação do VDR

Varistores funcionam como elementos de proteção dos equipamentos. Como a tensão da rede oscila bastante, são utilizados para não deixar que os picos de tensão ou descargas elétricas de curta duração danifiquem os aparelhos eletrônicos. Sua maior aplicação encontra-se nos **filtros de linha**, sendo colocados em paralelo com a carga (Figura 166).

4.3 Termistores

Termistor é o sensor que varia sua resistência em função da temperatura.

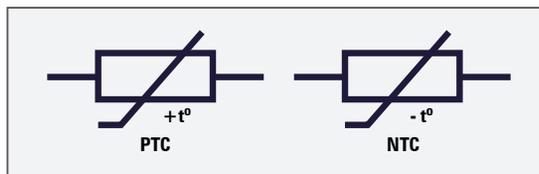
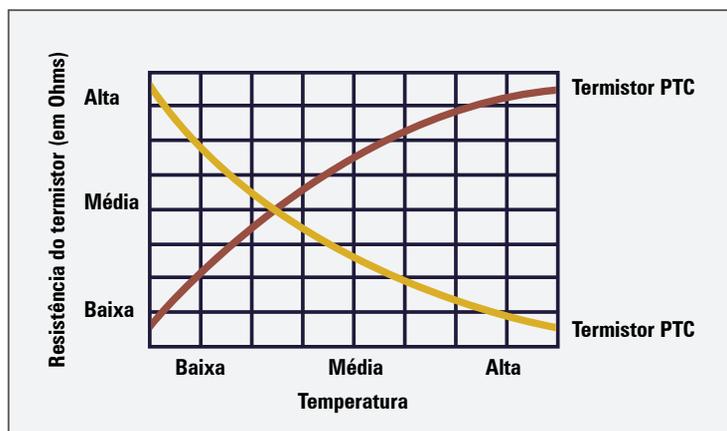


Figura 167 - Símbolo do termistor

Existem dois tipos de termistores: PTC e NTC (Figura 167). O termistor PTC possui o coeficiente de temperatura positivo, sua resistência aumenta com o aumento da temperatura. Enquanto o NTC possui o coeficiente de temperatura negativo, sua resistência diminui à medida que a temperatura aumenta (Gráfico 30).

GRÁFICO 30 - Comportamento dos termistores PTC e NTC



Filtro de linha: é utilizado para proteger equipamentos de sobrecarga de corrente. Possui um fusível como elemento de proteção. É conhecido como régua.

A aplicação dos termistores está voltada a circuitos que necessitam de controle da temperatura. Exemplos comuns são locais refrigerados e circuitos contra incêndio em lojas. A escolha de qual termistor utilizar depende do projeto do circuito.

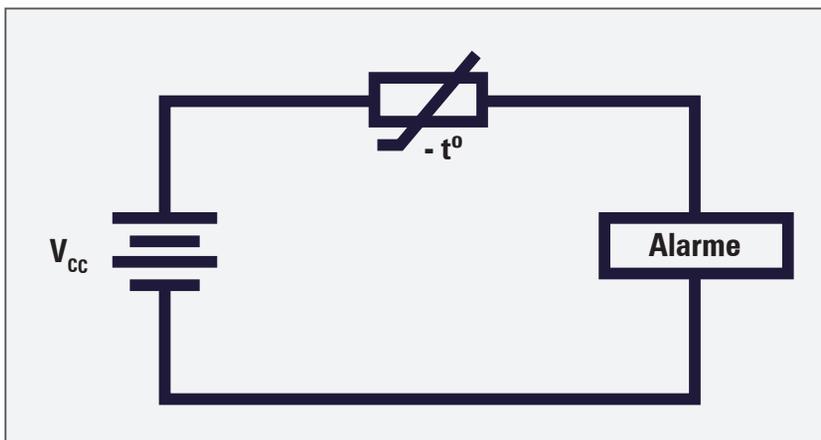


Figura 168 - Controle de temperatura de ambiente

No circuito mostrado na Figura 168, o aumento da temperatura acarreta diminuição da resistência do NTC. Isso provoca aumento na corrente e, conseqüentemente, aciona o alarme.

4.4 Termopar

Termopar (Figura 169) é um dispositivo elétrico utilizado para medir a temperatura de um determinado ponto. É constituído de dois metais diferentes que formam um circuito fechado por intermédio da união de suas extremidades, gerando tensão elétrica em função da temperatura. É muito utilizado pelo baixo custo e pela eficiência, haja vista que cobre uma grande faixa de temperatura (-200° a 2.300°) com uma margem de erro pequena. Possui vários formatos e tamanhos disponíveis no mercado.

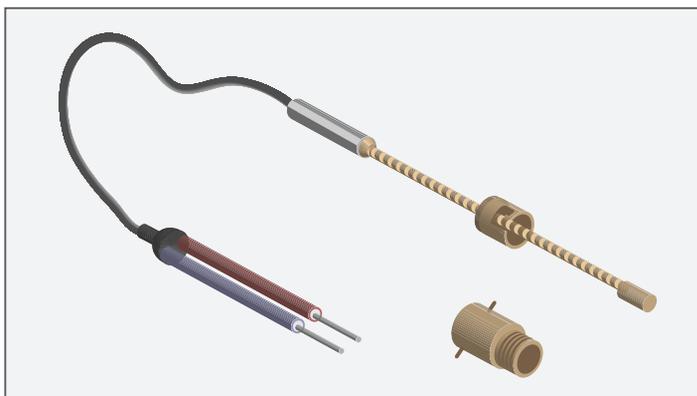


Figura 169 - Termopar

A junção de uma das extremidades desses dois metais recebe o nome de junção de medição e fica exposta à variação de temperatura. A outra, chamada de junção de referência, é ligada a um

aparelho que indica o valor de tensão proporcional à diferença de temperatura entre (T_1) e (T_2), conforme a Figura 170.

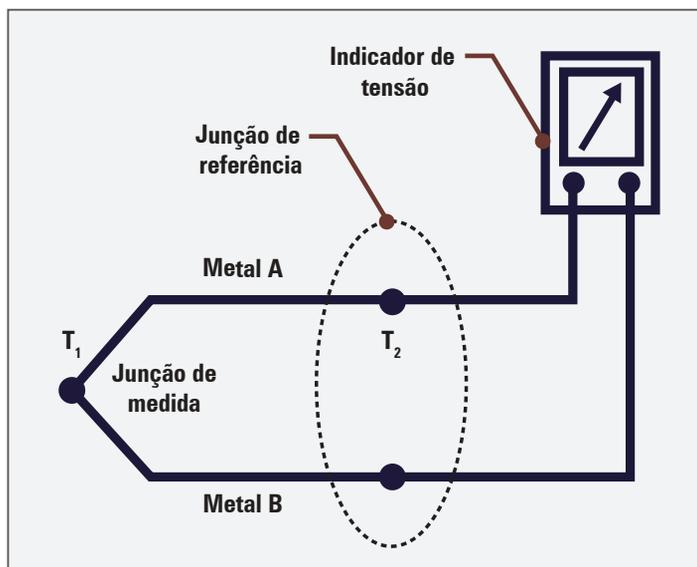


Figura 169 - Termopar

A Tabela 4 mostra alguns tipos de termopares e a faixa de temperatura na qual eles trabalham.

Tabela 5 - Tipos de termopares

Nome	Constituição	Gama de temperatura
B	Platina/30% ródio-platina	0-1.800 °C
C	Tung-5% rênio/Tung-26% rênio	0-2.320 °C
E	Cromel/Constantã	-270-1.000 °C
G	Tungstênio/Tung-26% rênio	0-2.300 °C
J	Ferro/Constantã	-210-750 °C
K	Cromel/Alumel	-270-1.370 °C
N	Nicrosil/Nisil	-270-1.300 °C
R	Platina/13% ródio-platina	-50-1.750 °C
S	Platina/10% ródio-platina	-50-1.750 °C
T	Cobre/Constantã	-270-400 °C

Constantã = Cobre-níquel
 Alumel = Níquel-alumínio
 Nisil = Ni-Si-Mg
 Cromel = Níquel-crômio
 Nicrosil = Ni-Cr-Si

Fonte: SILVA, 2016, p. 8.

Na aviação, é muito comum o emprego de termopares para controle de temperatura dos diversos equipamentos da aeronave. A escolha do termopar depende da aplicação e da faixa de temperatura de trabalho, conforme visto na Tabela 5.

4.5 Dispositivos fotossensíveis

Dispositivos fotossensíveis alteram suas características quando submetidos a fluxo luminoso. Nesse grupo, estão incluídos os fotorresistores, os fotodiodos, os fototransistores e as células fotovoltaicas.

I - Fotorresistor

O fotorresistor, resistor dependente de luz, em inglês, *light dependent resistor* (LDR), diminui sua resistência quando aumenta a incidência de luz sobre ele. É comumente usado em circuitos de alarme (Figura 171).

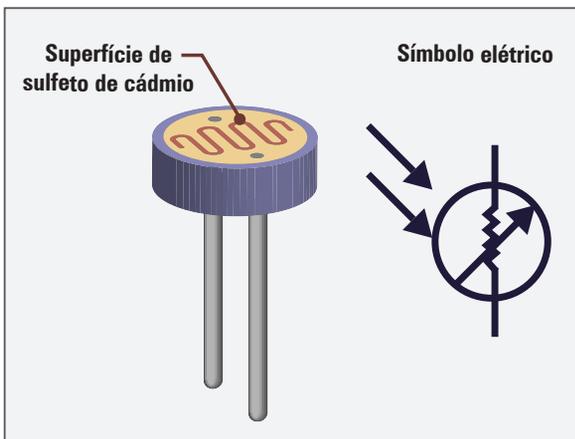
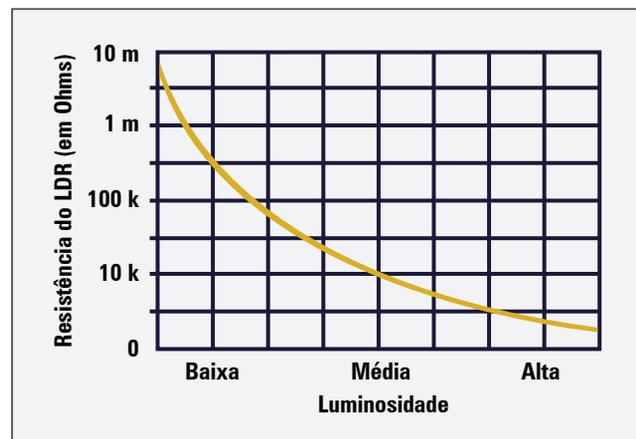


Figura 171 - Símbolo do LDR

GRÁFICO 31 - Comportamento do fotorresistor



No circuito demonstrado na Figura 172, havendo incidência de luz sobre o LDR, sua resistência diminui e a corrente aumenta, energizando o relé. No ponto em que o relé está ligado, pode-se ligar um circuito de alarme com uma lâmpada piscando na tela de um computador ou uma campainha ou buzina como alarme sonoro. A configuração do circuito a ser ligado fica a critério de quem monta o circuito e dos componentes que ele tem à disposição.

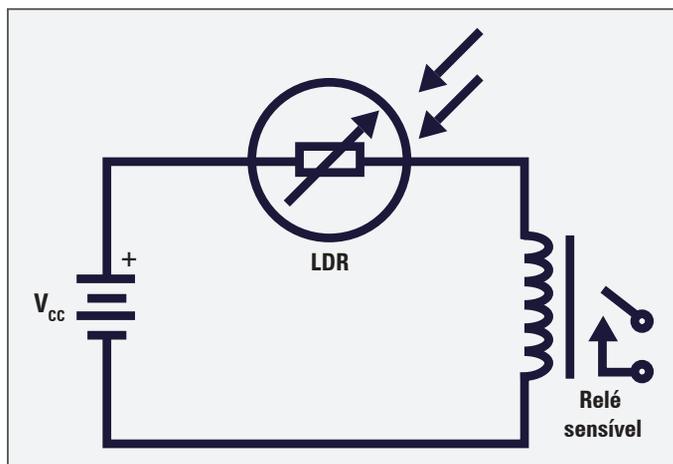


Figura 172 - Sistema de alarme com LDR

II - Fotodiodos

Fotodiodo (Figura 173) diminui sua resistência interna quando aumenta a incidência de luz sob a junção (PN). Funcionam da mesma forma que os diodos, diferenciando-se apenas pela influência da luz, que entra por meio de uma janela adaptada na parte superior do seu invólucro.

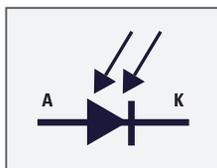


Figura 173 - Símbolo do fotodiodo

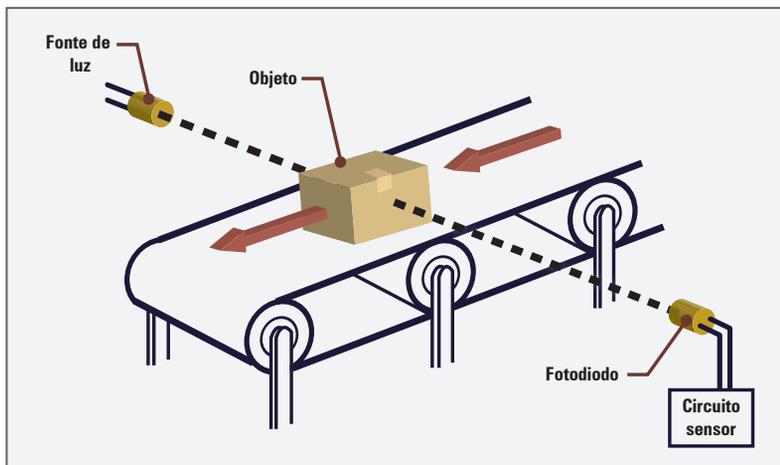


Figura 174 - Aplicação do fotodiodo

O fotodiodo é polarizado inversamente e tem a mesma função que um fotorresistor.

No circuito da Figura 174, o fotodiodo recebe o fluxo luminoso da fonte de luz do outro lado da esteira. Porém, no momento em que o objeto passa na frente da fonte de luz, o fotodiodo deixa de receber por alguns instantes o fluxo luminoso e sua resistência aumenta, acionando um circuito associado ao sensor.

III - Fototransistores

Fototransistores funcionam de maneira análoga aos transistores (Figura 175). A diferença é que sua junção base-coletor é fotossensível, quando há incidência de luz nessa junção, sua **condutividade** se eleva, resultando em aumento de (I_B) e, conseqüentemente, aumento de (I_C). Eles são NPN ou PNP e, quanto maior o fluxo luminoso, maior é a corrente (I_C). Sua principal vantagem, quando comparado ao fotodiodo, é fornecer corrente muito maior para as mesmas condições de luminosidade.

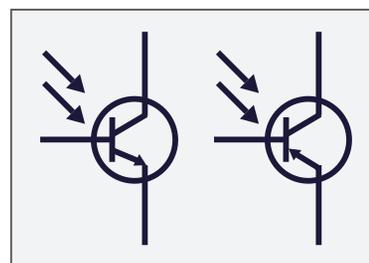


Figura 175 - Símbolo do fototransistor



Condutividade: característica que os materiais apresentam em relação à capacidade de conduzir corrente. É o inverso da resistividade e está relacionado ao tipo de material utilizado. O cobre e a prata são exemplos de materiais com alta condutividade.

Uma importante aplicação do fototransistor é nos circuitos optoacopladores, também conhecido como isolador ótico acoplado. Tem como função isolar eletricamente dois circuitos eletrônicos, mantendo a comunicação entre ambos. É composto de um LED e um fototransistor (Figura 176).

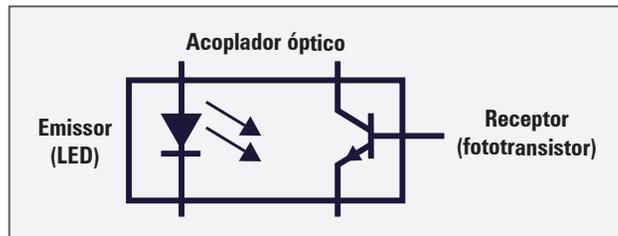


Figura 176 - Optoacoplador

O isolamento é garantido porque não há contato elétrico entre os componentes (Figura 177).

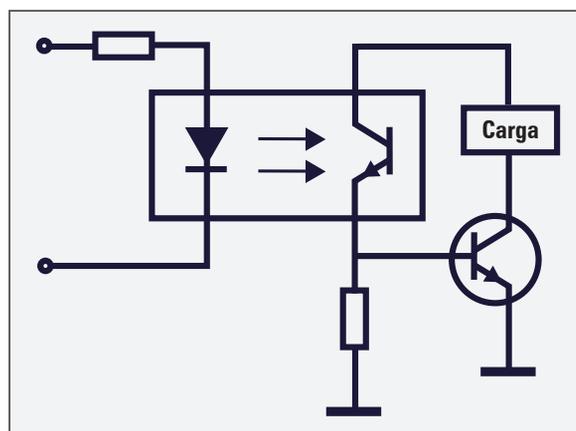


Figura 177 - Circuito com optoacoplador

IV - Células fotovoltaicas

Células fotovoltaicas (Figura 178) funcionam de forma diferente dos dispositivos fotossensíveis descritos anteriormente. Elas produzem tensão elétrica quando submetidas a um fluxo luminoso. Por esse motivo, tem grande aplicação em baterias e painéis solares, fornecendo tensão para alimentar diversos equipamentos.

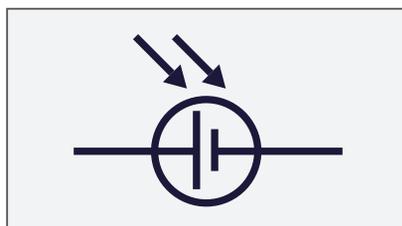


Figura 178 - Célula fotovoltaica

Uma das maiores aplicações da célula fotovoltaica está nos painéis solares. Elas transformam a luz do sol em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, que consiste em transferir a energia que a célula fotovoltaica absorveu para os elétrons se movimentarem. Esse movimento

nada mais é do que a corrente elétrica. A corrente alimenta os aparelhos eletrônicos nas residências e diminui o consumo de energia da rede pública. Atualmente, o silício é o material mais utilizado nessas células.

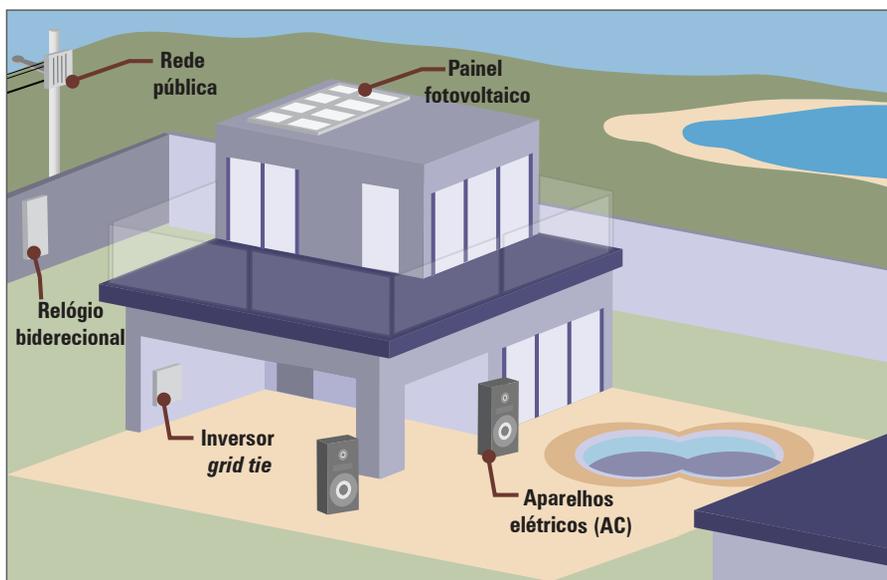


Figura 179 - Painel fotovoltaico

Resumindo

Neste capítulo, foram abordados os sensores eletrônicos e suas aplicações. Cada sensor apresenta um comportamento em virtude de uma alteração de fatores externos ou do próprio circuito, dependendo do modelo. Os exemplos apresentados fazem com que a compreensão do assunto se torne mais fácil e permite ao técnico adaptá-los aos equipamentos para aumentar os níveis de segurança e proteção a eles.

Alguns sensores apresentados são muito utilizados em equipamentos residenciais e aeronaves. São essenciais à segurança de instalações e a procedimentos de voo, fornecendo informações de extrema importância para o piloto. Mediante esses dados, decisões são tomadas com precaução e acidentes evitados.

Capítulo 5

Eletrônica integrada

Microeletrônica é a área da eletrônica que trata da miniaturização de componentes e equipamentos eletrônicos. Consiste, também, em integrar milhares de componentes dentro de um mesmo invólucro, por meio de um processo especial de várias etapas. A microeletrônica permite equipamentos cada vez menores, mais eficazes e potentes. Atualmente, ela trabalha com escalas na ordem dos nanômetros, e também é conhecida como nanotecnologia. Os equipamentos que são fabricados com essa tecnologia têm como característica principal o tamanho muito reduzido, porém desempenhando funções cada vez mais complexas. A nanotecnologia é responsável por apresentar grandes avanços tecnológicos do momento, levando cada vez mais conforto e praticidade para a sociedade atual.

5.1 Circuito integrado

Circuito integrado (CI) é um componente eletrônico que integra uma grande quantidade de resistores, capacitores e transistores em uma única pastilha de silício com tamanho extremamente reduzido (Figura 180). Ele apresenta as mesmas funções que os circuitos convencionais, porém com menor volume, elevada confiabilidade e baixo custo de produção.

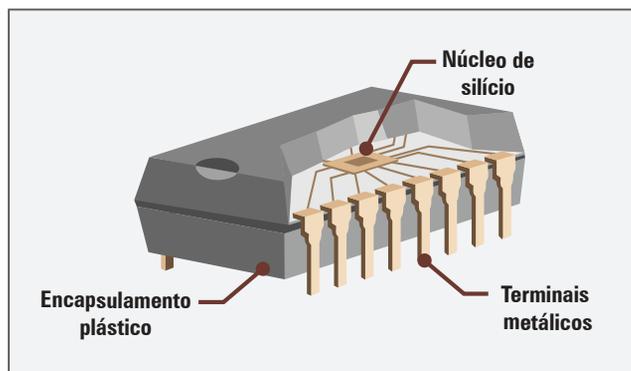


Figura 180 - Circuito integrado

O circuito integrado é comumente associado ao termo microeletrônica. Entretanto, esses dois termos possuem conceitos diferentes. Microeletrônica se refere à montagem de circuitos com componentes extremamente pequenos que podem ser separados e substituídos. Por outro lado, o circuito integrado concerne a um conjunto inseparável de componentes dentro de uma única estrutura; se for dividido, perde suas propriedades eletrônicas.

Os CIs são divididos em dois grupos: monolíticos e híbridos. Os monolíticos são aqueles que integram os componentes em uma única pastilha de silício. Os híbridos utilizam várias pastilhas de silício dispostas no mesmo invólucro. O processo de fabricação de um CI é realizado em algumas etapas e existem diferentes técnicas com objetivos e custos específicos para cada tipo.

5.1.1 Técnica de fabricação de um circuito integrado

Seguem as etapas do processo de fabricação do CI.

I - Preparação do *wafér*

A primeira etapa do processo de fabricação de um CI é a preparação da bolacha, comumente chamada do termo inglês *wafér*. O *wafér* é o principal elemento de um CI, pois sobre ele são implantados componentes como resistores, capacitores e transistores. O *wafér* é extraído do silício puro e sofre o processo de dopagem para a inserção dos componentes.

II - Oxidação

É o processo químico para formar o dióxido de silício por meio da reação do silício com o oxigênio. Consiste em aquecer a bolacha a altas temperaturas em um forno especial. Serve para proteger o material contra impurezas.

III - Difusão

É o processo de inserção de impurezas na bolacha, sendo o boro e o fósforo as mais comuns. O boro é do tipo (P) e o fósforo do tipo (N), podendo formar a estrutura (NPN) de um transistor. Além da difusão, impurezas são adicionadas pela implantação de íons, multiplicando o nível destas e exercendo um controle preciso do nível da dopagem.

IV - Deposição

É o processo em que gases ou vapores reagem quimicamente para formar o elemento sólido ou um substrato.

V - Metalização

Tem como objetivo interligar os componentes internos de um CI e formar o circuito desejado. O metal é depositado sobre a superfície do silício e cria uma camada de alumínio sobre ele.

VI - Encapsulamento

Este é o último processo na fabricação do CI. O encapsulamento serve para dissipar o calor e proteger o CI do meio ambiente e contra choques mecânicos. Cada encapsulamento possui características específicas e a contagem dos pinos é feita de modo peculiar. É necessário conhecer a numeração da pinagem para que o CI seja colocado de forma correta na placa do circuito impresso. A seguir, estão os encapsulamentos mais comuns.

a) *Single in line* (SIL) - possui uma fileira de pinos e a contagem é feita da esquerda para a direita quando se está de frente para o CI (Figura 181).

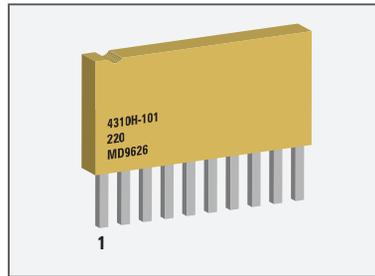


Figura 181 - Encapsulamento SIL

b) *Dual in line package* (DIP) - possui duas colunas de terminais em paralelo e a contagem é feita, a partir de um guia no sentido anti-horário, com os terminais do CI voltados para baixo (Figuras 182.A e 182.B).

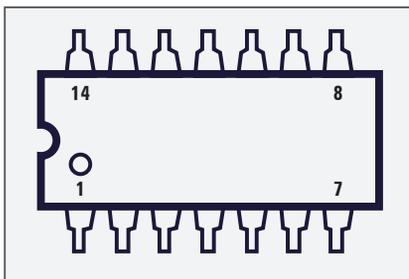


Figura 182.A - Visão superior do encapsulamento DIP

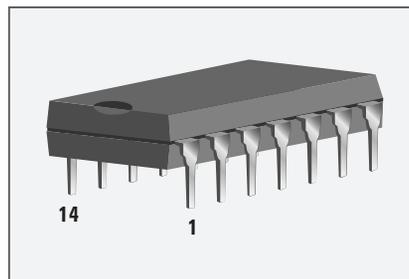


Figura 182.B - Visão lateral do encapsulamento DIP

c) (TO) - possui um corpo cilíndrico metálico com os pinos dispostos em uma linha circular e a contagem é feita a partir de um guia no corpo metálico, no sentido horário com o componente da Figura 183.

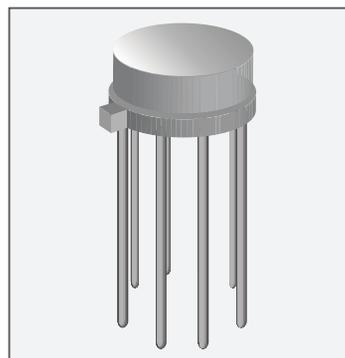


Figura 183 - Encapsulamento (TO)

Os circuitos integrados (Figuras 184, 185, 186) apresentam a tecnologia de montagem em superfície, em inglês, *surface mount technology* (SMT), sendo conhecidos como dispositivos de montagem de superfície, em inglês, *surface mount device* (SMD).

d) *Small outline integrated circuit* (SOIC) - é um encapsulamento DIP com os terminais para superfície (Figura 184).

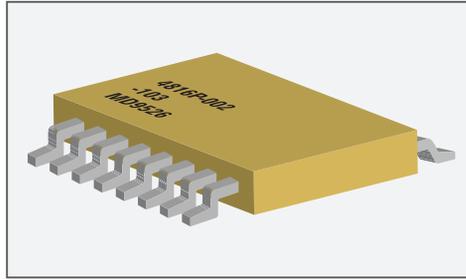


Figura 184 - Encapsulamento SOIC

e) *Plastic leaded chip carrier* (PLCC) - possui terminais nos quatro lados com o corpo de plástico, podendo ser quadrados ou retangulares (Figura 185). Os terminais são conectados em superfície.

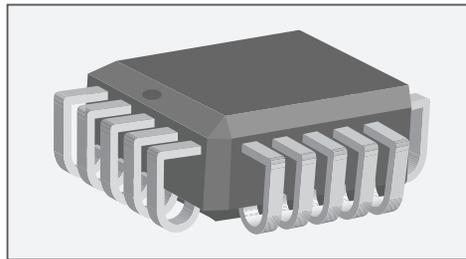


Figura 185 - Encapsulamento PLCC

f) *Pin grid array* (PGA) - é um encapsulamento com grande número de pinos em sua estrutura, muito comum em processadores de computador (Figura 186).

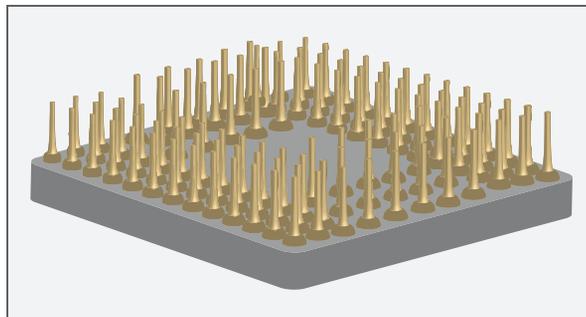


Figura 186 - Encapsulamento PGA

5.1.2 Aplicações dos CIs

Os circuitos integrados são utilizados em diversas aplicações no campo da eletrônica e da informática, devido à grande diversidade de modelos. A capacidade de integração faz com que um único CI substitua até milhares de transistores, proporcionando equipamentos cada vez mais eficientes e menores. Uma importante aplicação é o CI regulador de tensão, substituindo o diodo zener com mais precisão e tornando o circuito mais compacto.

As séries 78XX e 79XX são muito empregadas nas fontes de alimentação. Os dois primeiros números indicam qual tipo de tensão é fornecida na saída. A série 78 fornece tensão positiva e a 79, tensão negativa. Os dois últimos números apontam o valor de tensão que é fornecido na saída. Assim, o CI 7805 oferece tensão de +5 V na saída, enquanto o 7912 -12 V (Figuras 187.A e 187.B).

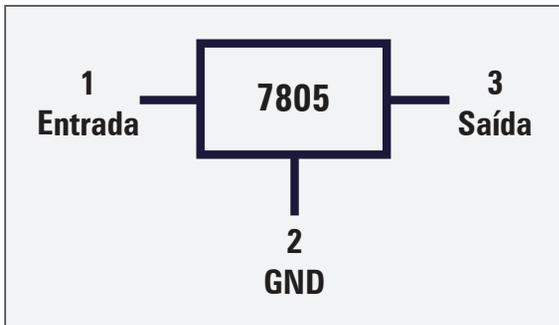


Figura 187.A - CI regulador de tensão positivo

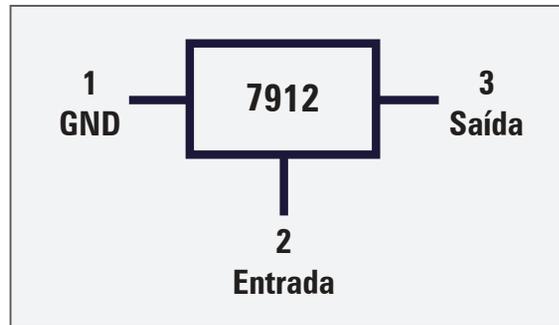


Figura 187.B - CI regulador de tensão negativo

É importante observar que as funções dos pinos 1 e 2 nos CIs da série 78 são opostas aos da série 79. No CI 7805, o pino 1 é a entrada e o pino 2 é o ponto comum ou (GND). Por outro lado, no CI 7912, o pino 1 é o ponto comum ou (GND), enquanto o pino 2 é a entrada. O pino 3 é a saída para ambos CIs.

Na Figura 188, o CI regulador é utilizado em uma fonte de alimentação que fornece a tensão de saída igual a +5 V. Um aspecto a ser notado nesse circuito é que a tensão que chega no pino 1 do CI (entrada ou IN) precisa ser ligeiramente maior que o valor fornecido na saída, em virtude de perdas internas.

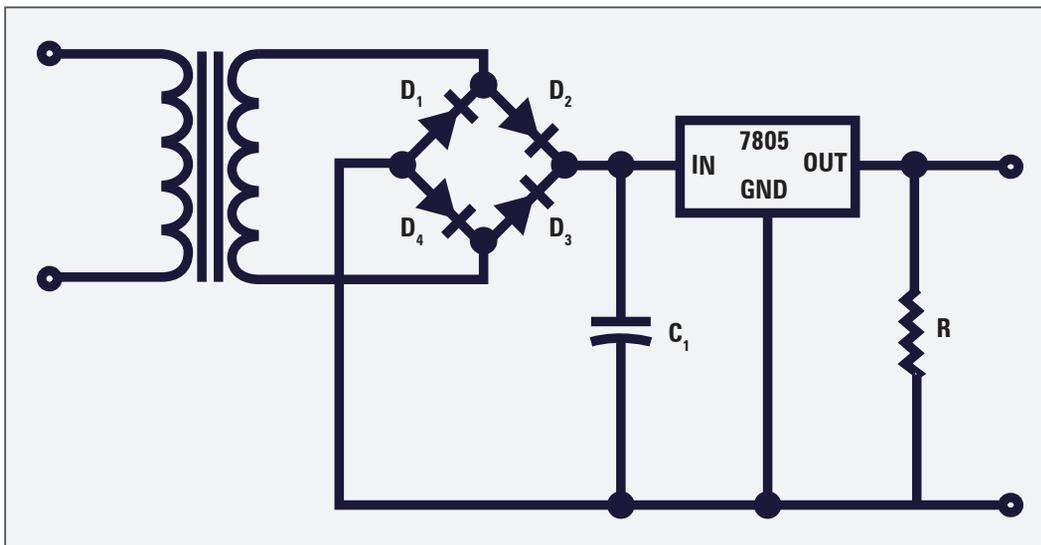


Figura 188 - Fonte de alimentação com regulador a CI

5.2 Amplificadores operacionais

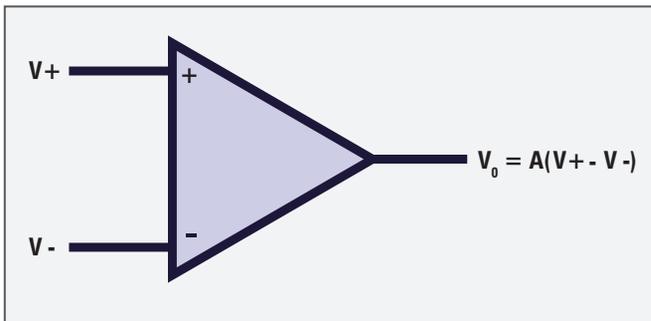


Figura 189 - Amplificador operacional

O amplificador operacional possui duas entradas ($V+$ e $V-$) e uma saída (V_o). A entrada ($V+$) recebe o nome de entrada não inversora e a ($V-$) é a entrada inversora. Assim, a tensão de saída (V_o) pode estar em fase ou defasada de 180° da tensão de entrada, dependendo de qual entrada o sinal é aplicado. A função do AO é apresentar na saída a diferença entre as entradas multiplicada pelo ganho (A) dele.

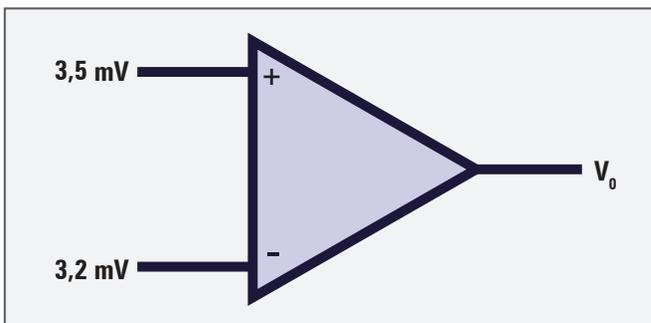


Figura 190 - Exercício amp-op (1)

A tensão de saída mantém a fase da tensão de entrada de maior valor. Nesse caso, foi a entrada não inversora, por isso o resultado é positivo. Por outro lado, na Figura 191, as entradas estão invertidas e o sinal de maior valor está sendo aplicado à entrada inversora. O valor da tensão de saída é o mesmo, porém defasado de 180° (valor negativo).

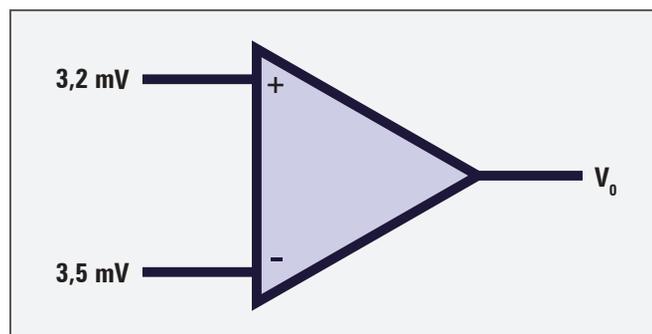


Figura 191 - Exercício amp-op (2)

$$V_o = A (V+ - V-) = 10.000 (-0,3 \times 10^{-3}) = -3 \text{ V}$$

Os amplificadores operacionais (AO), também conhecidos como amplificadores operacionais ou amp-op (Figura 189), são circuitos integrados compostos de resistores, transistores e capacitores e utilizados em diversas aplicações no campo da eletrônica. Por ter sido empregado para realizar operações matemáticas, como soma e integração, nos computadores do passado, recebeu o nome de amplificador operacional. É aplicado em diversos tipos de circuitos e se destaca pela versatilidade.

Exemplo: Qual o valor da tensão de saída (V_o) para o circuito da Figura 190 considerando (A) igual a 10.000?

Realizando a diferença entre as entradas ($3,5 \text{ mV} - 3,2 \text{ mV}$) e multiplicando pelo ganho (A) (10.000), tem-se:

$$V_o = A (V+ - V-) = 10.000 (0,3 \times 10^{-3}) = 3 \text{ V}$$

O ganho (**A**) do AO é, normalmente, um valor muito alto, pelo fato de ser utilizado para amplificar sinais muito pequenos. As características de um AO ideal são estas:

- ganho de tensão infinito (**Av**);
- resposta de frequência infinita (**BW**);
- impedância de entrada infinita (**Zi**);
- impedância de saída nula (**Zo**).

Uma grande vantagem do AO é que as características do amplificador real são próximas das características do componente ideal.

5.2.1 Aplicações do AO

Pela sua versatilidade, o AO é empregado em diversos circuitos eletrônicos. Destaca-se em aplicações como circuitos amplificadores, somadores, diferenciadores, integradores e filtros. Algumas delas são detalhadas a seguir.

- a) Amplificador - a aplicação mais elementar do AO é como amplificador. O sinal é aplicado em uma entrada e a outra é aterrada, conforme a Figura 192.

O ganho de tensão (**Av**) é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$A_v = \frac{R_2}{R_1}$$

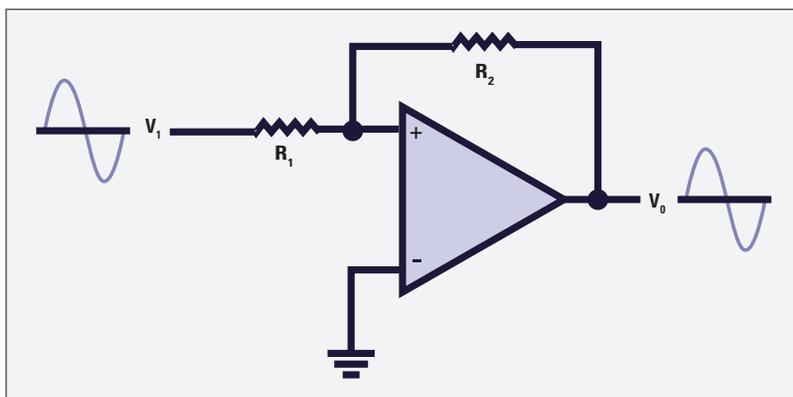


Figura 192 - Amplificador com amp-op

Se o sinal for aplicado na entrada inversora, a saída é defasada e a fórmula do ganho recebe o sinal negativo. Esse circuito é conhecido como amplificador inversor (Figura 193).

$$A_v = - \frac{R_2}{R_1}$$

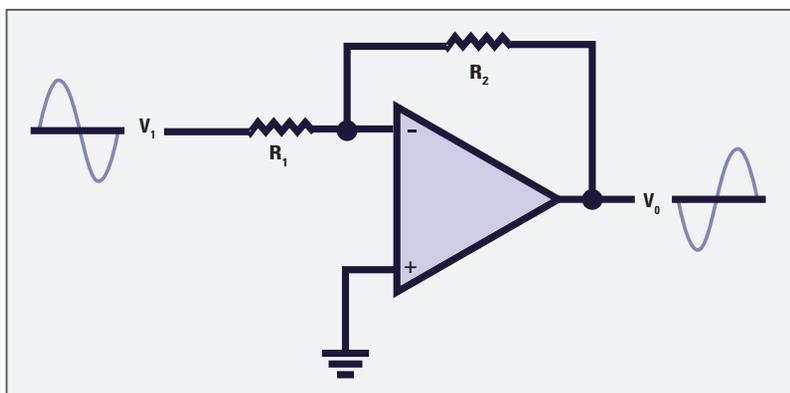


Figura 193 - Amplificador inversor

b) Comparadores - a aplicação do AO como comparador tem como finalidade a conversão de sinais analógicos em digitais. Como a tensão de saída é a diferença das tensões da entrada inversora e da não inversora, aplica-se um sinal conhecido (referência) em uma das entradas e um outro desconhecido na outra entrada. De acordo com o valor do sinal de saída, é possível saber se o sinal desconhecido é menor, igual ou maior que o sinal de referência. Na Figura 194, o sinal de referência foi aterrado (0 V) e o sinal desconhecido (V_x) foi aplicado à entrada não inversora. A função desse circuito é saber se o sinal (V_x) é maior, igual ou menor que (0 V).

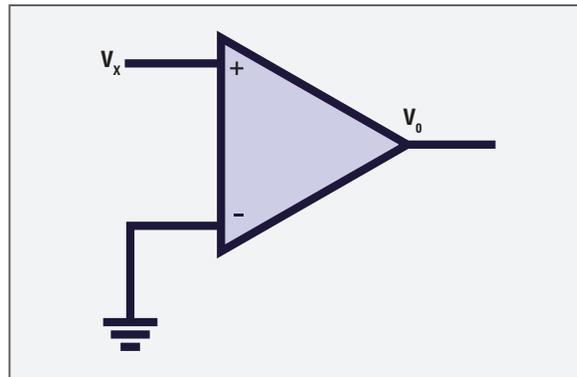


Figura 194 - Comparador

Analisando o circuito da Figura 194, se (V_x) for igual a (0 V), a saída é igual a (0 V) também. A saída é positiva para (V_x) maior que (0 V), e negativa quando (V_x) é menor que (0 V). Assim:

$$V_x = 0\text{ V} \rightarrow V_o = 0\text{ V} \quad V_x > 0\text{ V} \rightarrow V_o = +V \quad V_x < 0\text{ V} \rightarrow V_o = -V$$

No circuito da Figura 195, o sinal desconhecido (V_x) foi aplicado à entrada inversora.

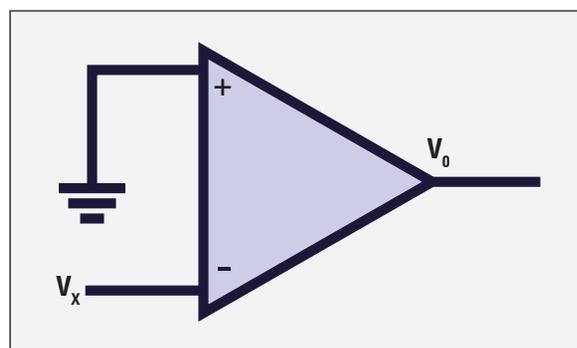


Figura 195 - Comparador inversor

Analisando o circuito anterior, se (V_x) for igual a (0 V), a saída é igual a (0 V). A saída é positiva para o caso em que (V_x) for menor que (0 V), e negativa quando (V_x) for maior que (0 V). Nesse caso, como o sinal foi aplicado à entrada inversora, a saída é defasada de 180°. Assim:

$$V_x = 0\text{ V}, V_o = 0\text{ V} \quad V_x > 0\text{ V}, V_o = -V \quad V_x < 0\text{ V}, V_o = +V$$

c) Somadores - o AO é empregado na função de somador nos circuitos que convertem sinais digitais em sinais analógicos (Figura 196).

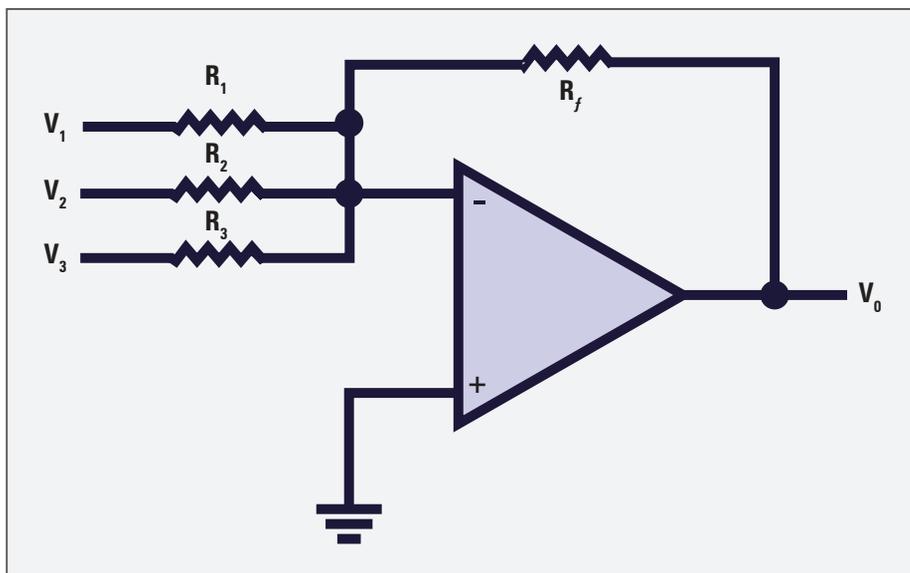


Figura 196 - Somador inversor

Esse circuito soma algebricamente as tensões da entrada multiplicadas pelo ganho do circuito. A tensão de saída é representada pela seguinte equação:

$$V_0 = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \right)$$

A cada resistor acrescentado à entrada do circuito, um novo componente é adicionado à fórmula supracitada. O sinal negativo na equação representa que as entradas estão sendo aplicadas à entrada inversora do AO. Caso empregadas na entrada não inversora, esse sinal não existe na equação.

5.2.2 Limitações

Os circuitos estudados apresentaram os valores do ganho referentes à relação entre o resistor de realimentação e os outros existentes nos circuitos. Essa configuração recebe o nome de

malha fechada (Figuras 197.A e 197.B) e o valor do ganho é limitado. Por outro lado, o AO ideal apresenta a característica de ter o ganho infinito, porém isso só é possível se o AO estiver configurado em malha aberta, ou seja, sem o resistor de realimentação no circuito.

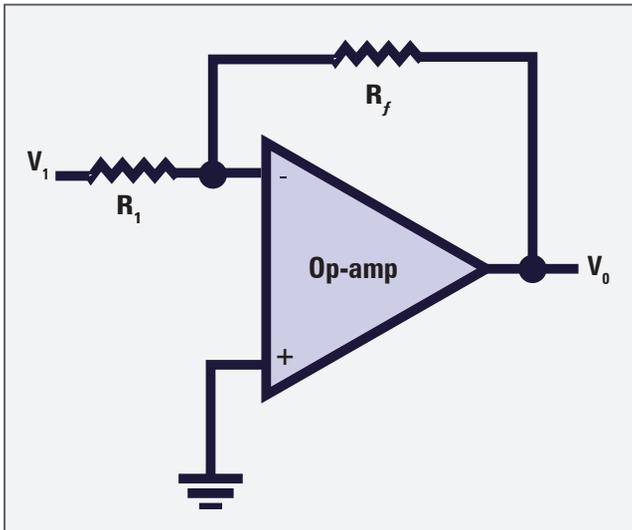


Figura 197.A - AO em malha aberta

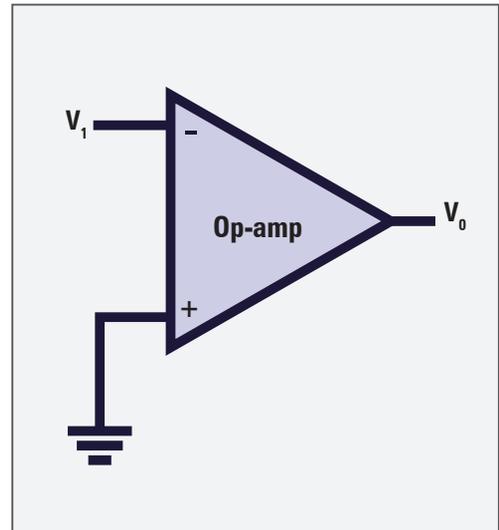


Figura 197.B - AO em malha fechada

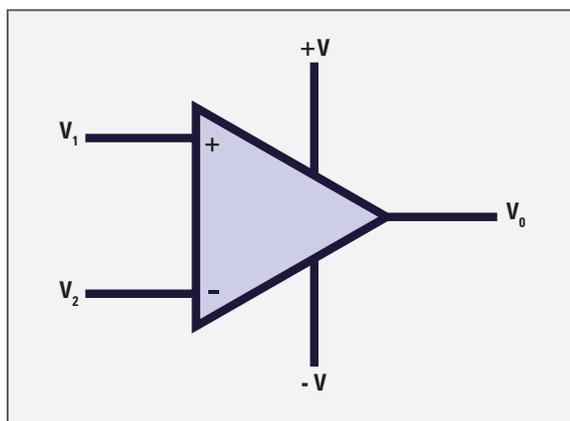


Figura 198 - Fontes simétricas

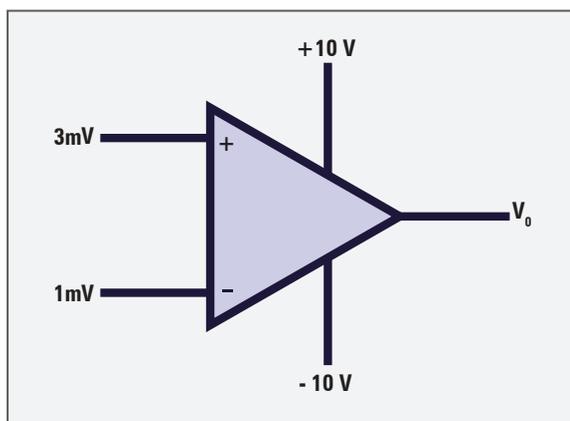


Figura 199 - AO em malha aberta (colocar $V_0 = ?$)

Nessa configuração, qualquer diferença mínima entre as tensões de entrada resulta em valor de tensão também infinito. Para solucionar esse problema, o AO possui duas fontes simétricas que limita o valor de saída: uma positiva (+V) e outra negativa (-V). Assim, por maior que seja o ganho de tensão, o valor da tensão de saída é limitado aos valores das fontes simétricas (Figura 198).

No exemplo a seguir, o AO está configurado em malha aberta (Figura 199) e as fontes simétricas (V+) e (V-) são de +10 V e -10 V, respectivamente. Qual o valor da tensão de saída (V_0)?

A primeira análise a ser feita é sobre o valor do ganho do circuito. O ganho do amp-op é infinito em malha aberta. A tensão de saída é calculada pela diferença entre as tensões de entrada (3 mV - 1 mV) multiplicada pelo ganho, tendendo a um valor infinito. No caso descrito, o valor foi limitado pela fonte simétrica (+V), acarretando tensão de saída igual a +10 V.

Se um sinal senoidal for aplicado a um AO em malha aberta, o sinal de saída assume forma de onda quadrada, devido à limitação imposta pelas fontes simétricas, conforme a Figura 200.

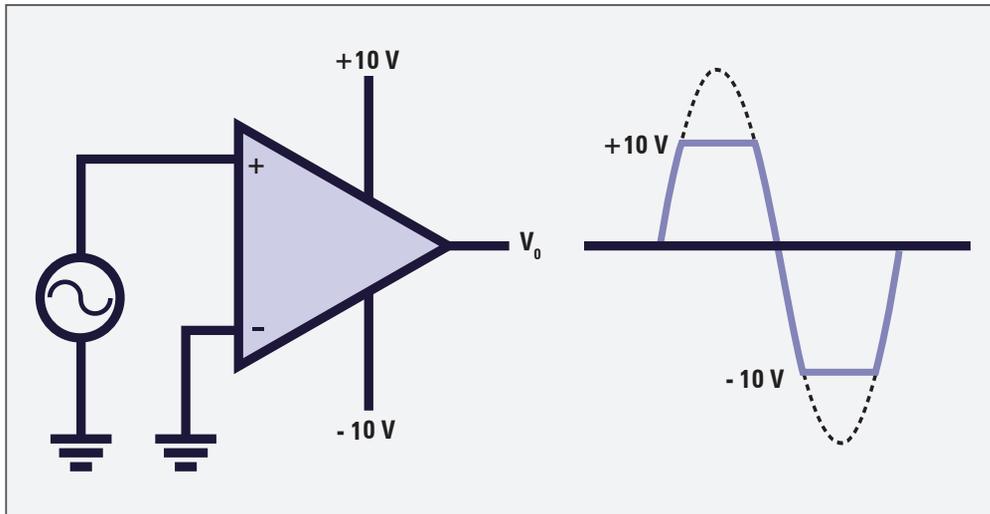


Figura 200 - Onda quadrada na saída

Resumindo

Neste capítulo, foram abordados os circuitos integrados e os amplificadores operacionais. Esses componentes são de extrema importância no campo da eletrônica, sendo aplicados nos mais variados equipamentos. Os circuitos integrados apresentam uma capacidade enorme de integração, otimizando equipamentos em relação ao tamanho e à eficiência.

O mesmo se aplica aos amplificadores operacionais, que permitem a amplificação de sinais extremamente pequenos, sendo utilizados desde equipamentos simples de rádio até os modernos radares de aeroportos e aeronaves. Os amplificadores operacionais permitiram a miniaturização dos antigos equipamentos valvulados, com um padrão de amplificação cada vez maior.

Capítulo 6

Instrumentos de medição

Os instrumentos de medição são essenciais a ajustes e a manutenções dos circuitos eletrônicos. Com essa finalidade, existem diversos instrumentos para cada aplicação e função. Um dos instrumentos mais importantes para medições eletrônicas, é o osciloscópio, pois não somente apresenta os valores de medida, demonstrando, também, a forma de onda do sinal medido, fato importante para identificação de deformações e interferências nos sinais eletrônicos.

6.1 Instrumentos de medição

A maioria dos equipamentos eletrônicos gera e trabalha com ondas eletrônicas das mais diversas formas. Essas ondas representam, por exemplo, sinais de vídeo, áudio, modulações, entre outros. Na manutenção, é necessário o emprego de instrumentos de medida para verificar o funcionamento eletrônico dos sistemas integrantes dos equipamentos, sendo o multímetro o mais utilizado.

O multímetro é um instrumento eletrônico usado para medidas de valores, porém ele só fornece o valor da medida, mas, para as medidas em corrente alternada, o sinal precisa ser senoidal e sem distorção. Quando existe a necessidade de medir um sinal não senoidal que possua ou não distorção, a solução é utilizar um osciloscópio, pois esse pode mostrar a forma de onda exatamente como ela é no ponto do circuito a ser verificado.

O osciloscópio apresenta, de modo visual, o sinal aplicado em sua entrada, independentemente da forma que esse sinal possua. A base do osciloscópio analógico é um tubo de raios catódicos (TRC), responsável por apresentar ao operador a forma do sinal aplicado à entrada do osciloscópio.

A forma de onda apresentada na tela do TRC é a forma de onda real presente no circuito, informação bem diferente da fornecida pelo multímetro, pois essa apresenta apenas o valor numérico de uma grandeza medida. Os osciloscópios medem sinais na faixa de frequência que vai de algumas dezenas de mega-hertz (MHz) até os mais avançados que medem centenas de giga-hertz (GHz).

6.1.1 Tubo de raios catódicos (TRC)

O tubo de raios catódicos (TRC) é o elemento principal do osciloscópio analógico, sendo ele o responsável por apresentar a forma do sinal medido. O TRC possui um canhão de elétrons, o qual gera um feixe de elétrons que risca a tela de fósforo para desenhar o sinal. No TRC também existem elementos utilizados para o ajuste de foco e aceleração do feixe de elétrons.

O sistema de deflexão horizontal e vertical do TRC é responsável por fazer o feixe de elétrons deslocar sobre a tela de fósforo e assim desenhar a forma de onda medida. A tela de fósforo é inserida em um tubo de vidro por onde passa o feixe de elétrons, ativando a fosforescência da tela. Na Figura 201, é apresentado um TRC básico.

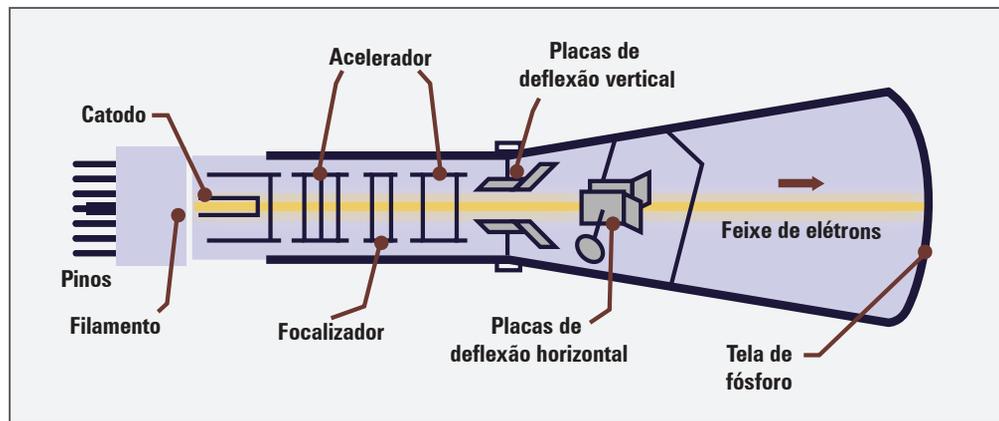


Figura 201 - Tubo de raios catódicos (TRC)

Nessa ilustração, os pinos são os elementos de ligação entre as partes que compõem internamente o TRC e o circuito eletrônico responsável por gerar os sinais que o alimentam, como o sinal de vídeo e varredura. O filamento é responsável por aquecer indiretamente o catodo e, assim, liberar os elétrons de sua superfície, os quais formam o feixe.

A carga dos elétrons é negativa, portanto, para que esse feixe liberado pelo catodo siga em direção à tela de fósforo, é necessário que os aceleradores e a tela possuam carga positiva de modo a atrair os elétrons para chocarem-se no fósforo da tela. O focalizador tem a função de deixar o feixe bem estreito para que possa desenhar melhor na tela.

Após o feixe ser acelerado e focalizado adequadamente, passa pelas placas de deflexão. O primeiro conjunto de placas movimenta o feixe na vertical, para baixo ou para cima. O sentido de movimentação depende da polaridade aplicada às placas, se a placa superior é alimentada por um potencial positivo e a inferior por negativo, o feixe é deslocado para cima.

As placas de deflexão horizontal são responsáveis por movimentar o feixe para a esquerda ou direita, dependendo da polaridade do potencial aplicado a elas. Por exemplo, caso a placa da direita receba um potencial negativo e a da esquerda positivo, o feixe se desloca para a esquerda.

Passando pelas placas de deflexão, o feixe, atraído por um grande potencial positivo aplicado à tela do TRC, choca-se contra a tela de fósforo, a qual brilha, para a visualização do sinal medido. Com vistas ao funcionamento normal do osciloscópio, as placas de deflexão horizontal são alimentadas com o sinal de deflexão e as placas de deflexão vertical com o sinal de entrada a ser medido. Enquanto o sinal de varredura faz o feixe de elétrons varrer a tela da esquerda para a direita, o sinal de entrada movimenta verticalmente o feixe, apresentando o desenho do sinal medido na tela de fósforo.

6.1.2 Diagrama-bloco básico de um osciloscópio básico

O diagrama-bloco da Figura 202 demonstra as principais partes que integram um osciloscópio analógico.

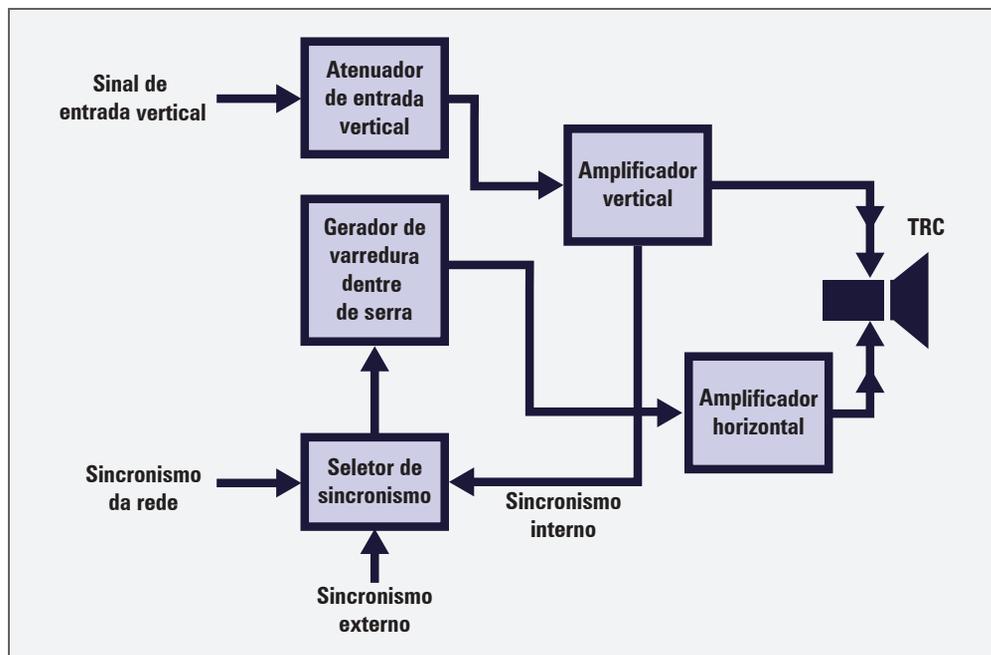


Figura 202 - Diagrama-bloco de um osciloscópio básico

O sinal aplicado na entrada vertical é o sinal a ser visualizado na tela do osciloscópio e, dependendo da sua amplitude, é atenuado no bloco atenuador de entrada. Devido a características do TRC, o sinal que sai do atenuador de entrada precisa ser amplificado e adequado para ser aplicado às placas de deflexão vertical.

A ponteira de prova (Figura 203), utilizada para injetar o sinal na entrada vertical, possui uma chave seletora com a função de aumentar a atenuação do sinal de entrada. Assim, caso o valor do sinal extrapole o máximo do atenuador de entrada, a ponteira é capaz de fornecer uma atenuação extra de algumas vezes o valor.



Figura 203 - Ponteiras de prova de osciloscópio com chave seletora de atenuação

O gerador de varredura dente de serra é responsável por gerar a varredura do sinal, ou seja, gera o tempo que o feixe de elétrons varre a tela da esquerda para a direita. Contudo, não basta gerar esse sinal, é necessário sincronizar esse gerador com a frequência do sinal a ser medido. Assim, o osciloscópio do exemplo pode ser sincronizado de três maneiras diferentes: pelo próprio sinal que está sendo medido, chamado no diagrama-bloco de sincronismo interno; pelo sinal da rede elétrica, o qual possui frequência padrão no Brasil de 60 Hz; e pelo sincronismo externo, que é qualquer tipo de sinal com amplitude suficiente para gerar o sincronismo na medida do sinal.

A velocidade com que a varredura passa pela tela do TRC depende da rapidez (frequência) do sinal do gerador dente de serra. Conforme muda a frequência da onda dente de serra, é possível mostrar mais ou menos ciclos do sinal a ser medido na tela. Essa característica de poder expor mais ou menos ciclos de sinal na tela do TRC é chamada de sincronismo do osciloscópio.

No Gráfico 32.A, a frequência da varredura está mais lenta em relação ao sinal senoidal a ser medido, assim, só é possível apresentar um ciclo da onda na tela. No Gráfico 32.B, a frequência da varredura é mais rápida em relação ao sinal a ser medido, agora é possível mostrar dois ciclos completos do sinal senoidal na tela.

GRÁFICO 32.A - Tempo de varredura lenta

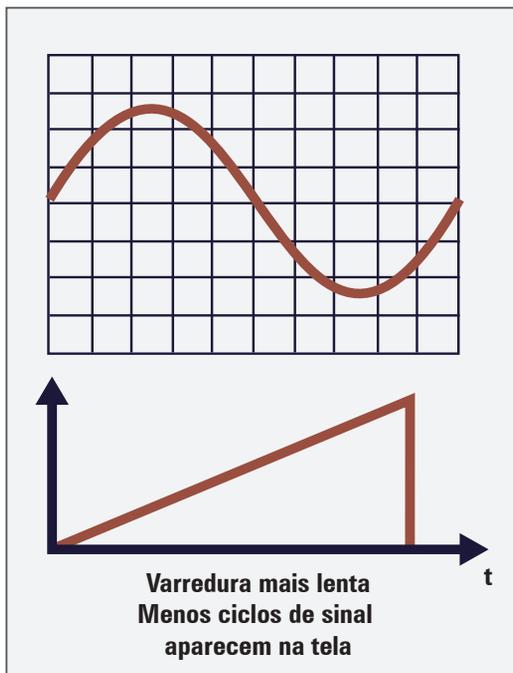
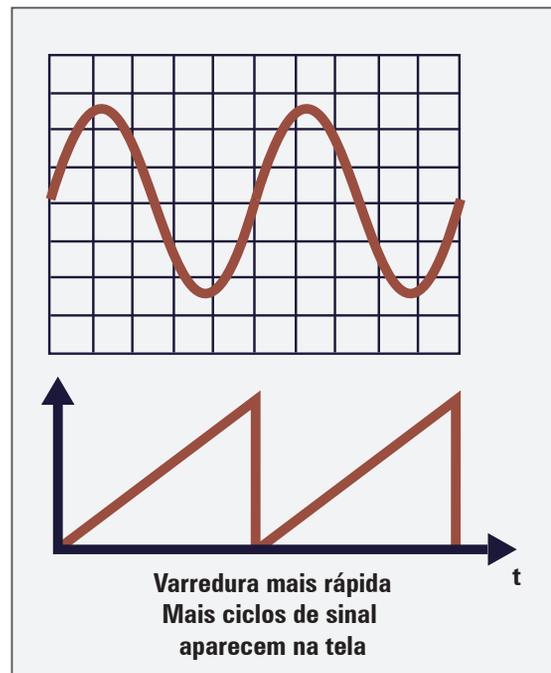


GRÁFICO 32.B - Tempo de varredura rápida



Quando o osciloscópio não está sincronizado com o sinal a ser medido, não é possível lê-lo na tela, pois ele vai ficar movimentando para à esquerda ou à direita, impossibilitando a medida dos valores de amplitude e frequência do sinal. A falta de sincronismo ocorre porque é necessário que a **varredura** inicie seu ciclo no mesmo ponto da onda do ciclo anterior, o que é difícil de conseguir. Por isso, normalmente, o método utilizado para sincronizar a varredura é pegar uma porção do sinal de entrada para gerar um sinal de disparo para a varredura.

Usando esse sinal de disparo, sincronizado com o sinal a ser medido, é possível manter a onda parada na tela do osciloscópio e realizar as medidas necessárias.



Varredura: tempo levado pelo sinal dente de serra para varrer a tela do tubo de raios catódicos.

A tela do osciloscópio é quadriculada, de modo a se ter 10 quadrículas na horizontal, eixo do tempo, por 8 na vertical, eixo da tensão, conforme demonstrado no Gráfico 33. Para fazer uma medida do sinal, é contado o número de quadrículas na vertical e horizontal e, então, calculado o valor do sinal. Todo osciloscópio possui chaves seletoras de tempo por divisão, chave que atribui o valor de cada quadrado na horizontal, e volt por divisão, valor atribuído a cada quadrado na vertical.

Por exemplo, considerando a chave seletora do osciloscópio de tempo na posição 1 ms/div e a chave de tensão por divisão na posição 2 V/div, qual é o valor do período e amplitude do sinal senoidal do Gráfico 33?

Resolução: Como o sinal possui duas divisões na vertical de amplitude e o valor da chave seletora foi colocada em 2 volts por divisão, a amplitude do sinal é de 4 volts. A chave seletora de tempo por divisão está em 1 milsegundo por divisão, como o sinal possui cinco divisões na horizontal, o período do sinal é de 5 ms. A fim de determinar a frequência, é só utilizar a equação:

$$F = \frac{1}{T} \rightarrow \frac{1}{5 \text{ ms}} \rightarrow 200 \text{ Hz}$$

Em que:

(F) - frequência do sinal;

(T) - período do sinal.

Assim, o sinal na tela possui quatro volts de amplitude total e frequência de 200 Hertz.

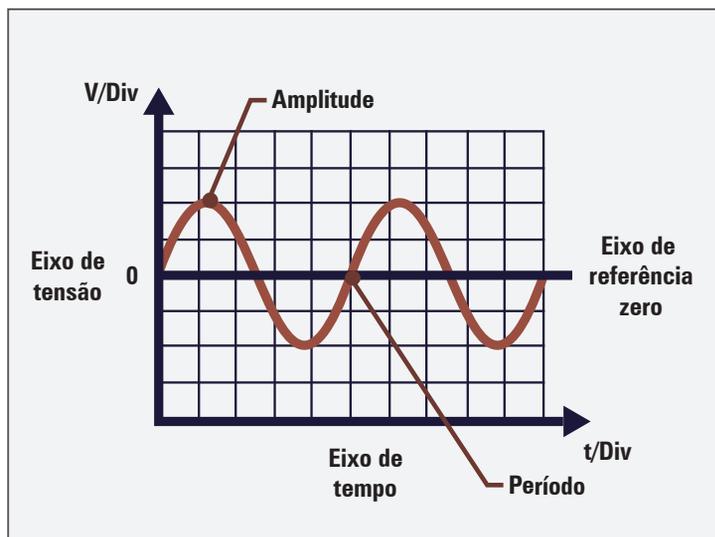


GRÁFICO 33 - Medida de período e amplitude do sinal na tela do osciloscópio

Quando um sinal é apresentado na tela do osciloscópio, sua amplitude é medida em volts por divisão (Volts/div), sendo comum a utilização da terminologia tensão de pico (V_p) e tensão de pico a pico (V_{pp}). Para o exemplo do sinal senoidal apresentado no Gráfico 33, o sinal possui 2 volts de pico ($2 V_p$) ou 4 volts de pico a pico ($4 V_{pp}$).

6.1.3 Controles do osciloscópio

Na Figura 204, são apresentados os controles básicos do osciloscópio de um canal. É comum os osciloscópios terem mais de um canal (CH) de entrada para medida, como resultado, tem-se controles duplicados, sendo um para cada canal e outros controles sendo comuns a ambos os canais.

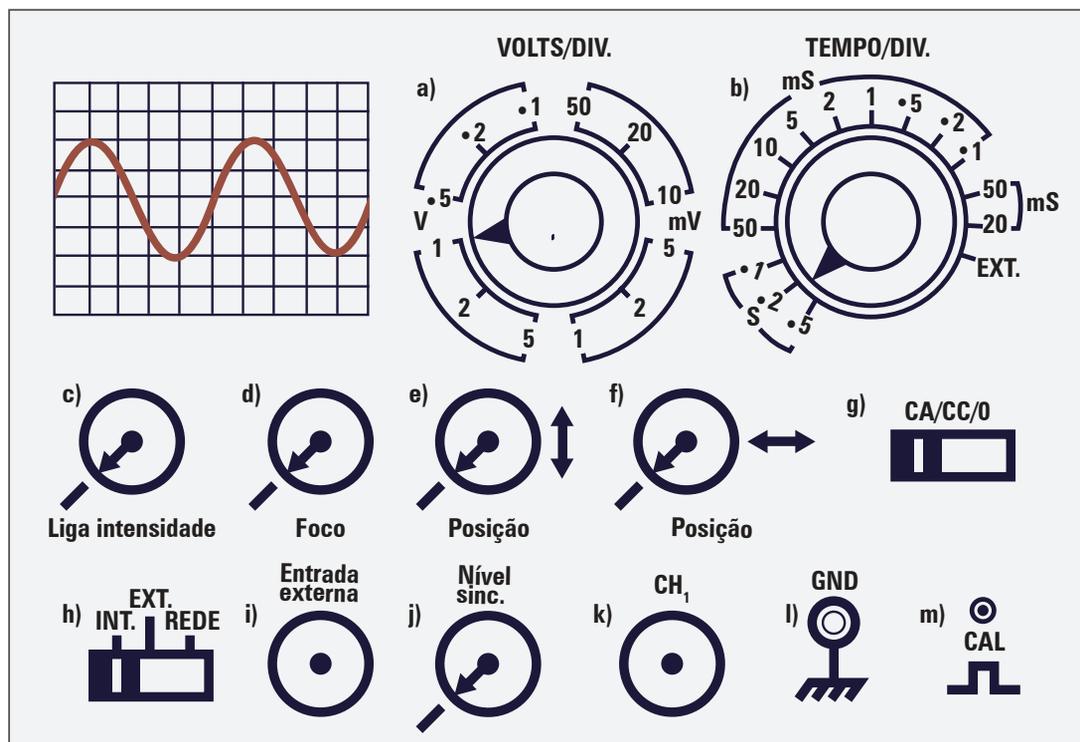


Figura 204 - Controles de osciloscópio básico

- a) Volts/div - define o valor das divisões da tela no sentido vertical.
- b) Tempo/div - define o valor das divisões da tela no sentido horizontal.
- c) Liga/intensidade - botão de ligar que possui, também, a função de controlar a intensidade do feixe de elétrons da tela.
- d) Foco - controla o foco do feixe de elétrons na tela.
- e) Posição vertical - ajusta a posição do sinal medido na tela no sentido vertical, o sinal é deslocado para cima e para baixo de acordo com a necessidade.
- f) Posição horizontal - ajusta a posição do sinal medido na tela no sentido horizontal, o sinal é deslocado para esquerda e direita, de acordo com a necessidade.
- g) CA/CC/0 - quando essa chave está na posição CA, qualquer componente CC presente no sinal é eliminado. Na posição CC, é medido o sinal CA, com ou sem componente CC. Na posição 0 (zero), o sinal de entrada é aterrado e nenhum sinal é apresentado na tela.
- h) (INT)/(EXT)/Rede - na posição (INT), o sinal a ser medido é sincronizado com o sinal interno do osciloscópio. Na posição (EXT), é usado um sinal externo para sincronizar a medida. Na posição rede, o sinal a ser medido é sincronizado com a frequência do sinal da rede de alimentação, no Brasil 60 Hz.

- i) Entrada Ext. - conector de entrada do sinal que é utilizado para sincronizar o sinal a ser medido.
- j) Nível sinc. - amplitude do sinal de sincronismo utilizado para sincronizar o sinal aplicado no canal de entrada (**CH1**) do osciloscópio.
- k) (**CH1**) - conector de entrada do sinal a ser medido no osciloscópio.
- l) (**GND**) - conector que fornece um ponto de terra para ser empregado em medidas que precisem da utilização desse ponto.
- m) Cal. - ponto que fornece um sinal utilizado para verificar a calibração osciloscópio, por exemplo, esse ponto pode apresentar uma onda quadrada de 1 KHz por 5 volts de amplitude.

O ponto de calibração (**CAL**) fornece um sinal quadrado de grande precisão com vistas a verificar a ponteira de medida e o osciloscópio. Por exemplo, esse ponto fornece uma onda quadrada de 1 KHz com amplitude de 5 volts, assim, ao ligar a ponteira do canal (**CH1**) a esse ponto, a tela apresenta a onda com precisão, qualquer diferença pode significar um problema da ponteira ou no osciloscópio.

6.2 Unidades de medida eletrônica

Conhecer a unidade decibel (dB) é imprescindível para quem trabalha no campo da eletrônica. O decibel é uma unidade usada em diversas áreas da eletrônica, como telecomunicações em transmissão e recepção de sinais, entre outras aplicações.

Na área de áudio, o decibel é bastante empregado, pois a resposta do ouvido humano aos estímulos sonoros é logarítmica: o aumento na intensidade de 10 para 100 produz o mesmo aumento aparente que de 1 para 10. Por exemplo, dobrando a potência de saída de um amplificador, o ouvido humano não sente que a intensidade sonora foi dobrada. Usando o decibel, que é uma relação logarítmica, relaciona-se com a resposta do ouvido humano.

Por definição, bel é o logaritmo na base 10 da relação entre duas medidas que pode ser potência, tensão, corrente; é a relação entre dois parâmetros medidos, sendo feita a relação saída de sinal pela entrada.

$$\text{Bel} = B = \log \frac{X}{Y}$$

Em que: (X) e (Y) são grandezas de mesma espécie.

Para adequar melhor a relação supracitada, é utilizado o decibel, que multiplica a equação anterior por 10, desse modo, tem-se:

$$\text{decibel} = \text{dB} = 10 \log \frac{X}{Y}$$

Por exemplo, sabendo que um pré-amplificador de áudio para microfone apresenta na saída a potência de 5 W e que o microfone fornece uma saída de 50 mW, qual seu ganho em dB?

Resolução: como dB usa a relação saída pela entrada, os dados do problema são colocados na equação:

$$\text{dB} = 10 \log \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{5 \text{ W}}{50 \text{ mW}} = 20 \text{ dB}$$

O pré-amplificador do exemplo anterior fornece ganho para o sinal do microfone de 20 dB. Esse tipo de unidade é muito usado não só para análise de equipamentos de áudio como de diversos equipamentos e sistemas.

6.2.1 Trabalhando com decibel (dB)

Quando são fornecidos valores em dB de estágios eletrônicos, são realizadas contas simples para determinar, por exemplo, a amplificação ou a atenuação global de um equipamento.

A Figura 205 exemplifica um equipamento eletrônico formado por vários estágios, também é indicado o ganho em dB, quando o valor é positivo (+), de cada estágio ou atenuação, quando o valor está indicado como negativo (-).

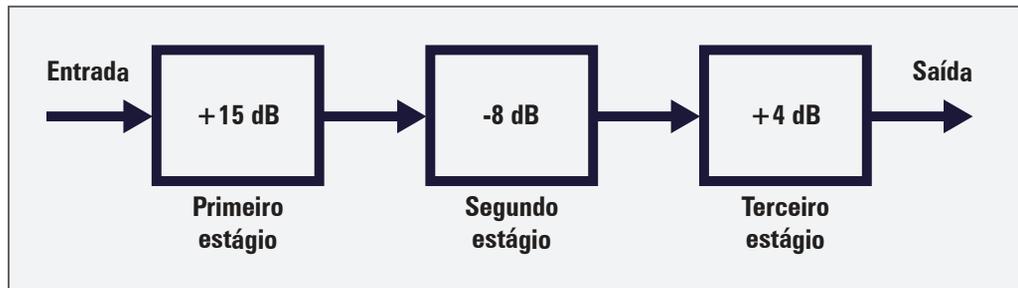


Figura 205 - Estágios de um equipamento eletrônico

Como exemplo de aplicação do dB em equipamentos eletrônicos, é possível determinar o ganho global do equipamento da Figura 205.

Resolução: como o valor em dB de cada estágio foi fornecido, basta somá-los considerando os sinais.

$$\text{Ganho Global} = \text{Ganho } 1^{\circ} \text{ estágio} + \text{Ganho } 2^{\circ} \text{ estágio} + \text{Ganho } 3^{\circ} \text{ estágio}$$

$$\text{Ganho Global} = +15 \text{ dB} + (-8 \text{ dB}) + 4 \text{ dB} = +11 \text{ dB}$$

O resultado é 11 dB positivos, o que demonstra um ganho do equipamento. Caso o valor obtido fosse negativo, como o valor do segundo estágio, o equipamento não teria ganho, mas, sim, atenuação. No exemplo, o segundo estágio possui uma atenuação de -8 dB, porém, como os outros estágios juntos fornecem um ganho de +19 dB, o equipamento consegue amplificar o sinal aplicado na entrada e entregá-lo na saída.

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que os instrumentos de medição são equipamentos essenciais à eletrônica moderna, pois são capazes de fornecer dados concretos sobre o funcionamento dos circuitos eletrônicos.

O osciloscópio mostra em uma tela a forma de qualquer sinal presente nos circuitos eletrônicos. A tela por ele usada é um tubo de raios catódicos (TRC) que possui funcionamento muito simples, mas muito eficiente na sua aplicação.

Com vistas a mostrar as formas dos sinais dos circuitos na tela do TRC, é necessário ter uma onda de varredura em forma de dente de serra e sincronismo, a ausência desses sinais faz com que a imagem não fique parada na tela do TRC.

O uso dos instrumentos exige a utilização de unidades de medida eletrônica adequadas, como o decibel, o qual relaciona duas medidas para obter um valor relativo que facilita a observação da performance do equipamento.

Unidade 3

Eletrônica II – técnicas digitais

Com o avanço tecnológico e o surgimento de novas tecnologias, a eletrônica digital se tornou cada vez mais presente no dia a dia do técnico de manutenção, em virtude dos modernos equipamentos eletrônicos utilizados nas diversas aeronaves. A velocidade de um processador e a capacidade de memória de um computador usados para processar as informações oriundas dos sistemas e subsistemas de uma aeronave são exemplos típicos de que a terminologia digital está inserida no contexto, seja de um técnico de manutenção de aeronaves, de informática ou até mesmo dos usuários de computadores.

As operações internas realizadas pelo computador são escritas em códigos binários que representam as inúmeras instruções dos programas por ele executados. Esse padrão permite que qualquer máquina, independente do local de fabricação, possa ter os programas e sistemas operacionais funcionando normalmente, tornando-os acessíveis a todas as pessoas em diversos lugares.

Além disso, a eletrônica digital permite a criação de circuitos que atendam às necessidades de determinado equipamento ou da sociedade. As técnicas de simplificação de expressões *booleanas* ajudam o projetista ou o estudante a criarem circuitos eficientes com o mínimo de componentes possíveis, permitindo a miniaturização dos equipamentos digitais.

Assim, é essencial compreender o princípio de funcionamento dos equipamentos digitais e suas linguagens de comunicação nesta sociedade cada vez mais dependente das tecnologias digitais.

Esta unidade aborda, primeiramente, os sistemas de numeração e das famílias lógicas utilizadas nos equipamentos digitais presentes nos modernos instrumentos das aeronaves. Em um segundo momento, são mostrados circuitos combinacionais e contadores digitais, além dos *flip-flops* empregados como dispositivos de memória nos computadores e equipamentos aviônicos. Em seguida, explicita-se como são realizados o processamento e o armazenamento das informações oriundas dos módulos eletrônicos da aeronave, oferecendo informação precisa para o piloto executar os comandos de voo. Ao fim, é feita uma introdução aos computadores, mostrando a arquitetura básica e a função de cada um dos seus principais elementos.

Capítulo 1

Sistemas de numeração

Na história da humanidade, desde os seus primórdios, as civilizações desenvolveram formas de se comunicar para suprir as necessidades da época em que viviam, criando, entre outros recursos, as palavras e os numerais. Essa comunicação acompanhou o processo evolutivo da sociedade e sofreu diversas e significativas mudanças.

Em determinado momento do passado, os números – atualmente usados em quase todo o mundo – foram representados por algarismos romanos. Com efeito, os sistemas de numeração adotados por diferentes povos, em distintas épocas, possibilitaram uma quantidade de números e operações aritméticas. Essas, por sinal, são duas importantes ferramentas que permitem o convívio e a interação entre as pessoas.

1.1 Numeração e códigos digitais

A quantidade de sistemas de numeração existentes é proporcional à quantidade de números naturais, podendo então ser infinita. O sistema utilizado diariamente é o de base 10, também conhecido como decimal. Ele utiliza dez algarismos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Os sistemas binário (base 2), octal (base 8) e hexadecimal (base 16) serão analisados em virtude de seus usos nos sistemas digitais de diversos equipamentos. Cada sistema, de acordo com sua base, possui determinado número de algarismos. Os sistemas binário, octal e hexadecimal possuem 2, 8 e 16 algarismos, respectivamente.

Tabela 1 - Algarismos nas bases 2, 8 e 16

	Binário (base 2)	Octal (base 8)	Hexadecimal (base 16)
Algarismos	0, 1	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F

Fonte: Elaboração dos autores.

O sistema hexadecimal compreende a faixa de algarismos de 0 a 15. Letras são utilizadas para representar dígitos maiores que 9. Assim, usa-se a representação da letra (A) para o algarismo 10, e assim por diante até a letra (F), que representa o número 15.

1.1.1 Maior algarismo da base

O maior algarismo da base, em inglês, *most significant bit* (MSB), é calculado aplicando a fórmula a seguir:

$$M = B - 1$$

Em que:

- (M) - maior algarismo do sistema;
- (B) - base do sistema de numeração.

O MSB do sistema de base 10 é 9; base 2 é 1; base 8 é 7; e da base 16 é o (F) (representa o número 15).

1.1.2 Contagem em qualquer base

A contagem em um sistema de numeração é feita até atingir o maior algarismo da base. Toda vez que chegar nesse ponto, a contagem volta a zero e se acrescenta uma unidade à casa da esquerda para continuar a contagem, que acontece da seguinte maneira :

0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 → 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 → 20, 2198, 99 → 100.....

Para melhor exemplificar, a Tabela 2 compara a contagem na base decimal com as bases binária, octal e hexadecimal.

Tabela 2 - Comparação entre bases

DECIMAL	BINÁRIO	OCTAL	HEXADECIMAL
0	0	0	0
1	1	1	1
2	10	2	2
3	11	3	3
4	100	4	4
5	101	5	5
6	110	6	6
7	111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F
16	10000	20	10

Fonte: Elaboração dos autores.

A representação dos números em bases diferentes da decimal é feita colocando o número entre parênteses e a base de forma subscrita na parte exterior dos parênteses, conforme os exemplos a seguir:

$$(1101)_2 \quad (472)_8 \quad (7EA45)_{16}$$

Nos sistemas digitais, a ordem de significância de um número varia do algarismo de menor valor (algarismo menos significativo) até o de maior valor (mais significativo).

35

Do exemplo supracitado, o número de menor valor é o 5 e equivale a 5 unidades. Já o 3, é o número de maior valor e equivale a 3 dezenas. Em sistemas digitais, o número 3 é o mais significativo MSB e o número 5 é o menos significativo, em inglês, *least significant bit* (LSB).

1.1.3 Conversão entre bases

A conversão entre bases é muito comum em eletrônica digital. Cada equipamento possui um sistema de comunicação próprio e, muitas vezes, é necessário converter os algarismos de uma base a outra para existir a comunicação entre os equipamentos ou sistemas externos. As técnicas utilizadas para realizar a conversão entre bases serão explicadas.

a) Conversão de decimal para qualquer base

O método das divisões sucessivas é empregado na conversão da base decimal para qualquer base. Ele consiste em dividir o número decimal pela base para a qual se deseja convertê-lo sucessivas vezes, até que o último quociente seja menor que a base divisora. No exemplo a seguir, o número 1928 é convertido para o sistema octal.

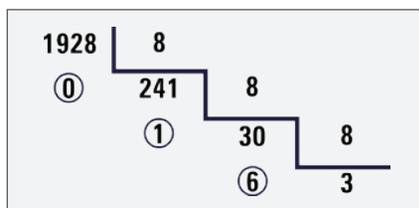


Figura 1 - Conversão decimal para binário

O número convertido é obtido a partir do último quociente com os restos das demais divisões, do último até o primeiro, conforme o exemplo:

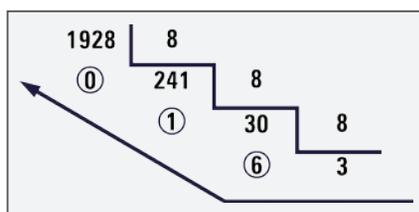


Figura 2 - Conversão decimal para binário

Dessa forma, o número 1928 em decimal equivale ao número 3610 em octal.

$$1928 = (3610)_8$$

Utilizando o método das divisões sucessivas, o número 68 é convertido para o sistema binário, de acordo com este exemplo:

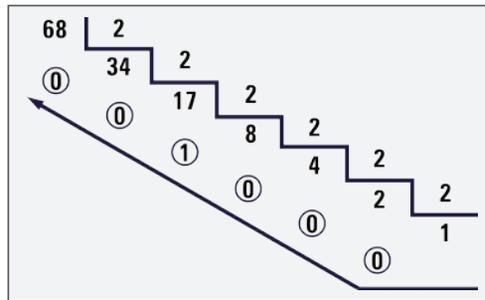


Figura 3 - Conversão decimal para binário

O número 68 em decimal equivale ao número binário 1000100. Cada algarismo de um número binário é comumente chamado de dígito binário, em inglês, *binary digit* (BIT).

$$68 = (1000100)_2$$

No exemplo seguinte, o número 9712 é convertido para hexadecimal ou de base 16. Nesse sistema, os números de 10 a 15 são representados pelas letras (A), (B), (C), (D), (E) e (F).

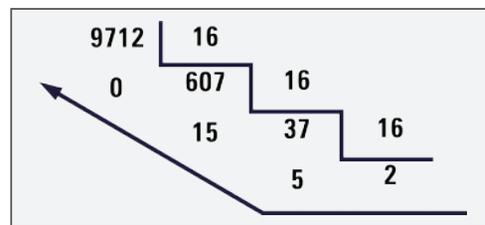


Figura 4 - Conversão decimal para binário

O número 9712 equivale ao hexadecimal 25F0. O número 15 foi substituído pela letra (F) no resultado da conversão.

b) Conversão de qualquer base para decimal

A conversão de um número para decimal usa o método da soma de potências da base, decompondo o número que se deseja converter. O número 3610 em octal será convertido para decimal. O primeiro passo é elevar os expoentes ao número que será convertido:

$$(3^3 6^2 1^1 0^0)_8$$

O segundo passo é multiplicar cada algarismo pela base elevada ao expoente marcado no primeiro passo:

$$(3^3 6^2 1^1 0^0)_8 = 3 \times 8^3 + 6 \times 8^2 + 1 \times 8^1 + 0 \times 8^0$$



BIT: do inglês *binary digit*, é a menor unidade lógica presente nos estudos da eletrônica digital; é no *bit* que toda a lógica digital está lastreada.

O terceiro passo é realizar a multiplicação dos números e depois somá-los, em decimal:

$$\begin{aligned}(3610)_8 &= 3 \times 8^3 + 6 \times 8^2 + 1 \times 8^1 + 0 \times 8^0 \\ &= 3 \times 512 + 6 \times 64 + 1 \times 8 + 0 \times 1 \\ &= 1536 + 384 + 8 + 0 \\ &= 1928\end{aligned}$$

O número $(3610)_8$ equivale ao decimal 1928. É importante lembrar que qualquer número elevado a zero é igual a 1 e qualquer número multiplicado por zero é igual a zero. Este exemplo mostra a conversão do número binário $(1000100)_2$ para decimal.

$$\begin{aligned}(1000100)_2 &= 1 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^0 \\ &= 1 \times 64 + 0 \times 32 + 0 \times 16 + 0 \times 8 + 1 \times 4 + 0 \times 2 + 0 \times 1 \\ &= 64 + 0 + 0 + 0 + 4 + 0 + 0 \\ &= 68\end{aligned}$$

O número 1000100 em binário equivale ao decimal 68. O próximo exemplo evidencia a conversão do hexadecimal 25F0 para decimal:

$$\begin{aligned}(25F0)_H &= 2 \times 5^2 F^1 0^0 \\ &= 2 \times 16^3 + 5 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 0 \times 16^0 \\ &= 2 \times 4096 + 5 \times 256 + 15 \times 16 + 0 \times 1 \\ &= 8192 + 1280 + 240 + 0 \\ &= 9712\end{aligned}$$

O número hexadecimal 25F0 equivale ao decimal 9712.

c) Conversão entre binário e octal

A conversão de um número binário para octal, ou vice-versa, emprega o método empacotamento ou desempacotamento de *bits*, no qual cada algarismo octal equivale a três *bits*, devido à relação:

$$\frac{8}{2^N} \rightarrow 8 = 2^3$$

Cada dígito octal equivale ao binário da Tabela 3.

Tabela 3 - Conversão entre binário e octal

OCTAL	BINÁRIO
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

Fonte: Elaboração dos autores.

O exemplo a seguir mostra a conversão do número octal $(417)_8$ para binário aplicando-se o método do desempacotamento de três *bits*.

$$417 = \underbrace{4}_{100} \underbrace{1}_{001} \underbrace{7}_{111}$$

Assim, o número $(417)_8$ equivale ao binário $(100001111)_2$. Para converter o número binário em octal, realiza-se o processo inverso, também conhecido como empacotamento de três *bits*, a partir dos *bits* menos significativos. O exemplo demonstra a conversão do binário $(010110100)_2$ para octal.

$$(010110100)_2 = \underbrace{010}_2 \underbrace{110}_6 \underbrace{100}_4$$

Em alguns casos, o número binário a ser convertido em octal não possui um número de algarismos múltiplo de três. Nessa situação, completa-se com zeros à esquerda até preencher os *bits* que estão faltando. O exemplo a seguir converte o número $(10110)_2$ para octal.

$$(10110)_2 = \underbrace{10}_2 \underbrace{110}_6 = \underbrace{010}_2 \underbrace{110}_6 = (26)_8$$

d) Conversão entre binário e hexadecimal

A conversão de um número binário para hexadecimal, ou vice-versa, utiliza o mesmo método de empacotamento ou desempacotamento de *bits*, só que agora o algarismo hexadecimal equivale a quatro *bits*, pois:

$$\begin{aligned} 16 \\ = & \rightarrow 8 = 2^4 \\ 2^N \end{aligned}$$

Cada dígito hexadecimal equivale ao binário da Tabela 4:

Tabela 4 - Conversão entre binário e hexadecimal

HEXADECIMAL	BINÁRIO
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001
A	1010
B	1011
C	1100
D	1101
E	1110
F	1111

Fonte: Elaboração dos autores.

O exemplo a seguir mostra a conversão do número hexadecimal $(8B61)_H$ para binário aplicando-se o método do desempacotamento de quatro *bits*.

$$(8B61)_H = \underbrace{8}_{1000} \underbrace{B}_{1011} \underbrace{6}_{0110} \underbrace{1}_{0001}$$

Dessa forma, o número $(8B61)_H$ equivale ao binário $(1000101101100001)_2$. A conversão de um número binário em hexadecimal usa o processo inverso, realizando o empacotamento de quatro *bits* a partir dos *bits* menos significativos. O próximo exemplo mostra a conversão do binário $(111010110100)_2$ para hexadecimal:

$$(111010110100)_2 = \underbrace{1110}_E \underbrace{1011}_B \underbrace{0100}_4 = (EB4)$$

Se o número binário não possuir o número de algarismos múltiplo de quatro, completa-se com zeros à esquerda até preencher os *bits* que estão faltando, conforme este exemplo:

$$(11100001100)_2 = \underbrace{1110000}_{7} \underbrace{1100}_{0} = \underbrace{0111}_7 \underbrace{0000}_0 \underbrace{1100}_C (70C)$$

1.1.4 Códigos

O sistema de numeração binário é utilizado para a comunicação interna dos diversos componentes de um equipamento eletrônico, como os computadores, a quantidade de *bits* que ele processa indica sua capacidade de processamento.

Apesar de o sistema usado ser o binário, alguns equipamentos empregam códigos para realizar tal comunicação. Os códigos são representados por números, letras e símbolos. A seguir, serão explicados os mais comuns.

a) Código BCD 8421

O código BCD 8421, decimal codificado em binário, em inglês, *binary coded decimal (BCD)*, foi desenvolvido para codificar os algarismos decimais em binário. Para representar os números decimais (0 a 9), o código BCD necessita de quatro *bits* para cada dígito, conforme a Tabela 5.



BCD: do inglês *binary coded decimal*; código de quatro *bits* utilizado para representar os algarismos decimais em binário.

Tabela 5 - Código BCD 8421

Decimal	BCD 8421			
	8	4	2	1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1

Fonte: Elaboração dos autores.

A conversão do número decimal 538 em BCD é feita da seguinte maneira:

$$538 = \underbrace{5}_{0101} \quad \underbrace{3}_{0011} \quad \underbrace{8}_{1000}$$

b) Código excesso 3

O código excesso 3 tem sua principal aplicação em circuitos aritméticos e consiste em

somar três unidades ao número binário correspondente. A Tabela 6 mostra o equivalente entre o decimal e o excesso 3.

Tabela 6 - Código excesso 3

Decimal	Excesso 3			
0	0	0	1	1
1	0	1	0	0
2	0	1	0	1
3	0	1	1	0
4	0	1	1	1
5	1	0	0	0
6	1	0	0	1
7	1	0	1	0
8	1	0	1	1
9	1	1	0	0

Fonte: Elaboração dos autores.

A conversão do número decimal 79 em excesso 3 é feita desta maneira:

$$79 = \underbrace{7}_{1010} \quad \underbrace{9}_{1100}$$

c) Código 2 entre 5

O código 2 entre 5 é utilizado para transmissão de dados na telefonia, além de ser aplicado para detecção de erros de transmissão. Consiste em cinco *bits*, em que sempre dois *bits* assumem o nível lógico 1. A Tabela 7 mostra o equivalente entre o decimal e o código 2 entre 5.

Tabela 7 - Código 2 entre 5

Decimal	2 entre 5				
0	0	0	0	1	1
1	0	0	1	0	1
2	0	0	1	1	0
3	0	1	0	0	1
4	0	1	0	1	0
5	0	1	1	0	0
6	1	0	0	0	1
7	1	0	0	1	0
8	1	0	1	0	0
9	1	1	0	0	0

Fonte: Elaboração dos autores.

A conversão do número decimal 25 no código 2 entre 5 é feita da seguinte maneira:

$$25 = \underbrace{2}_{00101} \quad \underbrace{5}_{01100}$$

d) Código Gray

Esse código é utilizado na comunicação de dados e consiste em variar apenas um *bit* por linha, conforme a Tabela 8:

Tabela 8 - Código Gray

Decimal	Código Gray			
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	0	1	0
4	0	1	1	0
5	0	1	1	1
6	0	1	0	1
7	0	1	0	0
8	1	1	0	0
9	1	1	0	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	0
12	1	0	1	0
13	1	0	1	1
14	1	0	0	1
15	1	0	0	0

Fonte: Elaboração dos autores.

A conversão do número decimal 49 no código Gray é feita da seguinte maneira:

$$49 = \underbrace{4}_{0110} \quad \underbrace{9}_{1101}$$

e) Código ASCII

O código padrão americano para troca de informações, em inglês, *american standard code for information interchange* (ASCII), é alfanumérico representado por sete *bits*.



ASCII: código proposto por Robert W. Bemer, visando a padronizar os códigos para caracteres alfanuméricos (letras, sinais, números e acentos).

É usado para comunicação interna do computador e seus periféricos. As Tabelas 9 e 10 mostram o código ASCII e seus correspondentes em decimal, binário e hexadecimal. Elas também exibem as letras (maiúsculas ou minúsculas), os números e os símbolos encontrados no teclado de um computador.

Tabela 9 - Código ASCII (caracteres de controle e números)

Caracteres de controle							
NOME	DEC	BINÁRIO	HEXA	SÍMBOLO	DEC	BINÁRIO	HEXA
NUL	0	0000000	00	Espaço	32	0100000	20
SOH	1	0000001	01	!	33	0100001	21
STX	2	0000010	02	"	34	0100010	22
ETX	3	0000011	03	#	35	0100011	23
EOT	4	0000100	04	\$	36	0100100	24
ENQ	5	0000101	05	%	37	0100101	25
ACK	6	0000110	06	&	38	0100110	26
BEL	7	0000111	07	'	39	0100111	27
BS	8	0001000	08	(	40	0101000	28
HT	9	0001001	09	)	41	0101001	29
LF	10	0001010	0A	*	42	0101010	2A
VT	11	0001011	0B	+	43	0101011	2B
FF	12	0001100	0C	,	44	0101100	2C
CR	13	0001101	0D	-	45	0101101	2D
SO	14	0001110	0E	.	46	0101110	2E
SI	15	0001111	0F	/	47	0101111	2F
DLE	16	0010000	10	0	48	0110000	30
DC1	17	0010001	11	1	49	0110001	31
DC2	18	0010010	12	2	50	0110010	32
DC3	19	0010011	13	3	51	0110011	33
DC4	20	0010100	14	4	52	0110100	34
NAK	21	0010101	15	5	53	0110101	35
SYN	22	0010110	16	6	54	0110110	36
ETB	23	0010111	17	7	55	0110111	37
CAN	24	0011000	18	8	56	0111000	38
EM	25	0011001	19	9	57	0111001	39
SUB	26	0011010	1A	:	58	0111010	3A
ESC	27	0011011	1B	;	59	0111011	3B
FS	28	0011100	1C	<	60	0111100	3C
GS	29	0011101	1D	=	61	0111101	3D
RS	30	0011110	1E	>	62	0111110	3E
US	31	0011111	1F	?	63	0111111	3F

Fonte: Elaboração dos autores com dados de FLOYD, T. (2007).

Tabela 10 - Código ASCII (letras maiúsculas e minúsculas)

Símbolo gráfico							
NOME	DEC	BINÁRIO	HEXA	SÍMBOLO	DEC	BINÁRIO	HEXA
@	64	1000000	40	`	96	1100000	60
A	65	1000001	41	a	97	1100001	61
B	66	1000010	42	b	98	1100010	62
C	67	1000011	43	c	99	1100011	63
D	68	1000100	44	d	100	1100100	64
E	69	1000101	45	e	101	1100101	65
F	70	1000110	46	f	102	1100110	66
G	71	1000111	47	g	103	1100111	67
H	72	1001000	48	h	104	1101000	68
I	73	1001001	49	i	105	1101001	69
J	74	1001010	4A	j	106	1101010	6A
K	75	1001011	4B	k	107	1101011	6B
L	76	1001100	4C	l	108	1101100	6C
M	77	1001101	4D	m	109	1101101	6D
N	78	1001110	4E	n	110	1101110	6E
O	79	1001111	4F	o	111	1101111	6F
P	80	1010000	50	p	112	1110000	70
Q	81	1010001	51	q	113	1110001	71
R	82	1010010	52	r	114	1110010	72
S	83	1010011	53	s	115	1110011	73
T	84	1010100	54	t	116	1110100	74
U	85	1010101	55	u	117	1110101	75
V	86	1010110	56	v	118	1110110	76
W	87	1010111	57	w	119	1110111	77
X	88	1011000	58	x	120	1111000	78
Y	89	1011001	59	y	121	1111001	79
Z	90	1011010	5A	z	122	1111010	7A
[	91	1011011	5B	{	123	1111011	7B
\	92	1011100	5C	|	124	1111100	7C
]	93	1011101	5D	}	125	1111101	7D
^	94	1011110	5E	~	126	1111110	7E
-	95	1011111	5F	Del	127	1111111	7F

Fonte: Elaboração dos autores.

1.1.5 Operações aritméticas com números binários

As operações aritméticas com números binários são comuns em equipamentos eletrônicos como computadores, contadores e relógios digitais. As características de cada operação são apresentadas a seguir.

a) Adição

A adição em binário é igual à realizada com números decimais. A diferença é que o sistema binário possui somente os algarismos 0 e 1. O exemplo seguinte mostra a adição nos sistemas decimal e binário, em que (a) é decimal e (b) é binário.

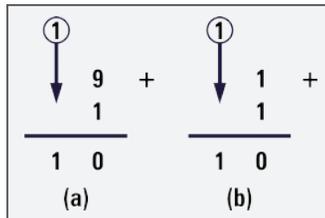


Figura 5 - Adição (a) em decimal (b) em binário

A Tabela 11 mostra a adição com os dígitos binários (A) e (B). A coluna (A+B) representa o resultado da soma dos dois números e a coluna transporte, em inglês, *carry*, mostra se ocorreu ou não o transporte na operação, também conhecido como Vai Um.

Tabela 11 - Adição

A	B	A+B	Transporte (<i>carry</i>)
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Fonte: Elaboração dos autores.

Exemplo 1: Qual o valor da soma do número $(0100)_2$ com $(0101)_2$?

	0 ¹	1	0	0
+	0	1	0	1
	1	0	0	1

O resultado da soma dos números $(0100)_2$ e $(0101)_2$ é igual a $(1001)_2$.

Exemplo 2: Qual o valor da soma do número $(10101)_2$ com $(11001)_2$?

0 ¹	0 ¹	1 ¹	0 ¹	1
0	1	0	1	1
1	0	0	0	0

Ao realizar a adição, observar a quantidade de *bits* que o sistema trabalha. Suponha que um equipamento trabalhe com números de quatro *bits* e realize a soma dos números $(1100)_2$ e $(1001)_2$.

1	1	1	0	0
	1	0	0	1
1	0	1	0	1

O resultado da operação é igual ao número binário $(10101)_2$. Como observado, ocorreu o transporte no *bit* mais significativo que resultou em um número com cinco *bits*, ou seja, um *bit* a mais do que o sistema trabalha. Como o equipamento é limitado a quatro *bits*, o resultado da soma entre $(1100)_2$ e $(1001)_2$ será apresentado como $(0101)_2$. Obviamente que este valor está incorreto. Isso acontece porque a operação ultrapassou a capacidade do sistema. Este estouro de capacidade, comum em sistemas aritméticos, é conhecido por *overflow*. Os equipamentos possuem mecanismos para detectar o *overflow* e não fornecer uma informação incorreta de alguma operação aritmética.

b) Subtração

A subtração de números binários segue o mesmo processo que a do sistema decimal. Deve-se prestar atenção na linha 0 – 1, pois há o empréstimo da coluna seguinte, conforme demonstra a Tabela 12.

Tabela 12 - Subtração

A	B	A-B	Empréstimo
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	0
1	1	0	0

Fonte: Elaboração dos autores.

Exemplo 1: Qual o valor da subtração do número $(110)_2$ com $(010)_2$?

1	1	0
0	1	0
1	0	0

O resultado da subtração dos números $(110)_2$ e $(010)_2$ é igual a $(100)_2$.

Exemplo 2: Qual o valor da subtração do número $(1001)_2$ com $(0101)_2$?

1	0	0	1
0	1	0	1
0	1	0	0



Overflow: termo em inglês usado para indicar que houve estouro na capacidade de cálculo do circuito digital.

A operação de subtração é muito comum em calculadoras digitais e computadores, em que circuitos específicos como subtratores são projetados para realizar essa tarefa. Porém, alguns equipamentos realizam a subtração de forma diferente, utilizando a adição, neste caso, $A + (-B)$. É necessária a representação negativa do número (**B**). Para isso, dois métodos são utilizados: *bit* de sinal ou complemento verdadeiro.

- *Bit* de sinal

Esse método de representação negativa utiliza um *bit* do número como *bit* de sinal, sendo normalmente o mais significativo (MSB). Em geral, é padronizado que o nível lógico 0 representa os números positivos e o nível 1 os números negativos.

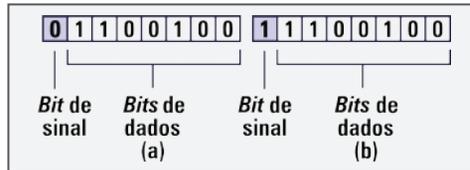


Figura 6 - *Bit* de sinal (a) positivo e (b) negativo

O método é pouco utilizado nos circuitos eletrônicos digitais devido à complexidade de implementação do sistema.

- Complemento de 2

O método complemento de 2 é o mais utilizado para representação negativa dos números binários. Ele consiste em duas etapas: complemento de 1 e, posteriormente, o complemento de 2.

Para obter o complemento de 1 de um número binário, é necessário inverter cada *bit* do respectivo número, também conhecido como *bit* complemento. O exemplo a seguir mostra o complemento de 1 do número 1001.

1	0	0	1
↓	↓	↓	↓
0	1	1	0

Para obter o complemento de 2, basta somar 1 ao complemento de 1 do número. Assim, o complemento de 2 do número 1001 é o resultado do complemento de 1 mais 1, conforme este exemplo:

0	1	1	0	
			1	+
0	1	0	0	

Exemplo: Qual o valor em binário dos números decimais -3, -12 e -21?

- $3 = (11)_2$
- $12 = (1100)_2$
- $21 = (11101)_2$

Após converter os números decimais em binário, faz-se o complemento de 1 dos números.

1	1
↓	↓
0	0

1	1	0	0
↓	↓	↓	↓
0	0	1	1

1	1	1	0	1
↓	↓	↓	↓	↓
0	0	0	1	0

O próximo passo é somar 1 ao complemento de 1 dos números.

0	0
	1
0	0

0	0	1	1
			1
0	1	0	0

0	0	0	1	0
				1
0	0	0	1	1

O resultado obtido é o complemento de 2 ou a representação negativa dos números supracitados. Assim, o binário $(01)_2$ é a representação do número -3. O binário $(0100)_2$ é a representação do número -12 e $(00011)_2$ representa o número -21.

c) Multiplicação

A multiplicação com números binários segue a mesma forma que a realizada com números decimais.

Tabela 13 - Multiplicação de números binários

A	B	AxB
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

Exemplo: qual o valor da multiplicação entre os números binários $(1101)_2$ e $(10)_2$?

$$\begin{array}{r}
 1101 \\
 \times 10 \\
 \hline
 0000 \\
 + 1101 \\
 \hline
 11010
 \end{array}$$

O resultado da multiplicação entre $(1101)_2$ e $(10)_2$ é igual a $(11010)_2$. Qual o resultado da multiplicação entre $(10111)_2$ e $(101)_2$?

$$\begin{array}{r}
 10111 \\
 \times 101 \\
 \hline
 10111 \\
 00000 \\
 + 10111 \\
 \hline
 1110011
 \end{array}$$

O resultado da multiplicação entre $(10111)_2$ e $(101)_2$ é igual a $(1110011)_2$.

d) Divisão

A divisão com números binários segue o mesmo padrão que a divisão feita com números decimais. O divisor é subtraído do dividendo até que o resultado seja um valor menor que ele. Então, completa-se o quociente com o número 0 e o que sobrar é o resto.

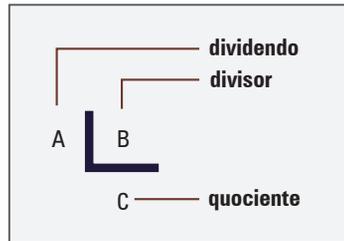


Figura 7 - Divisão

Exemplo: Qual o valor da divisão entre os números $(1101)_2$ e $(10)_2$?

$$\begin{array}{r}
 1101 \quad | \quad 10 \\
 - 10 \quad \downarrow \\
 \hline
 010 \\
 - 10 \quad \downarrow \\
 \hline
 001
 \end{array}$$

O resultado da divisão entre os números $(1101)_2$ e $(10)_2$ é $(110)_2$ e o resto é igual a 1. Observe a seguir a divisão entre os números $(1111)_2$ e $(101)_2$.

$$\begin{array}{r}
 1111 \quad | \quad 101 \\
 - 101 \quad \downarrow \\
 \hline
 0101 \\
 - 101 \quad \downarrow \\
 \hline
 0001
 \end{array}$$

O resultado da divisão entre os números $(1111)_2$ e $(101)_2$ é $(110)_2$ e o resto é igual a 1.

1.2 Álgebra *booleana*

A linguagem utilizada nos equipamentos digitais é a binária, na qual a informação é composta de uma sequência de 0 e 1. Esses circuitos usam um sistema matemático de análise lógica chamada *álgebra booleana* para adaptação, análise e implementação dos projetos de sistemas digitais.



Álgebra *booleana*: sistema matemático criado por George Boole, usado para implementar todas as funções lógicas digitais presentes nos equipamentos eletrônicos digitais.

Dessa forma, a álgebra *booleana* permite relacionar as variáveis de entrada de um sistema ao nível lógico 0 ou 1, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Variáveis *booleanas*

Nível lógico 0	Nível lógico 1
Sim	Não
Aberto	Fechado
Falso	Verdadeiro
Cortado	Saturado
Desligado	Ligado
Vazio	Cheio

Fonte: Elaboração dos autores.

Diferentemente da álgebra utilizada no dia a dia, a álgebra *booleana* possui apenas dois valores possíveis para as variáveis de entrada de um sistema. Valores de tensão podem ser representados por níveis lógicos. Por exemplo, 0 V equivale ao nível 0 e 5 V equivale a 1, ou a faixa de 0 a 1 V equivale a 0 e de 1 a 2 V ao nível 1.

A utilização desse sistema lógico fica a critério do projetista, adaptando as variáveis de entrada aos níveis lógicos citados. A álgebra *booleana* usa três funções *booleanas* básicas nos sistemas digitais. Através delas, é possível obter o resultado desejado de um projeto.

1.2.1 Funções *booleanas*

A álgebra *booleana* possui três funções básicas conhecidas como operações lógicas: **AND** (**E**, em português), **OR** (**OU**, em português) e **NOT** (**NÃO**, em português). Resistores, diodos e transistores são utilizados nos circuitos digitais para executar tais funções .

a) Função **E** (**AND**)

Também conhecida como interseção ou conjunção, a função (**E**) estabelece que o resultado será nível lógico 1 somente se todas as condições forem satisfeitas. O símbolo da porta (**E**) de duas entradas e a expressão de saída são mostrados na Figura 8.



Figura 8 - Porta lógica (**E**)

Essa expressão é lida (A) e (B), e a lógica (E) é representada pelo ponto (.), podendo este último ser omitido ($S=AB$). Ela é visualizada na Tabela 15, conhecida como *tabela-verdade* da função (E). A saída só será nível 1 quando todas as entradas também forem nível 1.

Tabela 15 - Tabela-verdade da função (E)

A	B	$S=A.B$ ou AB
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

A Figura 9 ajuda a compreensão da lógica (E) mediante um *circuito discreto*.

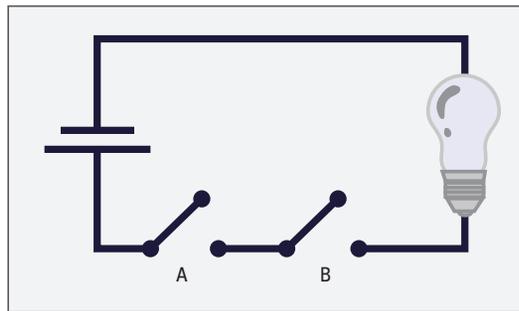


Figura 9 - Circuito discreto da lógica (E)

A álgebra *booleana* é aplicada ao circuito da Figura 9 para formar a lógica (AND). A chave aberta representa nível 0 e a chave fechada, nível 1. A lâmpada segue o mesmo padrão: lâmpada apagada é nível 0 e acesa, nível 1. A análise de cada linha da tabela-verdade a seguir é realizada.

Tabela 16 - Tabela-verdade do circuito da Figura 9

Chave A	Chave B	Lâmpada
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.



Tabela-verdade: conjunto de variáveis possíveis que o circuito digital gera na sua saída.

Circuito discreto: circuito de uma porta lógica em que sua configuração executa a mesma função que a porta lógica citada; formado por componentes – resistores, chaves, lâmpadas.

A primeira linha da tabela é representada pelas chaves (A) e (B) iguais a 0. Nesse caso, as duas chaves estão abertas e não flui corrente pelo circuito, fazendo com que a lâmpada permaneça apagada ($S=0$).

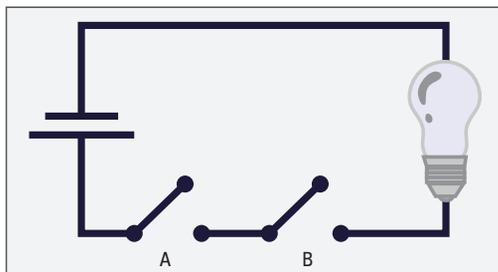


Figura 10 - Chaves (A) e (B) iguais a 0

A segunda linha é representada pela chave (A=0) e (B=1), sendo a chave (A) aberta e (B) fechada. Nessa condição, não flui corrente pelo circuito e a lâmpada permanece apagada ($S=0$).

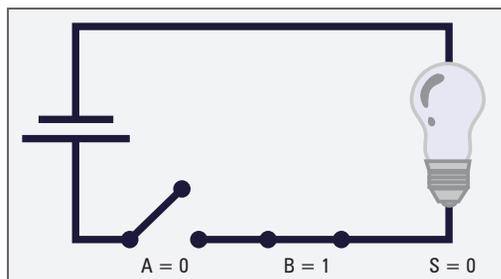


Figura 11 - Chaves (A=0) e (B=1)

A terceira linha é o inverso da segunda. A chave (A) está fechada (A=1) e (B) está aberta (B=0). Ainda assim, não flui corrente pelo circuito e a lâmpada permanece apagada ($S=0$).

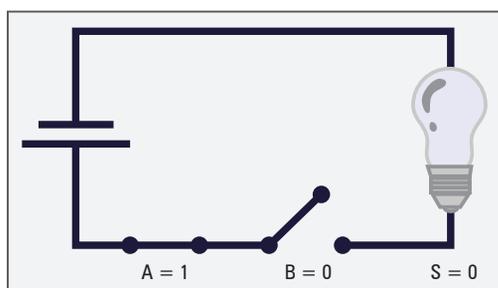


Figura 12 - Chaves (A=1) e (B=0)

A quarta e última linha é representada pelas chaves iguais a 1. Nesse caso, as duas chaves estão fechadas, a corrente flui pelo circuito e a lâmpada acende ($S=1$). Essa é a única situação em que a lâmpada fica acesa.

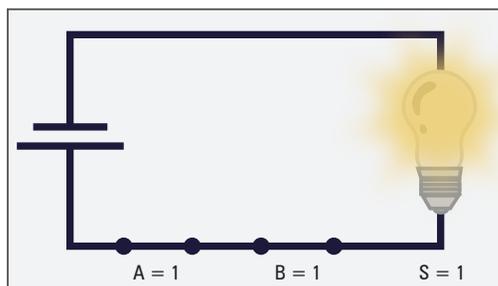


Figura 13 - Chaves (A=1) e (B=1)

Outra maneira de analisar um circuito lógico é por formas de onda de entrada. A tabela-verdade é utilizada para saber qual o valor da saída, ilustrada na Figura 14 .

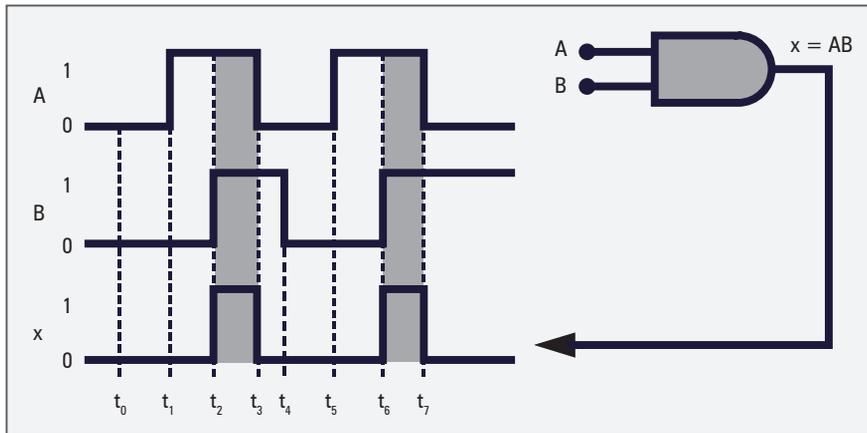


Figura 14 - Análise por meio de forma de onda

A lógica (**E**) estabelece que a saída só será 1 quando todas as entradas forem 1. Dessa forma, somente durante os intervalos $(t_2 - t_3)$ e $(t_6 - t_7)$ essa condição é satisfeita. Para todos os outros casos, a saída será 0.

Até este momento foi apresentada a porta (**E**) que possui duas entradas, porém esse número pode ser maior. A tabela-verdade de uma porta (**E**) de três entradas é mostrada na Tabela 17.

Tabela 17 - Tabela-verdade da lógica (**E**) de três entradas

A	B	C	S=ABC
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

b) Função **OU** (OR)

Também conhecida como união ou disjunção, a função (**OU**) estabelece que o resultado será nível lógico 1 se pelo menos uma das condições forem satisfeitas. O símbolo da porta (**OU**) e a expressão de saída são mostrados na Figura 15.



Figura 15 - Porta lógica (**OU**)

A expressão acima é lida (**A**) ou (**B**) e a lógica (**OU**) é representada pelo sinal (+). Ela é visualizada na Tabela 18. Nessa lógica, basta ter um 1 na entrada para a saída também ser 1.

Tabela 18 - Tabela-verdade da função (**OU**)

A	B	S=A.B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

A Figura 16 ajuda a compreender a lógica (**OU**) por meio de um circuito discreto.

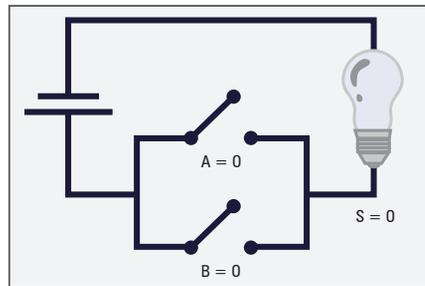


Figura 16 - Circuito discreto da lógica (**OU**)

Da mesma forma para a lógica (**E**), a álgebra *booleana* é aplicada ao circuito da Figura 16 para formar a lógica (**OU**), sendo chave aberta para nível 0 e chave fechada para nível 1. Lâmpada apagada é nível 1200 e acesa, nível 1. A análise de cada linha da tabela-verdade a seguir é realizada.

Tabela 19 - Tabela-verdade do circuito discreto da lógica (**OU**)

Chave A	Chave B	Lâmpada
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

A primeira linha da tabela é representada pelas chaves (**A**) e (**B**) iguais a 0. Nesse caso, as duas chaves estão abertas e não flui corrente pelo circuito, fazendo com que a lâmpada permaneça apagada (**S=0**).

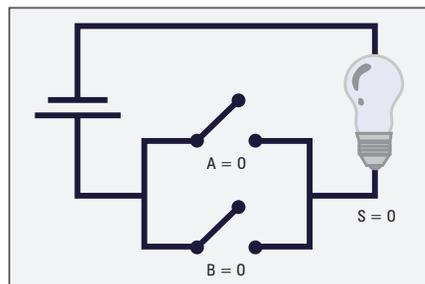


Figura 17 - Chaves (**A**) e (**B**) iguais a 0

A segunda linha é representada pela chave ($A=0$) e ($B=1$), sendo a chave (A) aberta e (B) fechada. A corrente flui pelo circuito através da chave (B) e a lâmpada acende ($S=1$).

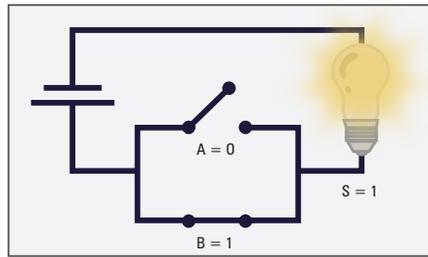


Figura 18 - Chaves ($A=0$) e ($B=1$)

Na terceira linha, a chave (A) está fechada ($A=1$) e (B) está aberta ($B=0$). Nessa condição, a corrente flui pelo circuito através da chave (A) e a lâmpada permanece acesa ($S=1$).

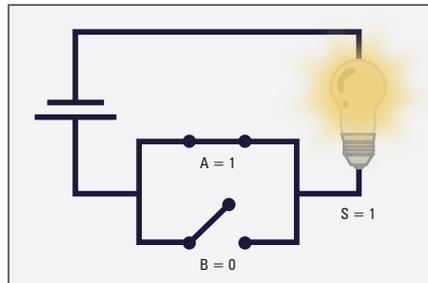


Figura 19 - Chaves ($A=1$) e ($B=0$)

A quarta linha é representada pelas chaves iguais a 1. Neste caso, as duas chaves estão fechadas, a corrente flui pelo circuito e a lâmpada permanece acesa ($S=1$).

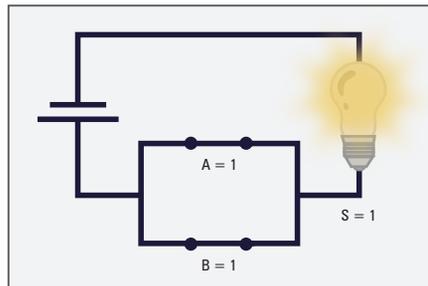


Figura 20 - Chaves ($A=1$) e ($B=1$)

A análise através de formas de onda de entrada também é feita com a lógica (OU) conforme a Figura 21.

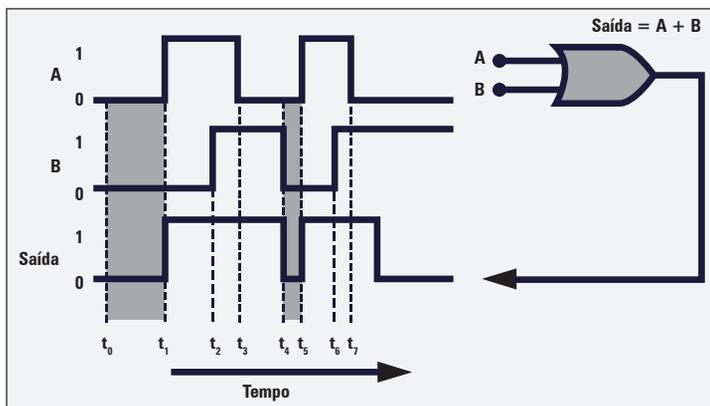


Figura 21 - Análise por meio de forma de onda

A lógica (**OU**) estabelece que a saída será 1 quando uma das entradas forem 1. Por outro lado, a saída será 0 apenas quando todas as entradas também forem 0. Isso ocorre durante os intervalos ($t_0 - t_1$) e ($t_4 - t_5$) na forma de onda como visto na Figura 21.

A lógica (**OU**) segue o mesmo padrão, independentemente do número de entradas. A Tabela 20 se refere à porta (**OU**) de três entradas.

Tabela 20 - Tabela-verdade da lógica (**OU**) de três entradas

A	B	C	S=A+B+C
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

c) Função **NÃO** (NOT)

Também conhecida como inversora, a função (**NÃO**) estabelece uma inversão. A saída terá o valor invertido da entrada. O símbolo da porta (**NÃO**) e a expressão de saída são mostrados na Figura 22.

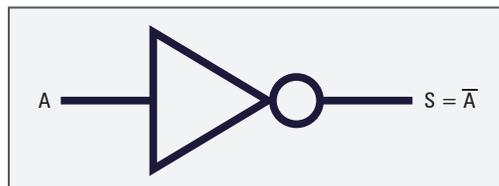


Figura 22 - Porta lógica (**NÃO**)

Essa expressão é chamada de (**A**) negado ou complemento de (**A**), e a lógica (**NÃO**) é representada pela barra sobre a letra. A tabela-verdade da função (**NÃO**) é mostrada a seguir.

Tabela 21 - Tabela-verdade da função (**NÃO**)

A	S = \bar{A}
0	1
1	0

Fonte: Elaboração dos autores.

A Figura 23 auxilia na compreensão da lógica (**NÃO**) através de um circuito discreto.

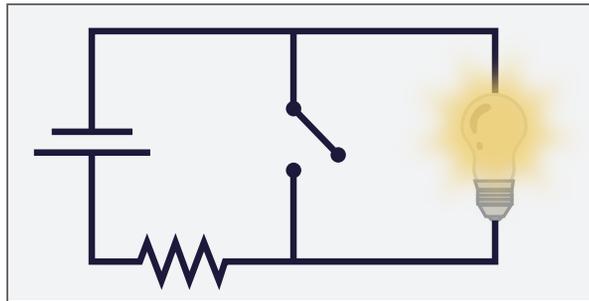


Figura 23 - Circuito discreto da lógica (**NÃO**)

Para realizar a análise, infere-se que a chave aberta representa nível 0 e fechada, nível 1. Lâmpada apagada é nível 0 e acesa é nível 1. A análise de cada linha da tabela-verdade a seguir é realizada.

Tabela 22 - Tabela-verdade do circuito discreto da lógica (**NÃO**)

Chave A	Lâmpada
0	1
1	0

Fonte: Elaboração dos autores.

A primeira linha da tabela é representada pela chave (**A**) igual a 0, ou seja, chave (**A**) aberta. Neste caso, a corrente flui pela lâmpada e a mantém acesa (**S=1**).

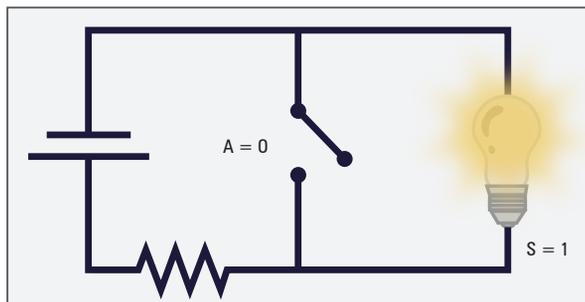


Figura 24 - Chave (**A=0**)

A segunda linha é representada pela chave (**A**) igual a 1, ou seja, chave (**A**) fechada. A chave fechada representa um curto-circuito e faz com que a corrente não passe pela lâmpada. A lâmpada fica apagada (**S=0**).

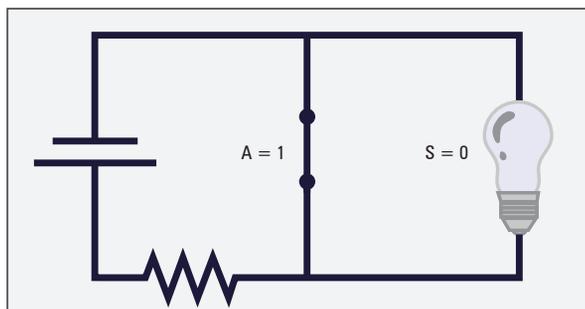


Figura 25 - Chave (**A=1**)

A análise por intermédio de formas de onda de entrada também é feita com a lógica (**NÃO**). Ela estabelece que a saída será sempre o inverso da entrada. Não existe porta (**NÃO**) com mais de uma entrada.

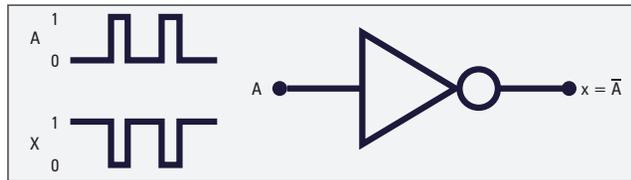


Figura 26 - Análise por meio de forma de onda

As portas lógicas citadas são classificadas como básicas, pois executam funções *booleanas* básicas. Além delas, existem portas que são combinações das portas básicas e recebem o nome de portas lógicas universais e comparadoras. São elas **NÃO-E** (**NAND**) e **NÃO-OU** (**NOR**).

d) Função **NÃO-E** (**NAND**)

A função (**NÃO-E**) é a combinação da função (**E**) com a (**NÃO**). A expressão dessa função é o resultado de uma porta (**E**) seguida de uma inversora (**NOT**). A Figura 27 mostra o símbolo da porta lógica (**NÃO-E**) de duas entradas e sua respectiva saída. O pequeno círculo na ponta da porta (**E**) indica a inversão.



Figura 27 - Porta lógica (**NÃO-E**)

A expressão da Figura 27 é chamada de (**A**) e (**B**) negados. A Tabela 23 mostra a saída da porta (**NÃO-E**) de duas entradas.

Tabela 23 - Tabela-verdade da função (**NÃO-E**)

		E	NÃO-E
A	B	$S = A.B$	$S = \overline{A.B}$
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Fonte: Elaboração dos autores.

A Figura 28 mostra a forma de onda das entradas e o respectivo valor de saída.

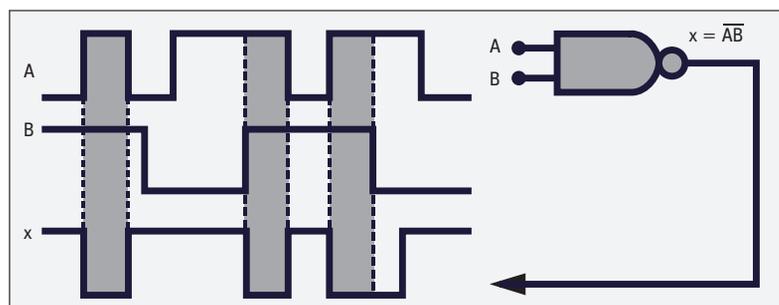


Figura 28 - Análise por meio de forma de onda

e) Função **NÃO-OU** (NOR)

A função (**NÃO-OU**) é a combinação da função (**OU**) com a (**NÃO**). Sua expressão de saída é o resultado de uma porta (**OU**) seguida de uma inversora (**NOT**). A Figura 29 mostra o símbolo da porta lógica (**NÃO-OU**) de duas entradas e sua respectiva saída. O pequeno círculo na ponta da porta (**OU**) indica a inversão.



Figura 29 - Porta lógica (**NÃO-OU**)

A expressão da Figura 29 é chamada de (**A**) ou (**B**) negados. A Tabela 24 mostra a saída da porta (**NÃO-OU**) de duas entradas.

Tabela 24 - Tabela-verdade da função (**NÃO-OU**)

		OU	NÃO-OU
A	B	$S = A + B$	$S = \overline{A + B}$
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

Fonte: Elaboração dos autores.

A Figura 30 mostra a forma de onda das entradas e o respectivo valor de saída.

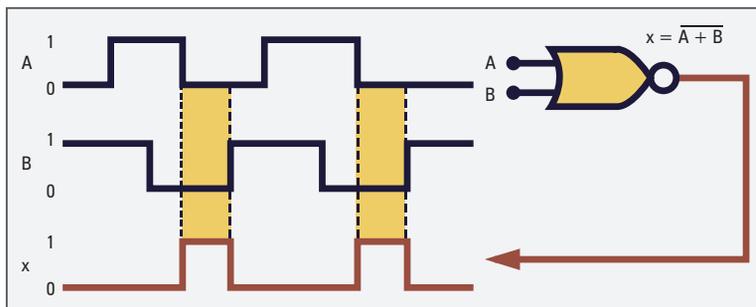


Figura 30 - Análise por meio de forma de onda

f) Função **OU-EXCLUSIVO** (XOR)

Também conhecida como comparadora de desigualdade, a saída será nível lógico 1 somente quando as entradas forem desiguais (diferentes). A Figura 31 mostra o símbolo da porta lógica (**XOR**) de duas entradas e sua respectiva saída.



Figura 31 - Porta lógica (XOR)

A expressão de saída é chamada de **(A)** ou exclusivamente **(B)**. A Tabela 25 mostra a saída da porta **(OU EXCLUSIVO)** de duas entradas.

Tabela 25 - Tabela-verdade da função **(OU-EXCLUSIVO)**

A	B	$S = A \oplus B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Fonte: Elaboração dos autores.

g) Função **NÃO-OU EXCLUSIVO (XNOR)**

A função **(XNOR)** é conhecida como comparadora de igualdade e sua saída é nível lógico 1 somente quando as entradas forem iguais. A Figura 32 mostra o símbolo da porta lógica **(XNOR)** de duas entradas e sua respectiva saída.



Figura 32 - Porta lógica **(XNOR)**

A expressão de saída é chamada de **(A)** ou exclusivamente **(B)**. A Tabela 26 mostra a saída da porta **(NÃO-OU EXCLUSIVO)** de duas entradas.

Tabela 26 - Tabela-verdade da função **(NÃO-OU EXCLUSIVO)**

A	B	$S = \overline{A \oplus B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

Por serem portas comparadoras, as funções **(XOR)** e **(XNOR)** possuem apenas duas entradas.

Essas funções lógicas são normalmente representadas nos circuitos pelas respectivas portas lógicas, em que cada uma possui um símbolo específico. Entretanto, não existe apenas um órgão mundial que regulamenta a padronização desses símbolos, fazendo com que existam diversos órgãos que atendem a diferentes países.

São duas as simbologias apresentadas neste livro, o padrão ANSI e o IEC. O *American National Standards Institute*, em português, Instituto Nacional Americano de Padrões, conhecido pela sigla ANSI, é um órgão americano que possui diversos padrões, sendo seguidos por vários países. O padrão ANSI é representado no Brasil pela ABNT.

Outro padrão a ser apresentado é o da *International Electrotechnical Commission*, em português, da Comissão Eletrotécnica Internacional, conhecido pela sigla IEC. É um órgão internacional de padronização de tecnologias eletrônicas e elétricas, sendo utilizada, principalmente, pelos países da Europa.

Com o intuito de conhecer as simbologias apresentadas nas literaturas de eletrônica digital, as representações das portas lógicas são demonstradas na Tabela 27 nos padrões ANSI e IEC.

Tabela 27 - Representação das portas lógicas

Portas lógicas	Padrão ANSI	Padrão IEC
AND (E)	 $S = A.B$	
OR (OU)	 $S = A + B$	
NOT (NÃO)	 $S = \bar{A}$	
NAND (NÃO-E)	 $S = \overline{A.B}$	
NOR (NÃO-OU)	 $S = \overline{A+B}$	
XOR (OU EXCLUSIVO)	 $S = A \oplus B$	
XNOR (NÃO-OU EXCLUSIVO)	 $S = A \odot B$	

Fonte: Elaboração dos autores.

1.2.2 Extração de funções booleanas

Conforme visto nas funções booleanas, as situações cotidianas são adequadas à álgebra booleana levando em consideração as variáveis do problema. Às vezes, as situações podem ser solucionadas por meio das funções booleanas existentes, porém, em diversos casos, é necessário desenvolver funções que se adequem ao problema. A extração de funções é muito comum em projetos de sistemas digitais, nos quais o circuito a ser projetado atende exatamente às necessidades existentes. Serão analisadas a seguir duas situações-problema e as suas respectivas soluções.

- Situação-problema 1

Um avião possui dois trens de pouso. Uma luz verde no painel da cabine do piloto relativa ao funcionamento dos trens de pouso deverá acender se os dois trens de pouso estiverem funcionando perfeitamente, caso contrário, deverá permanecer apagada.

Solução:

Para a situação-problema, o primeiro passo consiste em considerar as variáveis e funções do problema. As variáveis, nesse caso, são os trens de pouso do avião em função de acender ou não a luz verde no painel da cabine do piloto.

O segundo passo é atribuir valores às condições das variáveis e das funções. Trem de pouso não funcionando adequadamente equivale a nível lógico 0 e funcionando corretamente a 1. Luz verde apagada na cabine do piloto equivale a nível 0 e acesa a 1. Não existe padronização ou regra para realizar essa atribuição, ficando a critério do projetista.

O terceiro passo é montar a tabela-verdade do circuito, o valor lógico na saída está de acordo com a função do projeto.

Tabela 28 - Tabela-verdade da situação-problema 1

Trem de pouso 1	Trem de pouso 2	Luz verde
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

A função extraída da tabela-verdade do projeto tem as mesmas características que a porta lógica (OU). Sendo assim, o circuito a ser montado terá as duas entradas (os dois computadores) ligadas a uma porta (OU), conforme a Figura 33.



Figura 33 - Circuito digital da situação-problema 1

O projeto da situação-problema 1 emprega um circuito com uma simples porta (OU), acendendo uma luz verde no painel do piloto toda vez que os dois trens de pouso estiverem funcionando perfeitamente. O que acontece comumente é que nem sempre os projetos de situações-problema resultam em circuitos simples como o da porta (OU). Na maioria dos casos, o circuito a ser montado é criado a partir de diversas portas lógicas, conforme a situação-problema 2.

• Situação-problema 2

Um avião possui três computadores que controlam os sistemas mecânicos e elétricos. Por questões de segurança, o avião só pode decolar se pelo menos dois computadores estiverem funcionando, caso contrário, não poderá fazê-lo, ocasionando o acendimento de uma indicação de falha no painel do piloto.

Solução:

O primeiro passo requer considerar as variáveis e funções do problema. Os computadores são as variáveis e a função consiste em acender ou não a indicação de falha no painel do piloto.

O segundo passo é atribuir valores às condições das variáveis e da função. Computador que não está funcionando equivale a nível lógico 0 e funcionando, a 1. Indicação no painel apagada equivale a nível 0 e acesa, a 1.

O terceiro passo é montar a tabela-verdade do circuito. O número de linhas de uma tabela está relacionado ao número de variáveis de entrada, aplicando-se a seguinte fórmula:

$$2^N = L$$

Em que:

- (N) = variáveis de entrada;
- (L) = número de linhas da tabela.

Assim, a tabela-verdade da situação-problema 2 com três variáveis (três computadores) possui oito linhas, pois: $2^3 = 8$.

Tabela 29 - Tabela-verdade da situação-problema 2

Computador 1	Computador 2	Computador 3	Indicação de falha no painel
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

O quarto passo é extrair a função da tabela-verdade. O problema agora é que nenhuma das funções possui a tabela-verdade igual à mostrada anteriormente. Assim, é necessário utilizar técnicas para extrair funções *booleanas* mais complexas, conhecidas como formas canônicas. As formas canônicas são extraídas de duas maneiras: conjuntiva e disjuntiva.

a) Forma canônica conjuntiva

Para extrair a forma canônica conjuntiva, quatro passos precisam ser seguidos. São eles:

- 1º passo - um termo é gerado para cada linha em que a saída é igual a 0;
- 2º passo - cada variável do termo é ligada pela função (OU);
- 3º passo - se a variável for nível lógico 1, ela é negada;
- 4º passo - cada termo é ligado pela função (E).

Descritos os passos, a forma canônica conjuntiva da tabela-verdade da situação-problema 2 é extraída da seguinte forma:

- 1º passo - apenas as saídas em nível 0 são marcadas;

Tabela 30 - Primeiro passo para extração da tabela-verdade da situação-problema 2

Computador 1	Computador 2	Computador 3	Indicação de falha no painel
0	0	0	<u>0</u>
0	0	1	<u>0</u>
0	1	0	<u>0</u>
0	1	1	1
1	0	0	<u>0</u>
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

- 2º passo - as variáveis de entrada recebem o nome de (A), (B) e (C) no lugar de computador 1, 2 e 3, respectivamente, e a saída o nome de (S) no lugar de ar-condicionado. Cada variável do termo é ligada pela função (OU);

Tabela 31 - Segundo passo para extração da tabela-verdade da situação-problema 2

A	B	C	S	
0	0	0	<u>0</u>	A+B+C
0	0	1	<u>0</u>	A+B+C
0	1	0	<u>0</u>	A+B+C
0	1	1	1	
1	0	0	<u>0</u>	A+B+C
1	0	1	1	
1	1	0	1	
1	1	1	1	

Fonte: Elaboração dos autores.

- 3º passo - consiste em negar cada variável do termo com nível lógico 1;

Tabela 32 - Terceiro passo para extração da tabela-verdade da situação-problema 2

A	B	C	S	
0	0	0	<u>0</u>	A+B+C
0	0	1	<u>0</u>	A+B+C
0	1	0	<u>0</u>	A+B+C
0	1	1	1	
1	0	0	<u>0</u>	A+B+C
1	0	1	1	
1	1	0	1	
1	1	1	1	

Fonte: Elaboração dos autores.

- 4º Passo - consiste em ligar cada termo pela função (E), formando a expressão de saída.

$$S = (A+B+C) \cdot (A+B+\bar{C}) \cdot (A+\bar{B}+C) \cdot (\bar{A}+B+C)$$

A partir dessa expressão, utilizando as portas lógicas (E), (NÃO) e (OU), é possível montar o circuito que executará a função desejada.

b) Forma canônica disjuntiva

A extração da forma canônica disjuntiva também segue os quatro passos da anterior, porém com algumas diferenças.

- 1º passo - um termo é gerado para cada linha em que a saída é igual a 1.
- 2º passo - cada variável do termo é ligada pela função (E).
- 3º passo - se a variável for nível lógico 0, ela é negada.
- 4º passo - cada termo é ligado pela função (OU).

Assim, a forma canônica disjuntiva da tabela-verdade da situação-problema 2 é extraída da seguinte forma:

- 1º passo - apenas as saídas em nível 1 são marcadas;

Tabela 33 - Extração da forma canônica disjuntiva

Computador 1	Computador 2	Computador 3	Indicação de falha no painel
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	<u>1</u>
1	0	0	0
1	0	1	<u>1</u>
1	1	0	<u>1</u>
1	1	1	<u>1</u>

Fonte: Elaboração dos autores

- 2º passo - cada variável do termo é ligada pela função (E);

Tabela 34 - Primeiro passo da extração da forma canônica disjuntiva

A	B	C	S	
0	0	0	0	
0	0	1	0	
0	1	0	0	
0	1	1	<u>1</u>	A.B.C
1	0	0	0	
1	0	1	<u>1</u>	A.B.C
1	1	0	<u>1</u>	A.B.C
1	1	1	<u>1</u>	A.B.C

Fonte: Elaboração dos autores.

- 3º passo - consiste em negar cada variável do termo com nível lógico 0;

Tabela 35 - Segundo passo da extração da forma canônica disjuntiva

A	B	C	S	
0	0	0	0	
0	0	1	0	
0	1	0	0	
0	1	1	<u>1</u>	$\bar{A}.B.C$
1	0	0	0	
1	0	1	<u>1</u>	$A.\bar{B}.C$
1	1	0	<u>1</u>	$A.B.\bar{C}$
1	1	1	<u>1</u>	$A.B.C$

Fonte: Elaboração dos autores.

- 4º passo - consiste em ligar cada termo pela função (OU), formando a expressão de saída.

$$S = (\bar{A}.B.C) + (A.\bar{B}.C) + (A.B.\bar{C}) + (A.B.C)$$

Conforme apresentados os passos para extração da função de saída do circuito digital, a forma canônica conjuntiva é o oposto da disjuntiva. Assim, o circuito resultante executará a mesma função, independente da forma como foi extraído. Na prática, a forma mais utilizada é a disjuntiva.

1.2.3 Simplificação de funções *booleanas*

A simplificação de funções *booleanas* é muito comum nos circuitos digitais devido ao grande número de termos que alguns projetos apresentam, sendo muito importante sua aplicação. Consiste em reduzir a função de saída a poucos termos sem alterar a lógica do sistema e, conseqüentemente, o número de portas lógicas. Para isso, são usadas diversas propriedades, teoremas *booleanos* e o mapa de Karnaugh, conforme será mostrado a seguir. Para melhor compreensão, basta atribuir valores 0 ou 1 às variáveis e verificar o resultado.

- a) Postulado da adição - segue a lógica da função (OU).

I) $A+0=A$

$$A=0 \rightarrow 0+0=0$$

$$A=1 \rightarrow 1+0=1$$

II) $A+1=1$

$$A=0 \rightarrow 0+1=1$$

$$A=1 \rightarrow 1+1=1$$

III) $A+A=A$

$$A=0 \rightarrow 0+0=0$$

$$A=1 \rightarrow 1+1=1$$

IV) $A+\bar{A}=1$

$$A=0 \rightarrow 0+1=1$$

$$A=1 \rightarrow 1+0=1$$

b) Postulado da multiplicação - segue a lógica da função (E) .

$$\begin{aligned} \text{I) } A \cdot 0 &= 0 \\ A=0 &\rightarrow 0 \cdot 0 = 0 \\ A=1 &\rightarrow 0 \cdot 1 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{II) } A \cdot 1 &= A \\ A=0 &\rightarrow 0 \cdot 1 = 0 \\ A=1 &\rightarrow 1 \cdot 1 = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{III) } A \cdot A &= A \\ A=0 &\rightarrow 0 \cdot 0 = 0 \\ A=1 &\rightarrow 1 \cdot 1 = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IV) } A \cdot \bar{A} &= 0 \\ A=0 &\rightarrow 0 \cdot 1 = 0 \\ A=1 &\rightarrow 1 \cdot 0 = 0 \end{aligned}$$

c) Postulado da complementação - segue a lógica da função (NÃO).

$$\text{I) Se } A=0 \rightarrow \bar{A}=1$$

$$\text{II) Se } A=1 \rightarrow \bar{A}=0$$

$$\begin{aligned} \text{III) } \bar{\bar{A}} &= A \\ A=0 &\rightarrow \bar{A}=1 \rightarrow \bar{\bar{A}}=0 \\ A=1 &\rightarrow \bar{A}=0 \rightarrow \bar{\bar{A}}=1 \end{aligned}$$

As propriedades algébricas usam os postulados citados para simplificação das funções booleanas.

a) Propriedade comutativa

$$A+B=B+A$$

$$A \cdot B=B \cdot A$$

b) Propriedade associativa

$$A+B+C=A+(B+C)=(A+B)+C$$

$$A \cdot B \cdot C=A \cdot (B \cdot C)=(A \cdot B) \cdot C$$

c) Propriedade distributiva

$$A \cdot (B+C)=A \cdot B+A \cdot C$$

d) Outras propriedades

$$1) \overline{A+AB} = \bar{A} \rightarrow \overline{A+AB} = \overline{A(1+B)} = \overline{A \cdot 1} = \bar{A}$$

$$2) \overline{(A+B) \cdot (A+C)} = \overline{AA+AC+AB+BC} = \overline{A+AC+AB+BC} = \overline{A \cdot (1+C+B) + BC} \\ = \overline{A \cdot 1 + BC} = \overline{A+BC}$$

$$3) A + \bar{A}B = A+B \rightarrow A + \bar{A}B = A \cdot 1 + \bar{A}B \rightarrow A(B+1) + \bar{A}B = AB + A + \bar{A}B = A + B(A + \bar{A}) \\ = A + B \cdot 1 = A+B$$

Além dos postulados e propriedades apresentados na simplificação da álgebra *booleana*, os teoremas de De Morgan também são muito utilizados.

Teoremas de De Morgan

Dois teoremas de De Morgan são muito úteis na simplificação. O primeiro diz que uma lógica (OU) complementada é igual ao complemento individual de cada variável ligada por uma lógica (E). Assim:

$$\overline{A+B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$$

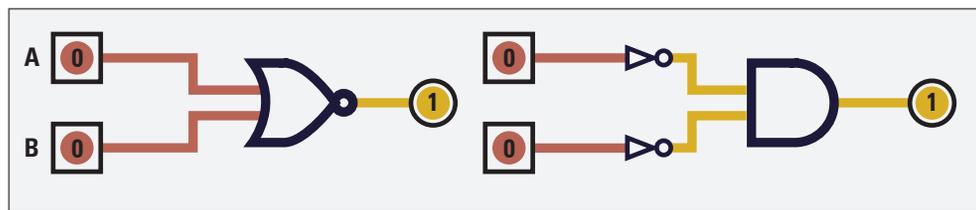


Figura 34 - Circuitos equivalentes da simplificação de De Morgan da lógica NÃO-OU (NOR)

O segundo teorema é praticamente o inverso e diz que uma lógica (E) complementada é igual ao complemento individual de cada variável ligada por uma lógica (OU), gerando a expressão a seguir:

$$\overline{A \cdot B} = \bar{A} + \bar{B}$$

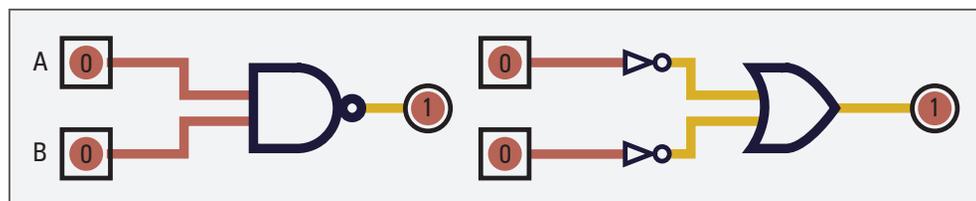


Figura 35 - Circuitos equivalentes da simplificação de De Morgan da lógica NÃO-E (NAND)

Esses teoremas são aplicados independentemente do número de variáveis que a expressão apresenta, conforme este exemplo:

$$\overline{AB+C} = \overline{AB} \cdot \bar{C} = (\bar{A} + \bar{B}) \cdot \bar{C}$$

Exemplo 1 - Simplificar a expressão utilizando os teoremas de De Morgan.

$$\overline{(\bar{A}+B) \cdot (C+\bar{D})}$$

O primeiro passo é quebrar a barra ao meio, trocando a lógica (E) pela (OU), conforme a expressão a seguir:

$$\overline{(\overline{A+B}) \cdot (C+\overline{D})} = \overline{(\overline{A+B})} \cdot \overline{(C+\overline{D})}$$

O segundo passo é quebrar a barra de cada termo, invertendo a lógica utilizada:

$$\overline{(\overline{A+B})} \cdot \overline{(C+\overline{D})} = (\overline{\overline{A}} \cdot \overline{\overline{B}}) + (\overline{\overline{C}} \cdot \overline{\overline{D}})$$

Ao aplicar o postulado da complementação, uma variável que é barrada duas vezes equivale à mesma variável sem barra, de acordo com a expressão a seguir:

$$A\overline{B} + C\overline{D}$$

Mediante as técnicas de simplificação, o resultado é uma expressão simples com um número reduzido de portas lógicas, se comparado à expressão inicial.

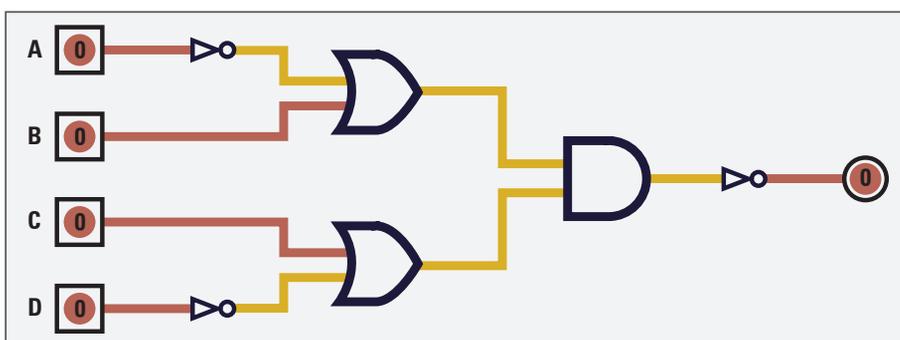


Figura 36 - Circuito original

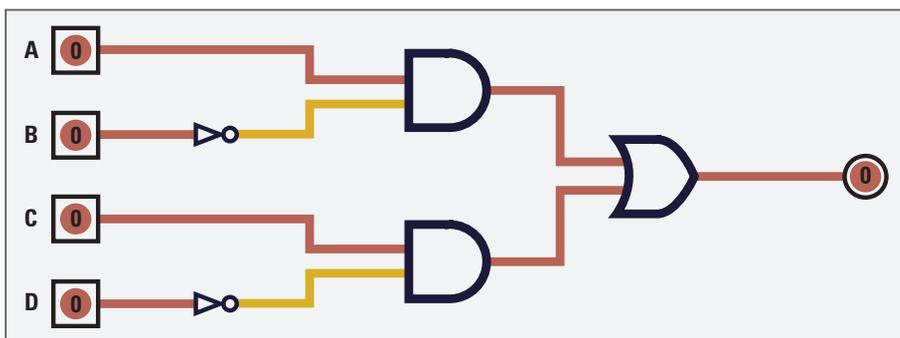


Figura 37 - Circuito simplificado

Além dos teoremas utilizados até agora, existe um método gráfico eficiente para simplificação de expressões *booleanas*, chamado mapa de Karnaugh.

A simplificação por intermédio dos diagramas ou desses mapas é considerada um dos métodos mais simples empregado em projetos de circuitos digitais. Ele consiste em representar todas as possibilidades que as variáveis assumem mediante células em um mapa. O número de células está relacionado ao número de variáveis da expressão. A Figura 38 mostra o mapa de duas variáveis.

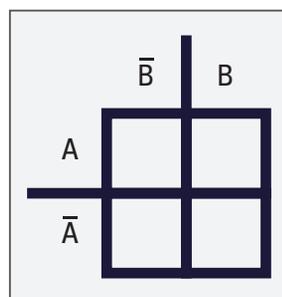
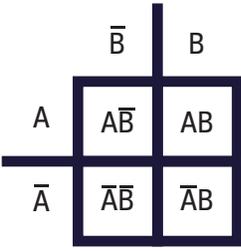


Figura 38 - Mapa de Karnaugh de duas variáveis

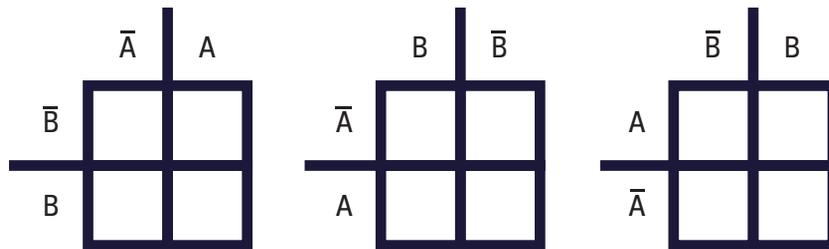
Cada célula do mapa corresponde a uma linha da tabela-verdade. A forma canônica conjuntiva é utilizada para retirar a expressão de saída. O exemplo a seguir mostra o mapa de Karnaugh para duas variáveis.

Tabela 36 - Mapa de Karnaugh de duas variáveis

A	B	S
0	0	$\bar{A}\bar{B}$
0	1	$\bar{A}B$
1	0	$A\bar{B}$
1	1	AB



Não existe uma forma padrão para a posição das variáveis de um mapa de Karnaugh, podendo ser alterada conforme estes exemplos:



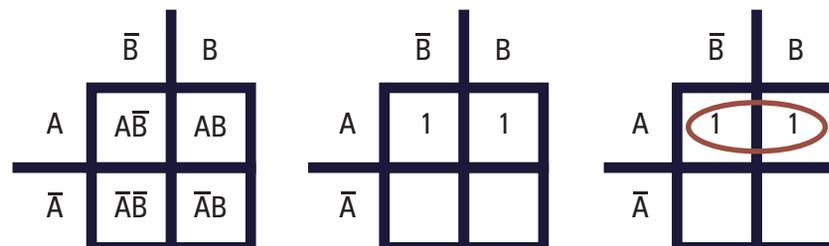
O próximo passo para simplificar uma expressão usando o mapa é agrupar o maior número de células em que a saída é igual ao nível lógico 1.

Exemplo 1 - Extrair a expressão simplificada da tabela-verdade a seguir utilizando o mapa de Karnaugh.

A	B	S
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

$A\bar{B}$
 AB

O primeiro passo é marcar no mapa as células em que a saída é igual a 1.



Efetuadaos esses passos, a expressão de saída mantém somente as variáveis que são comuns à região agrupada. No exemplo anterior, a variável (A) é a mesma para as duas células, enquanto (B)

assume valores diferentes no agrupamento (B e \bar{B}). Dessa forma, a expressão resultante do mapa de Karnaugh acima é:

$$S = A$$

Essa operação também poderia ser realizada utilizando os teoremas e postulados *booleanos*, sendo o resultado o mesmo:

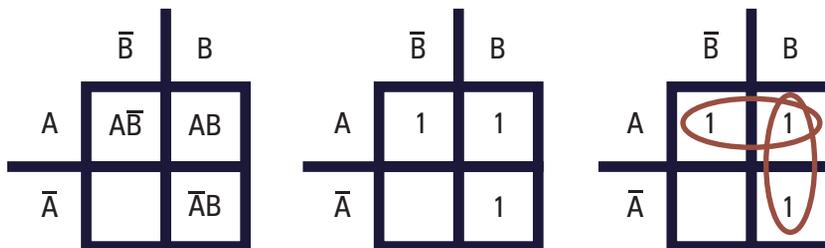
$$\begin{aligned} S &= A\bar{B} + AB \\ &= A(\bar{B} + B) \\ &= A(1) \\ &= A \end{aligned}$$

O mapa de Karnaugh é uma opção simples e rápida para simplificação de tais expressões.

Exemplo 2 - Extrair a expressão simplificada da tabela-verdade a seguir utilizando o mapa de Karnaugh.

A	B	S	
0	0	0	
0	1	1	$\bar{A}B$
1	0	1	$A\bar{B}$
1	1	1	AB

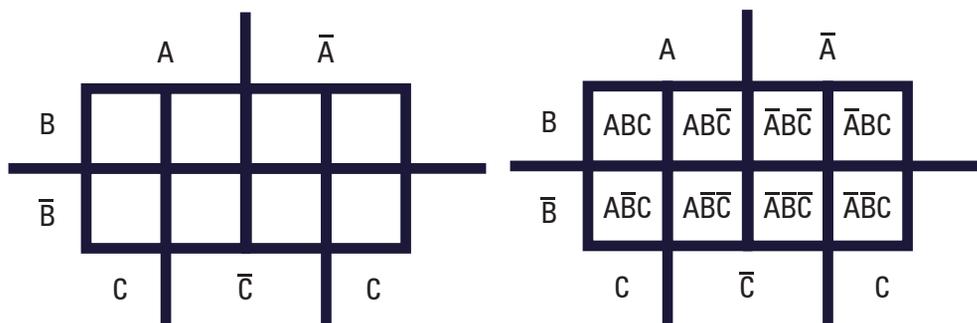
O primeiro passo é selecionar as células do mapa em que a saída é igual a 1 e agrupar o máximo de células possíveis.



O segundo passo é tirar de cada agrupamento somente as variáveis que não se alteram, conforme a expressão abaixo:

$$S = A + B$$

O resultado é igual à extração de cada agrupamento unido pela lógica (**OU**) . Os dois exemplos estudados apresentaram apenas duas variáveis, mas este número varia de acordo com a expressão a ser simplificada, não existindo limite para a quantidade de variáveis. O exemplo a seguir mostra o mapa de Karnaugh para três variáveis.

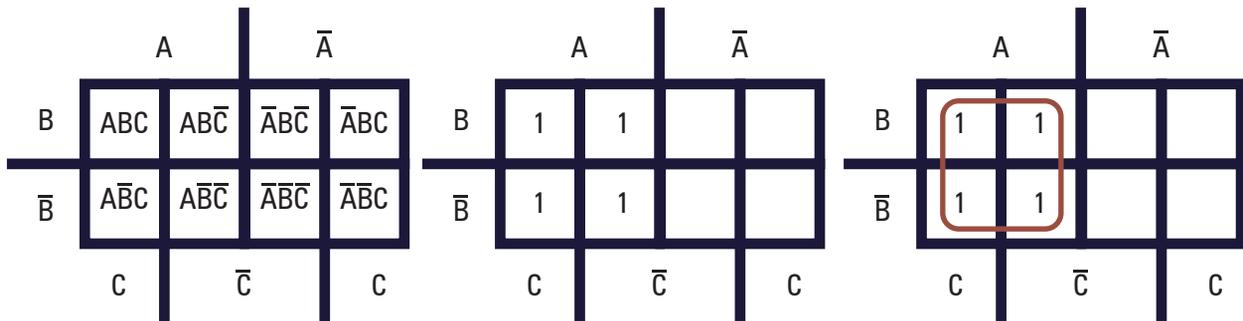


Exemplo 3 - Extrair a expressão simplificada da tabela-verdade utilizando o mapa de Karnaugh.

A	B	C	S
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

$\overline{A}\overline{B}\overline{C}$
 $\overline{A}\overline{B}C$
 $\overline{A}B\overline{C}$
 $A.B.C$

Solução:



Procedimentos para execução do exemplo 3

Retira-se a expressão simplificada após selecionar as linhas da tabela com a saída em nível lógico 1 e agrupar o máximo de células possíveis.

$$S = A$$

O agrupamento de células deve ser em números múltiplos de 2. Por esse motivo, foram agrupadas quatro células no exemplo 3, pois quanto maior for o agrupamento, maior será a simplificação. A simplificação por meio do mapa de Karnaugh é uma importante ferramenta para o estudante de eletrônica digital.

Resumindo

Neste capítulo, foram abordados assuntos de extrema importância em eletrônica digital, como os sistemas de numeração e os códigos mais utilizados pelos modernos equipamentos eletrônicos. Além disso, foram mostradas as operações aritméticas com números binários, o que facilita a compreensão do complexo trabalho que um sistema computadorizado executa.

Outro importante assunto abordado foi a álgebra *booleana*, que permite a criação de um circuito digital que atenda exatamente à necessidade do projeto desejado, utilizando as portas lógicas e suas funções de saída. As técnicas de simplificação ajudam o técnico a minimizar o tamanho dos circuitos, além de reduzir o número de portas lógicas a serem usadas.

Capítulo 2

Famílias lógicas digitais

A estrutura interna de uma porta lógica é formada por diversos componentes dentro de uma pastilha de silício e o tipo de componente utilizado define sua família lógica.

A evolução da eletrônica digital se deu a partir de pequenos circuitos formados por diversos componentes de forma integrada que executavam as funções lógicas digitais, considerada uma grande evolução para a época. Esses circuitos receberam o nome de circuitos integrados (CI) e foram o início da era digital, em que grandes e volumosos equipamentos foram substituídos por versões cada vez menores.

Entretanto, a evolução dos circuitos integrados ocorreu a partir da integração de diferentes componentes em larga escala, determinando sua capacidade e tecnologia. Assim, as famílias lógicas digitais são caracterizadas pelas técnicas de fabricação, pelo tipo de componente empregado em sua construção e integração, tendo cada uma características e aplicações específicas.

2.1 Características das famílias lógicas

Dentre as famílias lógicas estão:

- lógica transistor-diodo, em inglês, *diode-transistor logic* (DTL);
- lógica transistor com acoplamento direto, em inglês, *direct-coupled transistor logic* (DCTL);
- lógica transistor-resistor, em inglês, *resistor-transistor logic* (RTL);
- lógica transistor-capacitor-resistor, em inglês, *resistor capacitor transistor logic* (RCTL);
- lógica de nível alto, em inglês, *high-threshold logic* (HTL);
- lógica transistor-transistor, em inglês, *transistor-transistor logic* (TTL);
- lógica emissor acoplado, em inglês, *emitter-coupled logic* (ECL);
- lógica metal-óxido semicondutor, em inglês, *metal oxide semiconductor logic* (MOS);
- lógica metal-óxido semicondutor complementar, em inglês, *complementary MOS* (CMOS).

De todas as famílias, a TTL e a CMOS são as mais empregadas nos variados circuitos eletrônicos. A primeira utiliza o transistor como principal componente, enquanto a segunda, o transistor de

efeito de campo metal óxido semiconductor (TECMOS), em inglês, *metal oxide semiconductor field effect transistor* (MOSFET).

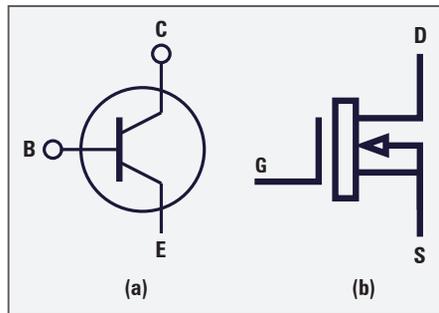


Figura 39 - Transistor (a) e MOSFET (b)

As principais características internas dessas famílias são apresentadas a seguir.

a) Nível lógico - valores de tensão e corrente

Os circuitos digitais utilizam a linguagem binária para realizar a comunicação interna, em que a informação assume apenas os níveis lógicos 0 e 1. Esses circuitos são formados pela combinação das diversas portas lógicas existentes, atendendo às necessidades de cada projeto.

As portas lógicas, por sua vez, são formadas por componentes comuns, como resistores, capacitores, transistores e MOSFETs, de acordo com a família lógica a que pertencem. Assim, cada família utiliza determinado valor de tensão e de corrente para representar os níveis lógicos 0 e 1 nos circuitos digitais. Os termos a seguir são comuns ao estudar a estrutura interna de um circuito de comutação ou porta lógica:

- (V_{IL}) - maior valor de tensão quando aplicado nível lógico 0 na entrada do circuito;
- (V_{IH}) - menor valor de tensão quando aplicado nível lógico 1 na entrada do circuito;
- (V_{OL}) - maior valor de tensão quando a saída do circuito apresenta nível lógico 0;
- (V_{OH}) - menor valor de tensão quando a saída do circuito apresenta nível lógico 1;
- (I_{IL}) - maior valor de corrente na entrada do circuito quando aplicado o nível lógico 0;
- (I_{IH}) - maior valor de corrente na entrada do circuito quando aplicado o nível lógico 1;
- (I_{OL}) - maior valor de corrente quando a saída do circuito apresenta nível lógico 0;
- (I_{OH}) - maior valor de corrente quando a saída do circuito apresenta nível lógico 1.

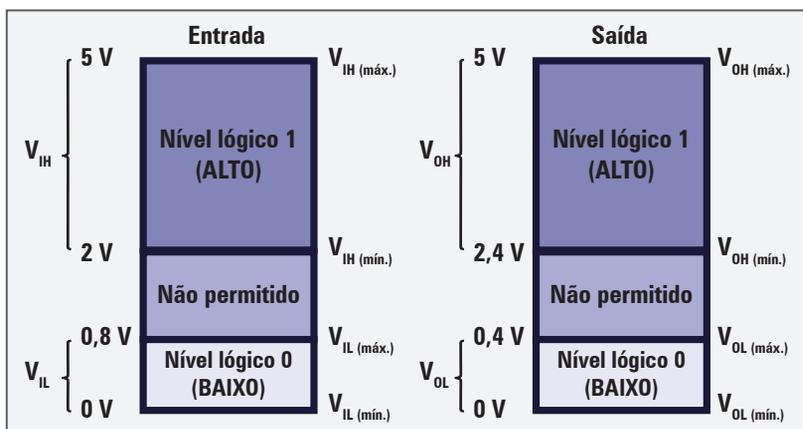


Figura 40 - Família TTL

A Figura 40 mostra os valores de tensão utilizados pela família lógica TTL para representar os níveis lógicos 0 e 1 na entrada e na saída.

O circuito elétrico da Figura 41 é uma porta (E) da família TTL.

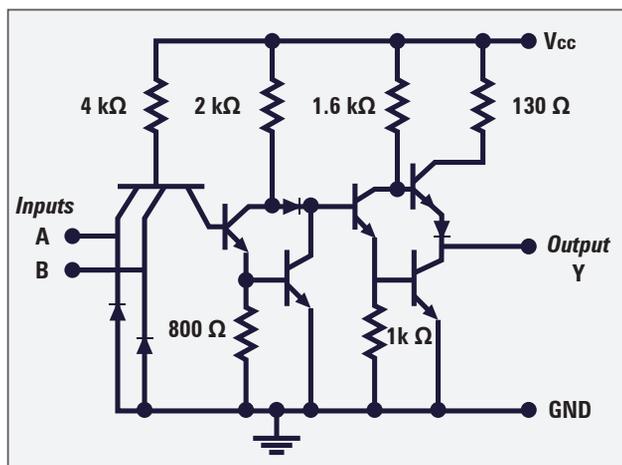


Figura 41 - Porta (E) da família TTL

A família CMOS apresenta valores específicos para representar os níveis lógicos. Os valores variam entre 3 V e 18 V e dependem da tensão de alimentação e temperatura ambiente. O circuito elétrico a seguir mostra a porta (E) da família CMOS.

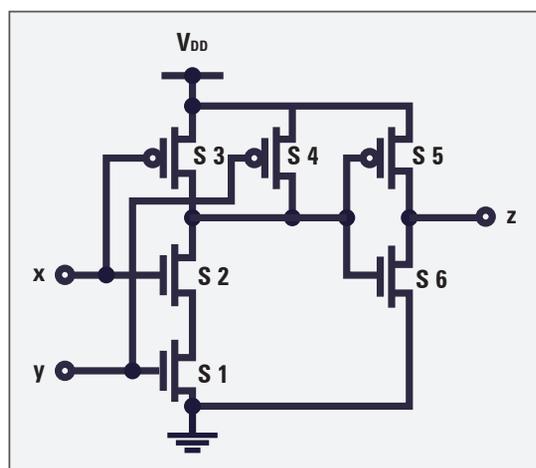


Figura 42 - Porta (E) da família CMOS

b) *Fan-out*

Os projetos de circuitos digitais são formados por uma grande quantidade de portas lógicas interligadas entre si. Como a saída de um estágio é conectada à entrada de outro, o valor da tensão de saída da porta lógica deve ser suficiente para alimentar as entradas das outras portas às quais estiverem ligadas.

Fan-out é o parâmetro que define o número máximo de circuitos que são alimentados pela saída do circuito lógico à qual estiverem conectadas. Caso esse número seja excedido, a saída do circuito pode não fornecer tensão suficiente para representar o nível lógico desejado.

O valor do *fan-out* para os níveis 0 e 1 são calculados a partir das seguintes fórmulas:

$$\mathbf{Fan-out}_{(NÍVEL\ 0)} = I_{OL} / I_{IL} \qquad \mathbf{Fan-out}_{(NÍVEL\ 1)} = I_{OH} / I_{IH}$$

Os valores de *fan-out* para os níveis 0 e 1 são padronizados pelo fabricante para um único valor. Também existe o termo *fan-in* que estipula o número máximo de saídas conectadas a uma única entrada, porém se utiliza mais o *fan-out*.

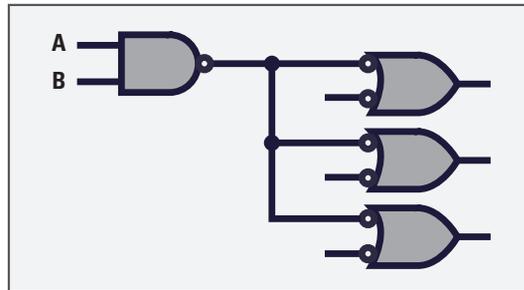


Figura 43 - Fan-out

O *fan-out* para uma porta (NÃO-E) da família TTL é da ordem de 10, enquanto o da família CMOS é de, aproximadamente, 50.

c) Tempo de propagação

É o tempo necessário para que o circuito altere o nível lógico do sinal de entrada e o apresente na saída. Essa alteração pode ser do nível 0 para o 1, ou vice-versa. Esse tempo é representado pelos seguintes termos:

- (t_{PLH}) - quando a variação é de 0 para 1.
- (t_{PHL}) - quando a variação é de 1 para 0.

A Figura 44 mostra a relação de tempo entre as variações na entrada e na saída de uma porta (NÃO).

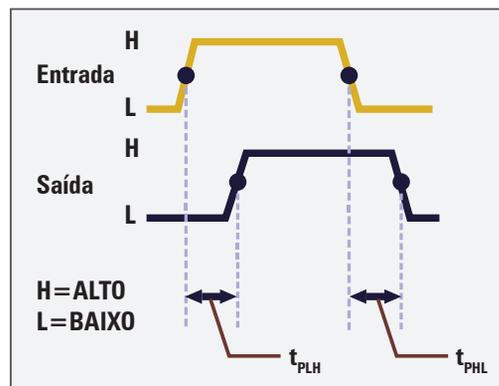


Figura 44 - Tempo de propagação

O tempo de propagação da família TTL é de, aproximadamente, 10 ns e o da família CMOS é de 60 ns. Por esse motivo, é considerada uma grande desvantagem desta família.

d) Imunidade ao ruído

Campos eletromagnéticos interferem no funcionamento adequado de um circuito lógico, fazendo com que ele não atue como desejado. Essas interferências, magnética ou elétrica, são chamadas de **ruídos** e causam problemas na comunicação interna dos equipamentos. Os circuitos lógicos possuem uma tolerância a esse sinal indesejado, chamada imunidade ao ruído, que varia de acordo com a família lógica. Esse é mais um item a ser considerado no projeto de circuitos digitais.



Ruído: perturbação eletrônica causada por ondas eletromagnéticas que entram nos equipamentos eletrônicos e atrapalham o correto funcionamento dos componentes presentes no circuito.

A Figura 45 mostra o efeito do alto valor de ruído em uma porta lógica, alterando o valor lógico de saída e comprometendo a comunicação.

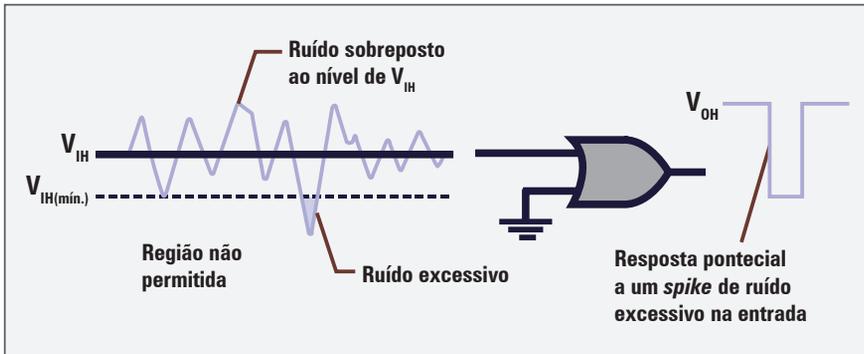


Figura 45 - Efeito do alto valor de ruído

A Figura 46, por sua vez, mostra o ruído gerando um nível lógico 1 indesejado. Por esse motivo, a imunidade ao ruído é um fator muito importante no projeto de circuitos digitais.

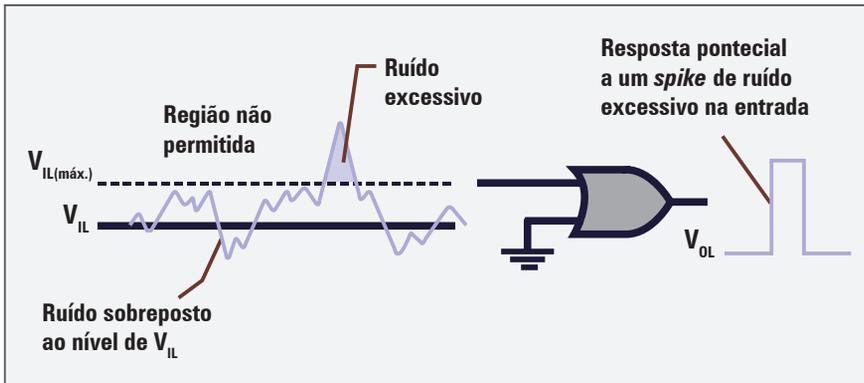


Figura 46 - Efeito do alto valor de ruído

2.2 Classificação

A classificação das famílias, juntamente com um resumo das suas principais características, será demonstrada a seguir.

a) Família DTL

Seus circuitos lógicos são formados a partir de diodos e transistores. Seguem algumas características:

- *fan-out* igual a 8;
- potência dissipada de, aproximadamente, 10 mW;
- imunidade ao ruído de, aproximadamente, 1,4 V;
- tempo de atraso da ordem de 30 ns.

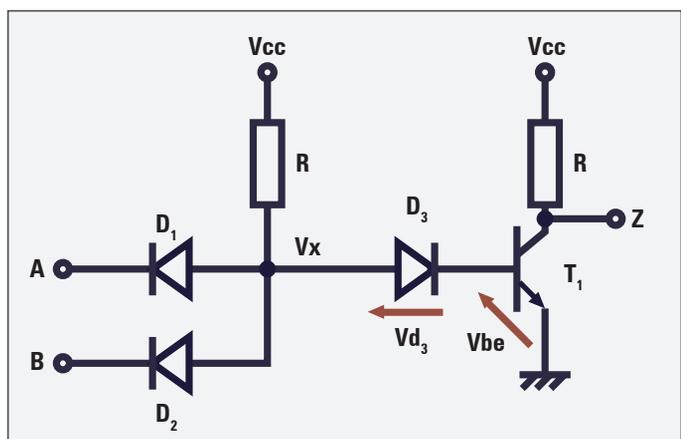


Figura 47 - Família DTL

b) Família DCTL

Seus circuitos lógicos são formados por transistores acoplados e apresentam as seguintes características:

- *fan-out* igual a 2;
- potência dissipada de, aproximadamente, 10 mW;
- baixa imunidade ao ruído.

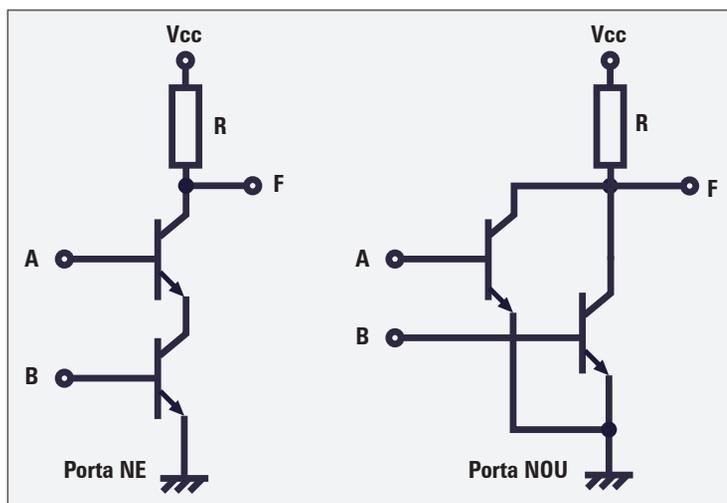


Figura 48 - Família DCTL

c) Família RTL

Seus circuitos lógicos são formados por transistores. Apresenta as seguintes características:

- *fan-out* igual a 5;
- potência dissipada de, aproximadamente, 10 mW;
- maior imunidade ao ruído comparada a família DCTL;
- tempo de atraso da ordem de 12 ns.

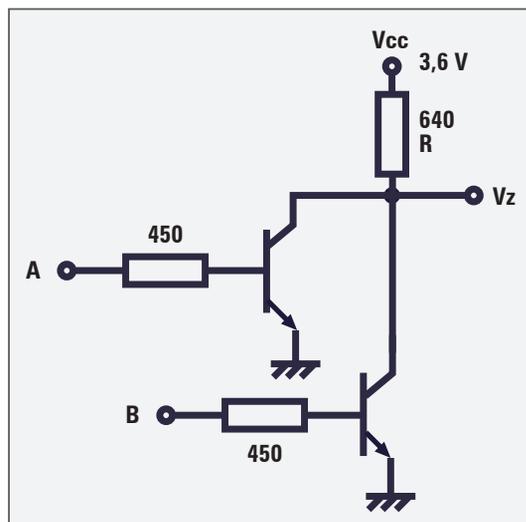


Figura 49 - Família RTL

d) Família RCTL

Seus circuitos lógicos são formados por transistores, capacitores e resistores. Possui tempo de atraso menor que a família RTL por utilizar capacitores.

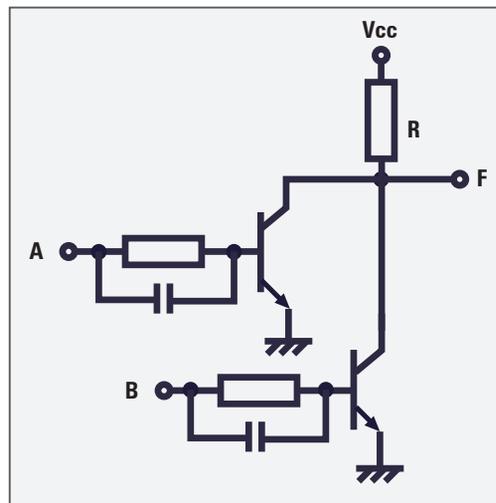


Figura 50 - Família RCTL

e) Família HTL

Criada para aplicação em equipamentos industriais, apresenta as seguintes características:

- *fan-out* igual a 10;
- potência dissipada de, aproximadamente, 60mW;
- alta imunidade ao ruído;
- alto tempo de atraso.

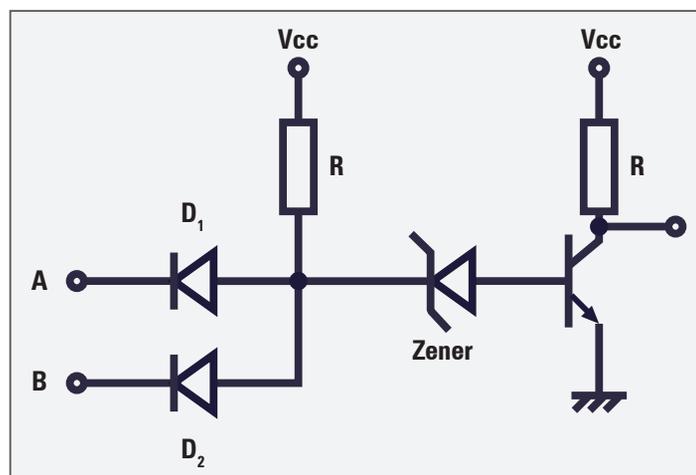


Figura 51 - Família HTL

f) Família ECL

Seus circuitos lógicos utilizam o acoplamento por emissor dos transistores e possuem como características:

- *fan-out* igual a 25;
- potência dissipada de, aproximadamente, 50 mW;
- boa imunidade ao ruído;
- tempo de atraso da ordem de 3 ns.

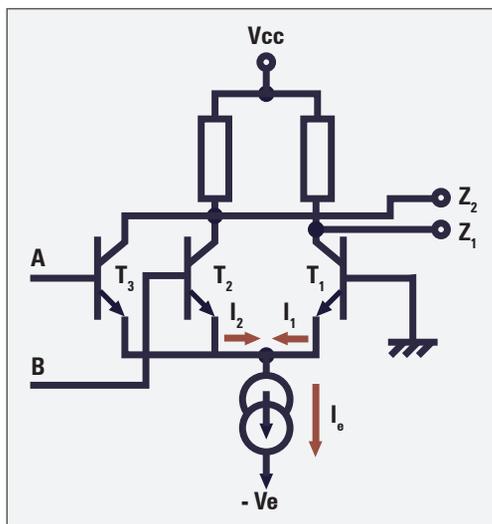


Figura 52 - Família ECL

g) Família MOS

Seus circuitos são formados por MOSFETs e têm as seguintes características:

- *fan-out* igual a 20;
- baixa potência dissipada;
- alta imunidade ao ruído;
- tempo de atraso da ordem de 30 ns.

As tecnologias TTL e CMOS são derivadas das famílias apresentadas anteriormente. A escolha de qual tipo será usado dependerá do projeto em que a memória está sendo empregada. Para diversos equipamentos, o tempo de propagação é o fator mais importante no projeto, enquanto para outros, o *fan-out* e a potência dissipada são mais relevantes.

A tecnologia utilizada pelo componente é uma característica da família lógica a que ele pertence. Além disso, os métodos empregados na fabricação dos circuitos lógicos são um fator importante na escolha do componente, devido às características que cada um apresenta.

2.2.1 Métodos de fabricação de circuitos lógicos

Os circuitos integrados das memórias também são classificados em relação ao processo de fabricação. Eles são classificados como monolítico, pelicular (película fina ou grossa) e híbrido, a seguir.

a) Monolítico

O circuito integrado monolítico se baseia na técnica planar em seu processo de fabricação, em que todo o circuito é construído dentro de um único *chip* de silício.

b) Pelicular (película fina ou grossa)

Os circuitos integrados de película fina, em inglês, *thin-film*, e de película grossa, em inglês, *thick-film*, são circuitos que, em seu processo de fabricação, criam uma camada de material condutor, semiconductor ou isolante sobre seu substrato. Essa camada varia de tamanho de acordo com o tipo de circuito, podendo ter uma espessura fina ou grossa.

c) Híbrido

O circuito integrado híbrido é formado por vários *chips* dentro do mesmo invólucro ou encapsulamento. Seu processo de fabricação é baseado nas técnicas dos circuitos monolíticos e peliculares.

A principal vantagem de um circuito integrado (CI) é sua capacidade de integração. Ele pode integrar milhões de componentes, como resistores, capacitores, diodos e transistores, formando os mais diversos circuitos utilizados no campo da eletrônica. Outra classificação existente ao CI é quanto à integração de seus componentes.

2.2.2 Classificação de circuitos integrados quanto à integração

Os circuitos integrados também são classificados quanto à capacidade de integração de componentes dentro de um único *chip* a seguir:

- a) integração em pequena escala, em inglês, *small scale integration* (SSI) - são os *chips* que apresentam integração em pequena escala, ou seja, um número reduzido de componentes, podendo chegar a 30 dispositivos por *chip*;
- b) integração em média escala, em inglês, *medium scale integration* (MSI) - são os *chips* que apresentam integração em média escala, na faixa de 30 a 1.000 dispositivos por *chip*. Um exemplo comum de aplicação dos CIs MSI são os circuitos contadores;
- c) integração em grande escala, em inglês, *large scale integration* (LSI) - são os *chips* que apresentam integração em grande escala, na faixa de 1.000 a 100.000 dispositivos por *chip*. Circuitos que executam operações aritméticas são exemplos comuns de aplicação dos CIs LSI;
- d) integração em escala muito larga, em inglês, *very large scale integration* (VLSI) - são os *chips* que apresentam integração em escala muito larga, na faixa de 100.000 a 10 milhões de dispositivos por *chip*. Essa tecnologia é comumente aplicada a microprocessadores;
- e) integração em escala ultralarga, em inglês, *ultra large scale integration* (ULSI) - são os *chips* que apresentam integração em escala ultralarga, acima de 10 milhões de dispositivos por *chip*.



LSI: do inglês *large scale integration*; integração em larga escala de transistores, colocando até 1.000 transistores por pastilha de fabricação.

VLSI: do inglês *very large scale integration*; alta integração em larga escala que pode colocar até 100.000 transistores por pastilha de fabricação.

2.2.3 Classificação de circuitos integrados quanto ao encapsulamento



Encapsulamento: tipo de invólucro em que são montados os componentes eletrônicos como o transistor e os circuitos integrados; proporciona resistência mecânica e ligação dos terminais do componente.

O **encapsulamento** de um circuito integrado serve para proteger o componente do meio externo, além de permitir a ligação dos diversos pinos que ele possui. Os tipos de cápsulas apresentados são comumente utilizados nas memórias e cada um traz uma característica específica, a seguir.

a) Cápsulas DIL

O encapsulamento de circuitos integrados, em inglês, *dual in-line package* (DIL ou DIP), apresenta duas fileiras de pinos e foi um dos primeiros tipos de encapsulamentos a ser utilizado em memórias. Ele é empregado em CIs de baixa potência e seu manuseio é simples, sendo amplamente aplicado nos circuitos eletrônicos.

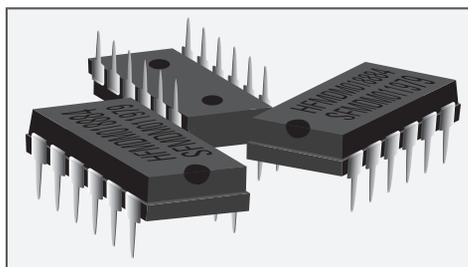


Figura 53 - Encapsulamento DIL

b) Cápsulas planas

As cápsulas planas, em inglês, *flat-pack*, têm como principal característica o pequeno volume. Além disso, seus pinos são colocados horizontalmente na placa, ocupando pouco espaço.

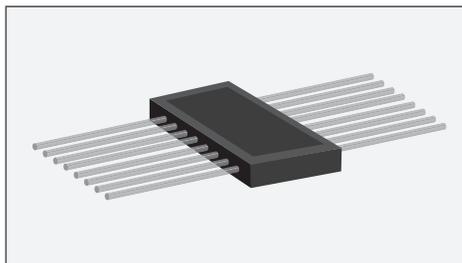


Figura 54 - Encapsulamento *flat-pack*

c) Cápsula SOJ (cápsula de condutor elétrico em j, em inglês, *small outline j-lead*)

Esse tipo de encapsulamento é nomeado dessa maneira pelo fato de os pinos do CI formarem um (J) quando em contato com a placa. A solda de superfície é realizada com esse componente e não há a necessidade de haver furos na placa em que ele será utilizado.

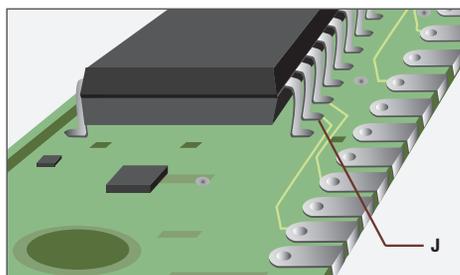


Figura 55 - Encapsulamento SOJ

d) Cápsula TSOP (encapsulamento com pinos pequenos, em inglês, *thin small outline package*)

É um encapsulamento muito pequeno, chegando a ser aproximadamente 1/3 do tamanho do SOJ, além de ser mais fino. Sua primeira aplicação foi em cartões de memória para *notebooks*.

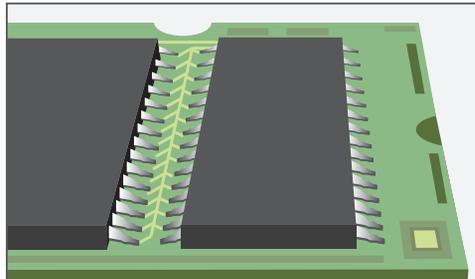


Figura 56 - Encapsulamento TSOP

O encapsulamento com pinos muito pequenos, em inglês, *thin shrink small outline package* (TSSOP), é uma variação do TSOP, com as mesmas características, porém ainda menor. Por intermédio dele, é possível utilizar mais memória em um tamanho menor.

e) Cápsula CSP (cápsula sem pinos, em inglês, *chip scale package*)

É um tipo de encapsulamento que não utiliza os pinos mostrados nas cápsulas anteriores. Emprega um padrão conhecido como tecnologia de pinos em formato de bola, em inglês, *ball grid array* (BGA), possuindo pequenas bolinhas na parte inferior do *chip* como elemento de contato.

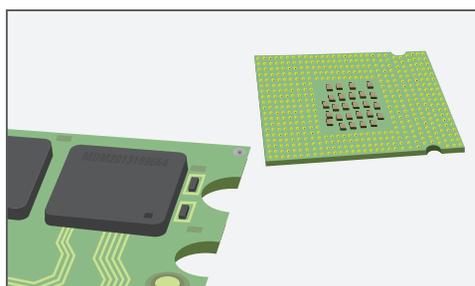


Figura 57 - Encapsulamento CSP

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que é importante que o técnico saiba a tecnologia utilizada nos *chips* dos equipamentos eletrônicos. O conhecimento das características das famílias lógicas é fundamental para uma manutenção efetiva, podendo constatar se uma falha do equipamento é devido à ausência do nível de tensão necessário ao funcionamento do circuito.

Além disso, o domínio dos padrões de encapsulamento dos circuitos integrados é importante para a escolha das ferramentas e técnicas adequadas à substituição e reparação destes sensíveis componentes.

Capítulo 3

Lógica combinacional

Com o estudo dos circuitos combinacionais, será possível entender o funcionamento de circuitos mais complexos dentro da eletrônica digital como codificadores, decodificadores, somadores, subtratores, multiplexadores, demultiplexadores, entre muitos outros que fazem parte da construção de computadores e outros equipamentos digitais.

Basicamente, a análise de circuitos combinacionais ensina a retirar a função lógica dos circuitos idealizados para executar uma função e, dessa forma, implementar o *hardware* que execute essa função desejada. Assim, para elaborar um circuito digital, é necessário identificar a função desejada para ele, fazer o levantamento da tabela-verdade dessa função, retirar a expressão *booleana* que represente a função e, finalmente, implementar o circuito utilizando as portas lógicas universais.

É importante frisar que os circuitos combinacionais são circuitos digitais. Suas saídas dependem única e exclusivamente das suas variáveis de entrada, dessa forma, eles não dependem de uma variável de outro circuito para elaborar uma saída.

As portas lógicas universais são base para a montagem de todos os circuitos digitais, desde o mais básico ao mais complexo. Existem técnicas que permitem implementar qualquer tipo de porta lógica utilizando portas universais. Isso ocorre por diversos motivos, um exemplo é a urgência em usar determinada função lógica não disponível na bancada do projetista ou do mantenedor. Outro exemplo é a simplificação do circuito, projetando-o com um único tipo de porta lógica ou empregando todas as portas fornecidas por um circuito integrado (CI).

3.1 Somador e subtrator

Com vistas a entender o funcionamento e a lógica dos circuitos do somador e do subtrator, é importante compreender, primeiramente, algumas montagens básicas de outros circuitos digitais e a lógica combinacional usada para elaboração desses circuitos específicos.

A sequência empregada na elaboração de circuitos digitais específicos exige conhecimentos de lógica combinacional. Dessa maneira, a montagem de tabelas-verdade, retirada de expressões e simplificação, constitui passos essenciais ao desenvolvimento de qualquer projeto que envolva os conceitos de eletrônica digital.

3.1.1 Montando porta (NOT) usando porta (NAND)

Antes de elaborar a porta (NOT), partindo da porta (NAND), é necessário estabelecer uma

sequência para resolver o problema. Assim, para elaborar um circuito digital, é preciso atentar-se aos seguintes passos:

- identificar a lógica necessária à situação;
- montar a tabela-verdade;
- retirar a expressão;
- montar o circuito.

Seguindo a lógica para o problema, uma porta (**NOT**) é montada usando a porta (**NAND**). Para isso, é necessário analisar, primeiramente, a tabela-verdade da porta (**NAND**), conforme demonstrado a seguir, em que (**A**) e (**B**) são as entradas da porta e (**S**) a saída.

Tabela 37 - Tabela-verdade da porta (**NAND**)

A	B	S
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Fonte: Elaboração dos autores.

Na Tabela 37, as duas linhas inferiores com destaque em vermelho demonstram que, se uma das duas entradas, no caso a (**A**), estiver fixa em nível alto (nível igual a 1), a saída será o inverso da entrada (**B**). Assim, se entrar 0 em (**B**), a saída será 1 e, com isso, chega-se à função de saída $S = \bar{B}$. A Figura 58 demonstra como a porta (**NAND**) deve ser ligada para funcionar como (**NOT**).

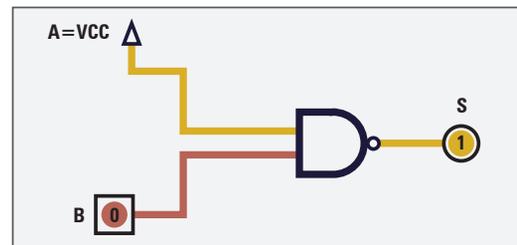


Figura 58 - Circuito com porta (**NAND**) implementando porta (**NOT**) com uma entrada fixa em (**VCC**)

Na Tabela 38, observando a primeira e quarta linhas, ao fixar as entradas (**A**) e (**B**) no mesmo nível, a saída será o inverso da entrada. Assim, há outra possibilidade de implementação de porta (**NOT**) usando a porta (**NAND**).

Tabela 38 - Tabela-verdade da porta (**NAND**)

A	B	S
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Fonte: Elaboração dos autores.

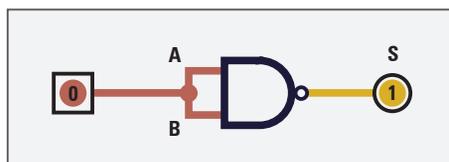


Figura 59 - Circuito com porta (**NAND**) implementando porta (**NOT**) com as duas entradas ligadas em comum

3.1.2 Montando porta (NOT) usando porta (NOR)

Para montar uma porta (NOT) utilizando porta (NOR), é necessário começar analisando a tabela-verdade da porta (NOR), apresentada a seguir.

Tabela 39 - Tabela-verdade da porta (NOR)

A	B	S
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Fonte: Elaboração dos autores.

Na Tabela 39, a primeira e terceira linhas demonstram que, se uma das duas entradas, no caso a (B), estiver fixa em nível baixo (terra ou 0), a saída será o inverso da entrada (A). Dessa maneira, se entrar 0 em (A) a saída será 1, chegando-se à função de saída $S = \bar{A}$. A Figura 60 demonstra como a porta (NOR) deve ser ligada para funcionar como (NOT).

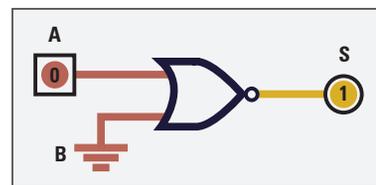


Figura 60 - Circuito com porta (NOR) implementando porta (NOT) com (B) ligado a terra

3.1.3 Montando porta (AND) usando porta (NAND)

A função de saída da porta (NAND) é $S = \overline{A \cdot B}$. Para obter uma (AND) dessa expressão, basta inverter a função de saída novamente, assim $S = \overline{\overline{A \cdot B}} = A \cdot B$. Com o intuito de implementar um circuito que execute a função necessária, liga-se a saída de uma porta (NAND) à entrada de outra (NAND) funcionando como inversora. A Figura 61 demonstra essa montagem.

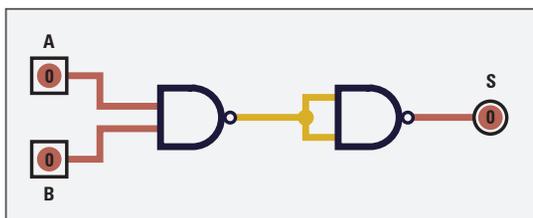


Figura 61 - Circuito implementando porta (AND) de porta (NAND)

Para implementar um circuito digital que realize a função necessária, é importante observar a função do circuito. No exemplo anterior, a montagem do circuito se deu após observar como era a função e o que seria necessário em termos de *hardware* (porta) para executar aquela função.

3.1.4 Implementando circuitos digitais

Como citado anteriormente, o desenvolvimento de circuitos digitais segue passos definidos com vistas a se chegar a uma solução da necessidade exigida. Por exemplo, uma pessoa precisa de um circuito eleitor que indique quando determinada votação deu maioria a favor de um assunto qualquer em que participaram três eleitores. Os quatro passos antes citados têm de ser seguidos.

a) Identificar a lógica necessária à situação

A pessoa precisa de um circuito que apresente na saída uma indicação de quando houve maioria a favor na votação. Três pessoas podem votar.

b) Montar a tabela-verdade

Como a quantidade de pessoas que votam representa as variáveis do problema, a tabela-verdade precisa ter três variáveis de entrada. Sendo a indicação exigida para o problema apenas da maioria, a saída é só uma. Existem situações em que o problema exige mais de uma saída, assim, para solucioná-lo, basta colocá-las na tabela.

Antes de montar a tabela, é necessário estabelecer as variáveis que nela serão inseridas. Os participantes são (A), (B) e (C), a saída é (S), sendo seu estado lógico 1 para indicar a maioria e 0 para caso não exista a maioria a favor. A variável 1 é voto a favor e 0 voto contra. Considerando esses parâmetros, segue a Tabela 40.

Tabela 40 - Tabela-verdade para o circuito eleitor

A	B	C	S
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

c) Retirar a expressão

A expressão de saída que o circuito digital deve implementar é retirada da coluna (S) (saída) da Tabela 40 para as situações nas quais ela apresenta valor 1, em que:

$$S = \bar{A}BC + A\bar{B}C + AB\bar{C} + ABC$$

Após simplificação, a expressão final de saída fica:

$$S = BC + AB + AC$$

d) Montar o circuito

Com a expressão de saída, é possível elaborar o circuito digital que executa a função da expressão. A Figura 62 demonstra o circuito que resolve o problema proposto.

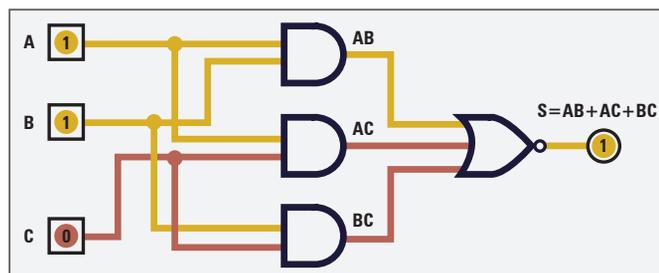


Figura 62 - Circuito eleitor

Os passos estabelecidos facilitam a resolução do problema. Existem circuitos muito mais complexos que executam funções muito grandes, no entanto, todos partiram do mesmo raciocínio para sua elaboração.

Outro exemplo de problema: o piloto de uma aeronave precisa ser alertado de modo sonoro em sua cabine caso a velocidade esteja abaixo de determinado valor e o trem de pouso não esteja baixado e travado. Ou, ainda assim, deve ser avisado caso o trem de pouso esteja baixo e a aeronave, em alta velocidade. Para elaborar um circuito digital que faça parte da aeronave e solucione o problema, os passos estão elencados a seguir.

a) Identificar a lógica necessária à situação

O piloto tem de receber um sinal sonoro na cabine que indique para ele quando a aeronave está com pouca velocidade, situação normal antes do pouso, e o trem de pouso não está baixado e travado em baixo. Precisa também da indicação sonora quando o trem de pouso está baixado e a aeronave está em alta velocidade, situação em que é necessário recolher o trem de pouso.

b) Montar a tabela-verdade

As variáveis a serem controladas no problema são três: velocidade da aeronave, posição e trava do trem de pouso.

Antes de montar a tabela, é necessário estabelecer as variáveis a serem nela inseridas. As variáveis (A), (B) e (C) serão: (A) indicando velocidade, em que 1 representa baixa velocidade e 0, alta; (B), posição do trem de pouso, em que 1 indica em baixo e 0, alto ou recolhido; (C), trava do trem de pouso, em que 1 indica travado e 0, não travado. A saída é (S), sendo seu estado lógico 1, aciona sinal sonoro para piloto e 0 não aciona.

Tabela 41 - Tabela-verdade para sinal sonoro

A	B	C	S
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

Fonte: Elaboração dos autores.

Quando a aeronave está em alta velocidade e o trem de pouso baixado, não interessa se ele está travado ou não, o alarme tem de ocorrer para as duas situações. A necessidade de indicar ao piloto que o trem de pouso está travado ao ser baixado é para evitar acidentes. Se destravado, o trem de pouso recolherá automaticamente quando tocar o solo, resultando em um pouso de barriga e danos à aeronave.

c) Retirar a expressão

A expressão de saída que o circuito digital deve implementar é retirada da coluna (S) (saída) da Tabela 41 para as situações em que se apresenta valor 1, sendo ela:

$$S = \bar{A}.B.\bar{C} + \bar{A}.B.C + A.\bar{B}.\bar{C} + A.\bar{B}.C + A.B.\bar{C}$$

Após simplificação, a expressão final de saída fica:

$$S = A\bar{B} + \bar{A}B + B\bar{C}$$

d) Montar o circuito

Com a expressão de saída, é possível elaborar o circuito digital que executa a função da expressão. A Figura 63 demonstra o circuito que resolve o problema proposto.

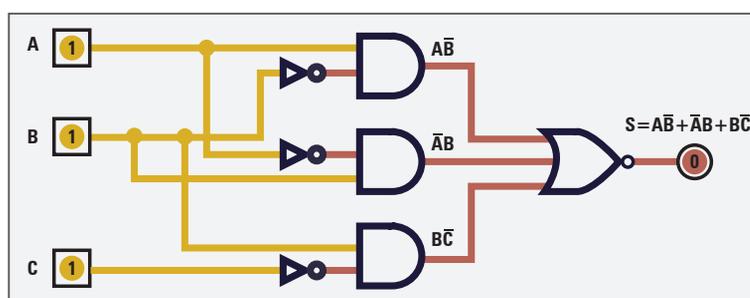


Figura 63 - Circuito de alarme para piloto

3.1.5 O circuito somador

Os computadores utilizam muitos circuitos digitais responsáveis por realizar cálculos aritméticos. Dentre eles, estão o somador e o subtrator, ambos caracterizados como circuitos combinacionais.

O circuito digital somador realiza a soma de dois números binários. Para entender como ele funciona, é preciso compreender como é feita a soma binária de dois números. Observando a Tabela 42, tem-se a soma de dois números binários de três *bits*.

Tabela 42 - Soma de dois números de três *bits*

C2	C1	C0	
	A2	A1	A0
	B2	B1	B0
S3	S2	S1	S0

Fonte: Elaboração dos autores.

Os dois números binários (A e B) são compostos de três *bits*, sendo (A0) e (B0) os menos significativos e (A2) e (B2) os mais significativos. O resultado fornece um número de quatro *bits*, sendo (S3) o mais significativo *bit* e (S0) o menos. A linha da tabela em que aparecem os *bits* (C2) a (C0) (*carry*) é o transporte da soma.

Os circuitos que realizam a soma funcionam exatamente como o método manual de soma que qualquer pessoa utiliza, ou seja, a soma é processada dos dígitos menos significativos para os



Carry: nome dado ao *bit* de transporte utilizado na soma e na subtração digital.

mais significativos. Assim, o somador é composto de dois tipos diferentes de circuito, conforme exposto na Figura 64.

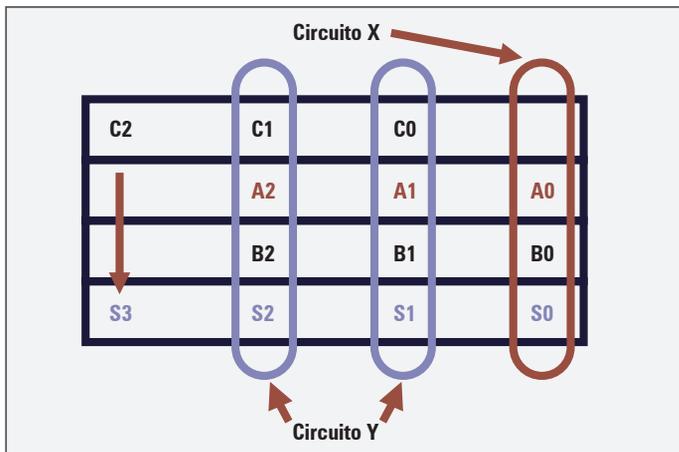


Figura 64 - Soma de dois números, identificação dos elementos para o circuito

O circuito que, por enquanto, é identificado como (X) possui duas entradas (A e B) e duas saídas (S e C). A saída (S) é um dos *bits* que compõe o resultado da soma, a saída (C) (*carry*) é o transporte gerado pela soma dos *bits* (A) e (B) que constitui a operação seguinte, o próximo *bit*.

O circuito que é identificado de (Y) possui, diferentemente do circuito (X), três entradas (A, B e C), mas apenas duas saídas (S e C) como demonstrado na Figura 64. Portanto, o circuito somador de três *bits* será composto de um circuito (X) e dois circuitos (Y). Na Figura 65, são representados os circuitos (X) e (Y) necessários a realizar a soma de dois números de três *bits*.

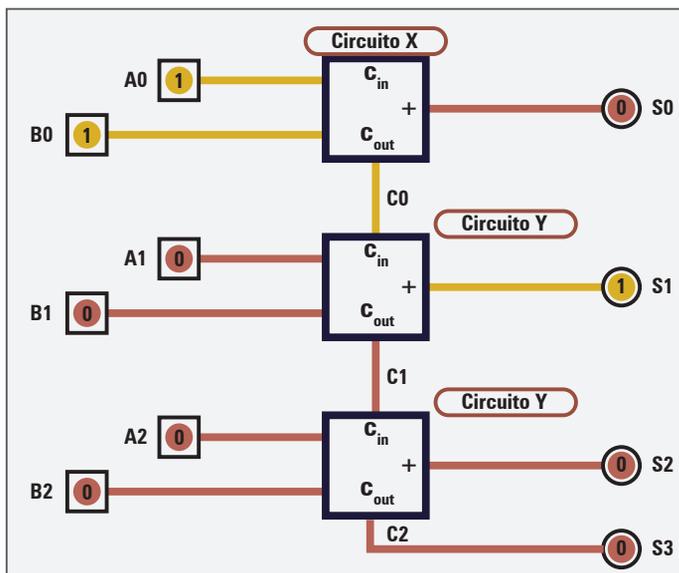


Figura 65 - Representação dos circuitos usados para a soma de dois números de três *bits*

Na Figura 65, a indicação (C_{in}) significa transporte de entrada e (C_{out}) transporte de saída. Por intermédio da análise anterior e observando a figura supracitada, são verificadas as características para os circuitos (X) e (Y). Logo, a fim de desenvolver os dois tipos de somadores, são empregados os passos para desenvolvimento de circuitos digitais que são:

a) identificar a lógica necessária à situação

O somador identificado como circuito (X) possui duas entradas (A e B) e duas saídas (S e C). Enquanto o circuito (Y) possui três entradas (A, B e C) e duas saídas (S e C). A função de ambos os circuitos é realizar a soma digital binária.

b) montar a tabela-verdade

As entradas dos circuitos (X) são (A) e (B) e as saídas são (S) (soma) e (C) (transporte). Para o circuito (Y), as entradas são (A), (B) e (C) do circuito anterior, as saídas são (S) e (C). Assim, as tabelas para os circuitos (X) e (Y) ficam conforme demonstradas a seguir.

Tabela 43 - Função soma do circuito (X)

A	B	S	C
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Fonte: Elaboração dos autores.

Tabela 44 - Função soma do circuito (Y)

A	B	C _{in}	S	C _{out}
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

c) retirar a expressão

As expressões simplificadas para as saídas (S) e (C) retiradas da Tabela 43 para o circuito (X) são:

$$S = A \oplus B$$

$$C = A \cdot B$$

Enquanto as expressões simplificadas para as saídas (S) e (C) retiradas da Tabela 44 para o circuito (Y) são:

$$S = A \oplus B \oplus C_{in}$$

$$C_{out} = BC_{in} + AC_{in} + AB$$

Na Tabela 44, foram utilizadas as indicações de (C_{in}) para o transporte que entra no circuito e (C_{out}) para o transporte que sai do circuito.

d) retirar a expressão

Com as expressões de saída do item 3, é possível elaborar os circuitos digitais que executam as funções dessas expressões. As Figuras 66 e 67 demonstram os circuitos que executam as funções necessárias aos circuitos (X) e (Y).

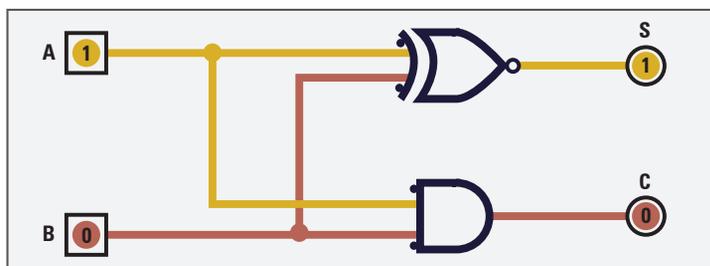


Figura 66 - Circuito digital (X), meio somador

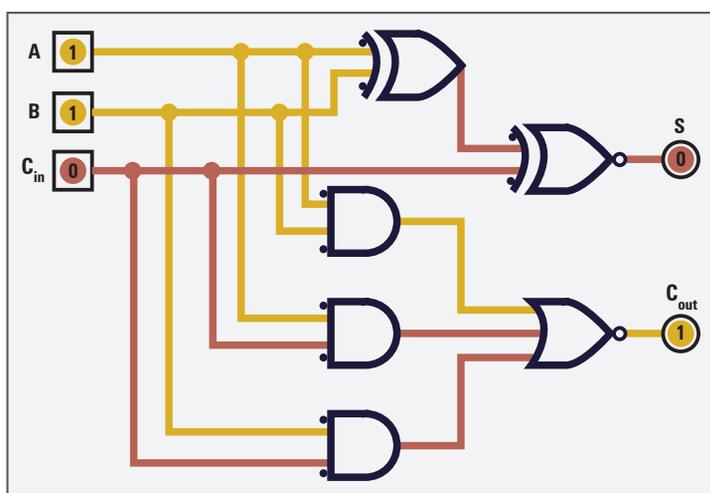


Figura 67 - Circuito digital (Y), somador completo

O circuito (X) da Figura 66 é chamado de meio somador, pois não soma transporte de saída de outro circuito. O circuito (Y) da Figura 67 é chamado de somador completo, porque soma o transporte de saída de outro circuito.

O meio somador e o somador completo formam blocos básicos utilizados para realizar qualquer tipo de soma dentro de computadores, mudando apenas a quantidade de blocos em função do número de *bits* da soma. Nas Figuras 68.A e 68.B, são exibidas as representações em bloco para o meio somador e o somador completo.

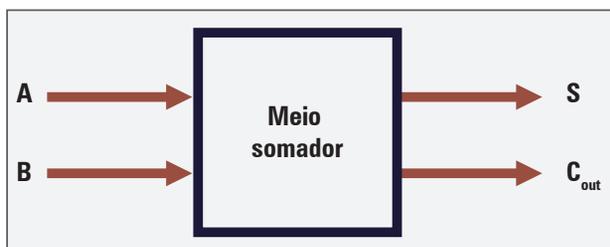


Figura 68.A - Representação para o meio somador



Figura 68.B - Representação para o somador completo

3.1.6 Circuito subtrator

O circuito digital subtrator realiza a subtração de dois números binários. Do mesmo modo como foi realizado o desenvolvimento para o somador, é necessário também para o subtrator.

Na subtração, é preciso considerar que (C_{in}) é o empréstimo feito pela subtração anterior e (C_{out}) a solicitação de empréstimo para o próximo bloco subtrator.

O circuito para o meio subtrator possui duas entradas (**A** e **B**) e duas saídas (**S** e **C**): a saída (**S**) é um dos *bits* que compõe o resultado da subtração, a saída (C_{out}) (*carry*) é o empréstimo feito pela subtração caso o *bit* (**B**) seja maior que o (**A**).

Tabela 45 - Tabela-verdade para o meio subtrator

C2	C1	C0	
	A2	A1	A0
	B2	B1	B0
S3	S2	S1	S0

Fonte: Elaboração dos autores.

A função de saída para (**S**) e (C_{out}) da Tabela 45 pode ser representada conforme a seguir.

$$S = A \oplus B$$

$$C_{out} = \bar{A}B$$

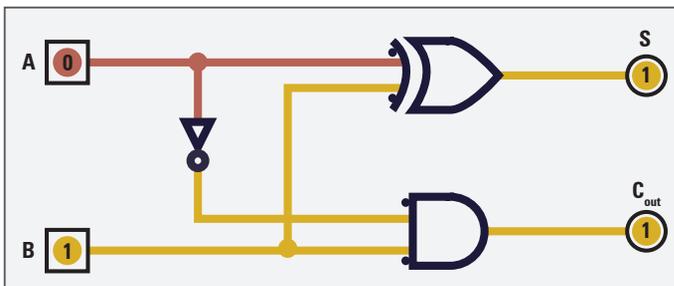


Figura 69 - Meio subtrator

O circuito que implementa as funções de (**S**) e (C_{out}) está demonstrado na Figura 69.

No meio subtrator da Figura 69, a operação realizada é (**A-B**), conforme a Tabela 45. Para realizar (**B-A**), a função da expressão de saída mudará e o circuito também será diferente.

As entradas para o circuito subtrator completo são (**A**), (**B**) e (C_{in}) do circuito anterior, empréstimo do bloco subtrator anterior. As saídas são (**S**) e (C_{out}), em que este último é o empréstimo feito para o bloco subtrator posterior. Considerando essas variáveis, tem-se a seguinte tabela-verdade para o subtrator completo.

Tabela 46 - Tabela-verdade para o subtrator completo

A	B	C_{in}	S	C_{out}
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	1	0	0	0
1	1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

É possível que a função de saída para (S) e (C_{out}) da Tabela 46 seja assim escrita:

$$S = A \oplus B \oplus C_{in}$$

$$C_{out} = B C_{in} + \bar{A} C_{in} + \bar{A} B$$

O circuito que implementa as funções de (S) e (C_{out}) está exemplificado na Figura 70.

Assim como o somador completo, o subtrator completo forma blocos básicos utilizados para realizar qualquer tipo de subtração dentro de computadores, mudando apenas a quantidade de blocos em função do número de *bits* da soma.

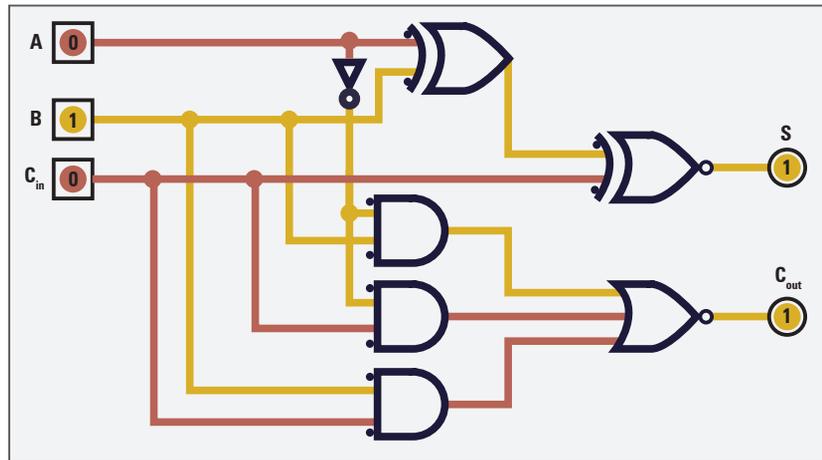


Figura 70 - Subtrator completo

3.2 Codificador e decodificador digital

A interação direta do homem com máquinas eletrônicas avançadas é praticamente impossível, visto que ambos possuem linguagens diferentes. Para haver interação, de forma que o homem possa transmitir comandos e dados à máquina e esta responder com ações ou outros dados, o uso de tradutores é necessário entre o homem e a máquina e vice-versa. Esses tradutores são chamados de codificadores e decodificadores.

Os codificadores traduzem a linguagem do homem (composta de caracteres ou comandos básicos) para a linguagem da máquina (composta de palavras binárias). O decodificador executa a ação contrária e traduz a linguagem da máquina em uma forma facilmente entendida pelo homem.



Figura 71.A - Codificador de dois bits

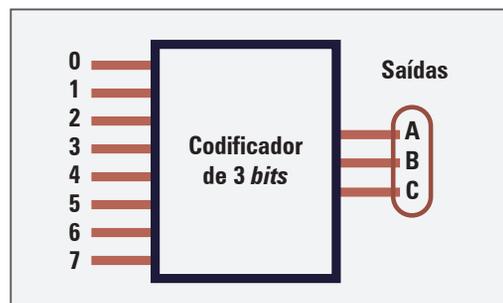


Figura 71.B - Codificador de três bits

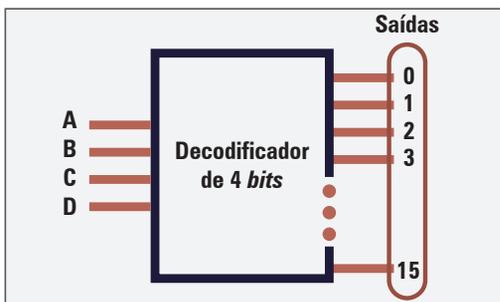


Figura 71.C - Decodificador de quatro bits

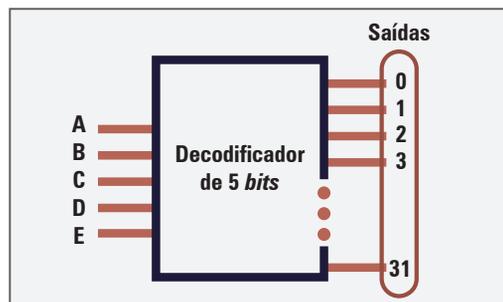


Figura 71.D - Decodificador de cinco bits

Existe uma relação entre o número de entradas e saídas do codificador e decodificador. Para um codificador, o número de saídas define o número de entradas de acordo com a relação $2^s = E$, em que (S) é o número de saídas e (E), o de entradas.

Para um decodificador, o número de entradas determina a quantidade de saídas conforme a relação $2^E = S$. Na Figura 71.B, o codificador de três bits necessita de oito entradas para formar o circuito $2^3 = E \rightarrow 2^3 = 8$, e o decodificador de cinco bits fornece 32 saídas $2^E = S \rightarrow 2^5 = 32$.

3.2.1 Circuito codificador

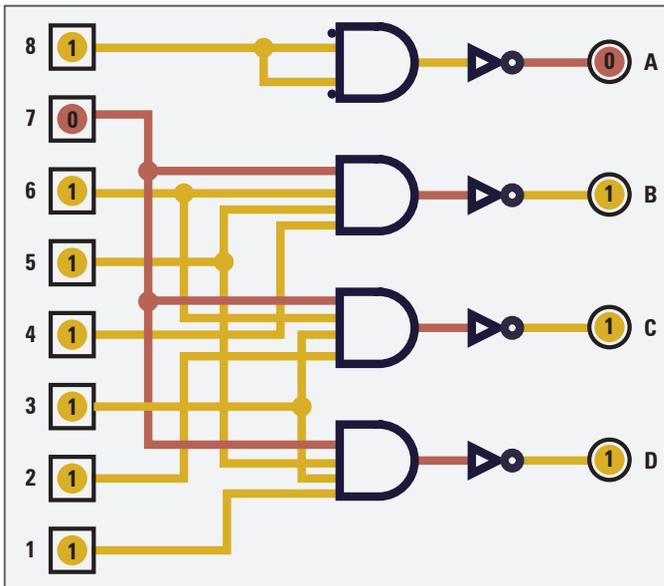


Figura 72 - Exemplo de codificador decimal para BCD 8421

O circuito da Figura 72 considera que suas oito teclas de entrada, quando pressionadas, enviam para a entrada das portas lógicas um nível lógico 0, e quando não estão pressionadas, enviam 1. O circuito é um exemplo de codificador decimal para binário, usando como saída o código BCD 8421. No exemplo da Figura 72, quando pressionada a tecla 7, as saídas (B), (C) e (D) são levadas a nível 1, correspondendo ao número binário 0111 do código BDC 8421, que equivale a 7 decimal. Assim, nas saídas (ABCD), haverá o código BCD 8421 correspondente a cada tecla acionada na entrada.

3.2.2 Circuito decodificador

Conforme citado anteriormente, o número de saídas de um decodificador depende do número de entradas. No exemplo da Tabela 47, o decodificador possui duas entradas e quatro saídas para apresentar a decodificação de binário para decimal.

Tabela 47 - Tabela de conversão do decodificador de dois bits para decimal

A	B	0	1	2	3
0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

Fonte: Elaboração dos autores.

As saídas 0, 1, 2 e 3 fornecem as expressões a seguir:

$$\begin{aligned}
 0 &= \bar{A} \cdot \bar{B} \\
 1 &= \bar{A} \cdot B \\
 2 &= A \cdot \bar{B} \\
 3 &= A \cdot B
 \end{aligned}$$

Com as expressões, é possível montar o circuito que executa a função, conforme demonstrado na Figura 73.

O número de entradas para o exemplo de decodificador da Figura 73 é pequeno. Quanto maior o número de entradas, maior será a complexidade do circuito, utilizando muitas portas lógicas para a sua implementação.

O decodificador é empregado para passar de um código a outro, e o processo para desenvolvê-lo segue os passos citados anteriormente para reproduzir circuitos digitais.

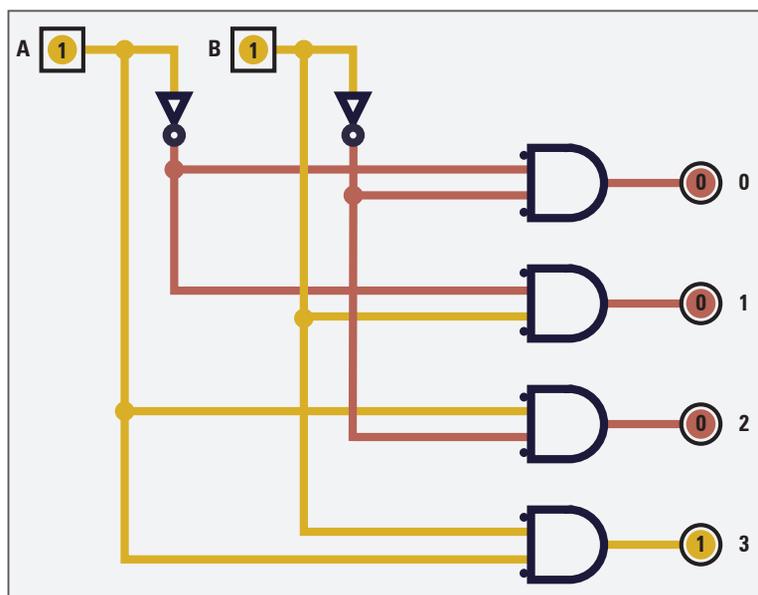


Figura 73 - Decodificador binário de dois bits para decimal

Na Tabela 48, está o código Gray e sua correspondência no código BCD 8421, ambos os códigos muito utilizados em eletrônica digital. Para elaborar o circuito que realiza a decodificação de Gray para BCD 8421, é necessário montar a tabela-verdade, retirar as funções para cada saída do código, realizar a simplificação e, por fim, montar o circuito. Veja-se a equivalência entre o código Gray e BCD 8421 .

Tabela 48 - Tabela de conversão do código Gray para BCD 8421

Código Gray				Código BCD 8421			
A	B	C	D	S ₈	S ₄	S ₂	S ₁
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	1
0	1	1	0	0	1	0	0
0	1	1	1	0	1	0	1
0	1	0	1	0	1	1	0
0	1	0	0	0	1	1	1
1	1	0	0	1	0	0	0
1	1	0	1	1	0	0	1
1	1	1	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	1	1
1	0	1	0	1	1	0	0
1	0	1	1	1	1	0	1
1	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.



Código Gray: código digital inventado por Frank Gray cuja característica é a mudança de apenas um bit de uma linha para outra do código.

Retirando as expressões para as saídas (S_8), (S_4), (S_2) e (S_1), correspondentes ao código BCD 8421, e as simplificando, obtêm-se as seguintes expressões:

$$\begin{aligned} S_8 &= A \\ S_4 &= A \oplus B \\ S_2 &= A \oplus B \oplus C \\ S_1 &= A \oplus B \oplus C \oplus D \end{aligned}$$

Com as expressões simplificadas para (S_8), (S_4), (S_2) e (S_1), é possível montar o circuito digital que execute as expressões retiradas da tabela. Ressalta-se que retirar a expressão para as saídas da tabela e não realizar a simplificação ocasiona a montagem de um circuito digital muito maior, usando muitas portas lógicas que não têm necessidade, pois o circuito montado para as simplificações das expressões funcionam da mesma maneira.

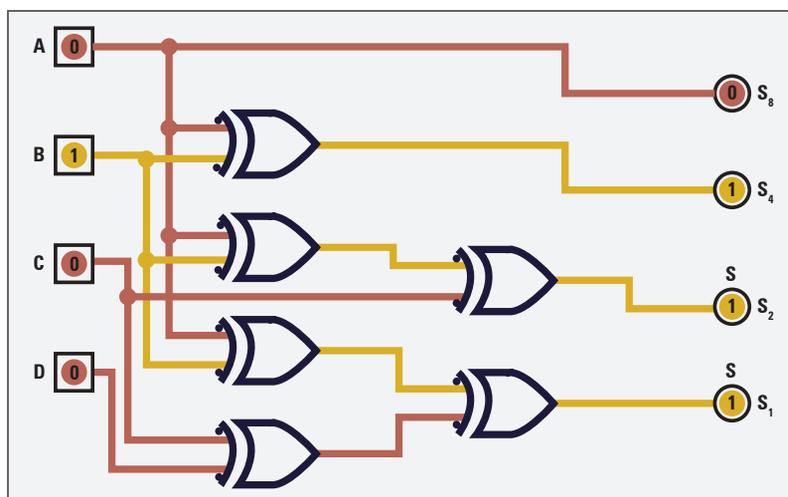


Figura 74 - Decodificador Gray para BCD 8421

Um tipo de decodificador muito empregado na eletrônica digital é o decodificador BCD 8421 para o *display* de sete segmentos. Esse *display* é composto de sete LEDs, e cada um representa um segmento. Este último é identificado por uma letra minúscula conforme sua posição.

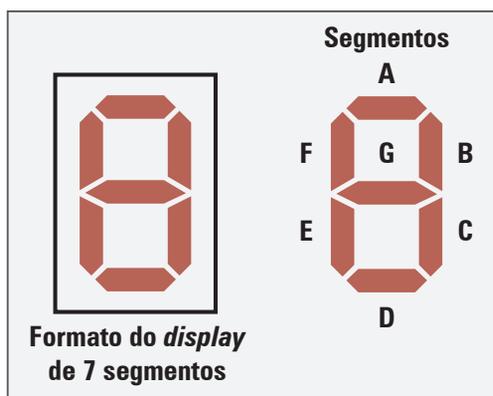


Figura 75 - *Display* de sete segmentos

Para representar os algarismos decimais no *display* de sete segmentos, basta acionar os segmentos de (A) a (G) de acordo com o número desejado. Por exemplo, para formar o número 2 no *display*

devem ser acionados os segmentos (A), (B), (D), (E) e (G). A Tabela 49 mostra alguns exemplos de algarismos representados no *display* e os segmentos acionados para a representação dos números.

Tabela 49 - Segmentos acionados para representação no *display* de sete segmentos

<i>Display</i>	0	1	2
Segmentos	A, B, C, D, E, F	B, C	A, B, D, E, G

Fonte: Elaboração dos autores.

O *display* de sete segmentos necessita de um decodificador especial, o decodificador para sete segmentos. Além disso, será necessária mais de uma saída em nível 1 para que ele mostre o número correspondente de maneira correta. Normalmente, não são montados os circuitos para cada segmento, necessitando-se, assim, de sete circuitos diferentes. O que ocorre, na verdade, é a utilização de um circuito integrado (CI), o qual executa a função de decodificador BCD 8421 para o *display* de sete segmentos.

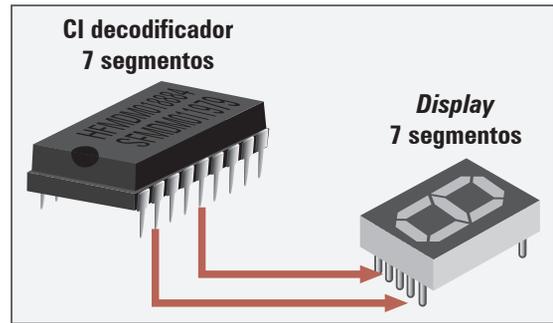


Figura 76 - CI decodificador para *display* de sete segmentos

Internamente ao CI decodificador para *display* de sete segmentos, existem os sete circuitos que executam a função de cada segmento de (A) a (G). O *display* também possui um ponto decimal para indicar a vírgula dos números decimais, caso seja necessário, esse ponto também é controlado pelo CI decodificador.

3.2.3 Multiplexadores e demultiplexadores

Os circuitos multiplexadores, representados pelas siglas (MUX) e (DEMUX), que significam multiplex e demultiplex, respectivamente, são largamente empregados em sistemas formados por unidades de comutação, por exemplo, em transmissão e recepção de dados. Esses dois tipos de circuito têm seu funcionamento análogo a chaves seletoras, como se observa nas Figuras 77.A e 77.B.

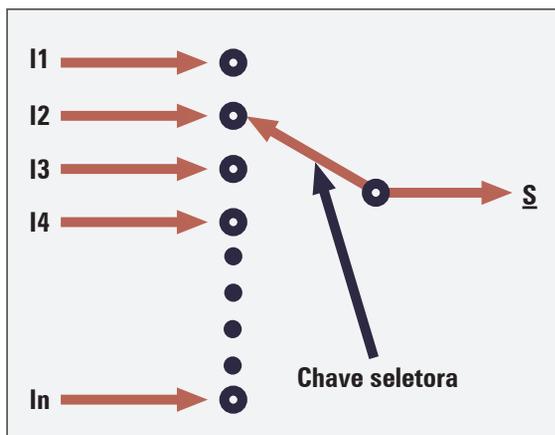


Figura 77.A - Representação da estrutura do multiplex

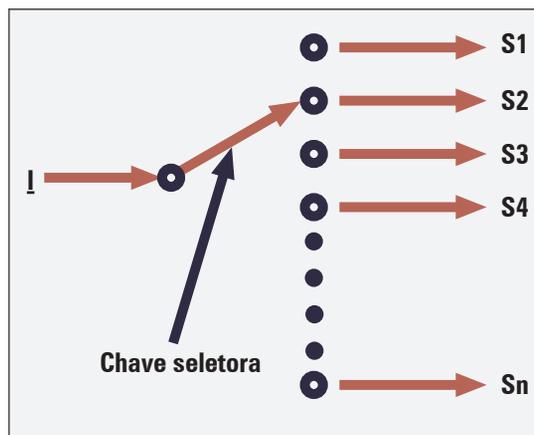


Figura 77.B - Representação da estrutura do demultiplex

As estruturas do multiplex e demultiplex das figuras anteriores são praticamente iguais, a única diferença é o número de entradas e de saídas selecionadas pela chave seletora. Essa chave não é mecânica como no desenho, assim seletores são utilizados para indicar qual das entradas serão ligadas à saída do (MUX) e qual das saídas serão ligadas à entrada do (DEMUX).

Resumidamente, um multiplex transfere para uma saída (S) todos os dados presentes nas entradas (I_n), porém em momentos diferentes. Isso porque no momento em que a chave está selecionando um canal, o dado presente nesse canal será levado para a saída. Assim como, à medida que a chave seletora vai para outra entrada, o dado presente na nova entrada será enviado para a saída.

O demultiplex fará o processo inverso ao multiplex. Ele adquirirá os dados presentes na sua entrada e os dividirá para as diversas saídas, recuperando a separação dos dados realizada pelo (MUX). É com o uso de (MUX) e (DEMUX) que hoje é possível em diversas áreas da eletrônica transportar quantidades enormes de dados em poucos cabos de dados. Caso não seja possível juntar várias informações em um único caminho (fio), dever-se-á ter um cabo para cada entrada de um (MUX), ou seja, para transmitir 16 canais de um (MUX) seriam exigidos 16 cabos de dados e, com o uso do (MUX), é necessário apenas um.

O (MUX) e o (DEMUX) são nomeados em função de seu número de entradas e saídas. Por exemplo, um multiplex de quatro entradas é chamado de (MUX-4) e um demultiplex de 16 saídas (DEMUX-16). Assim, o nome de um (MUX) é determinado pelo número de entradas e o (DEMUX) pelo de saídas. Nas Figuras 78.A e 78.B, são demonstrados o (MUX-2) e (DEMUX-2).

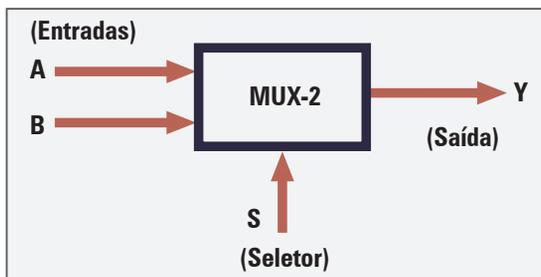


Figura 78.A - (MUX-2)

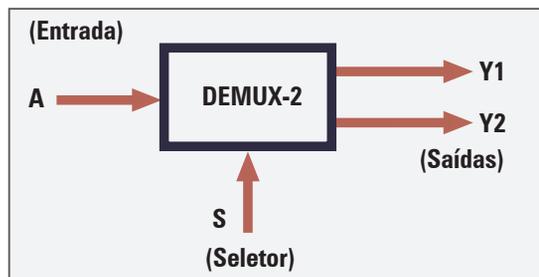


Figura 78.B - (DEMUX-2)

As tabelas a seguir para o (MUX-2) e o (DEMUX-2) estão apresentadas juntamente com os circuitos digitais para realizarem a função das tabelas.

Tabela 50 - Tabela-verdade para o (MUX-2)

S	A	B	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

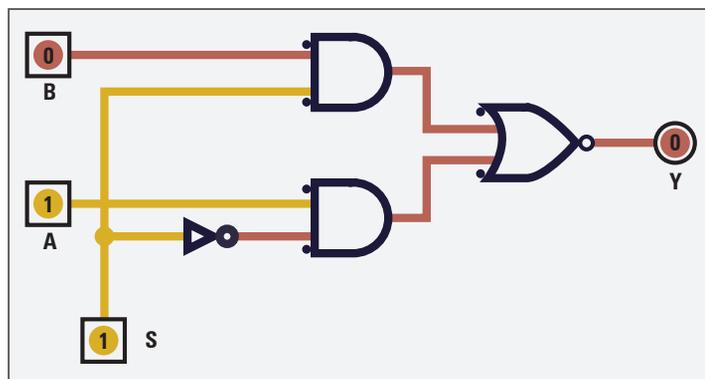


Figura 79 - Circuito equivalente ao (MUX-2)

Na Tabela 50, o circuito digital representa o funcionamento do (MUX-2). Nele, existem duas entradas (A) e (B) e, também, um seletor (S). Quando (S) estiver em nível 0, a saída (Y) terá a mesma informação que está presente na entrada (A). Assim, se (A) for zero, a saída também será zero. Nessa situação, a entrada (B) é bloqueada e sua entrada não vai para a saída. Quando (S) estiver em nível 1, a entrada (A) fica bloqueada e a saída (Y) acompanha a entrada (B), ou seja, se em (B) estiver o nível 1, a saída terá um.

Tabela 51 - Tabela-verdade para o (DEMUX-2)

S	A	B	Y
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	1	0	1

Fonte: Elaboração dos autores.

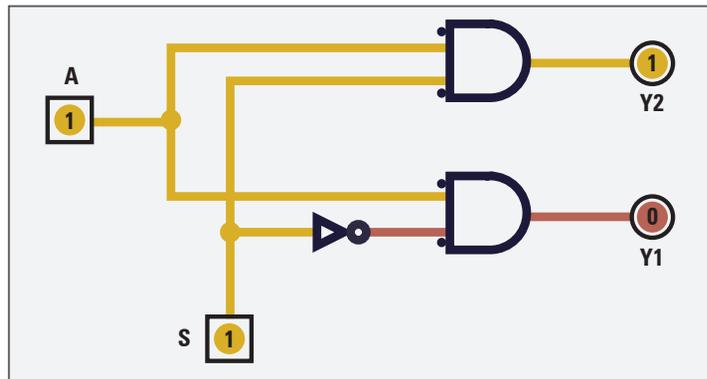


Figura 80 - Circuito equivalente ao (DEMUX-2)

Na Tabela 51, o circuito digital representa o funcionamento do (DEMUX-2). Nele, existem uma entrada (A), duas saídas (Y1) e (Y2) e, também, um seletor (S). Quando (S) estiver em nível 0, a saída (Y1) terá a mesma informação que está presente na entrada (A), assim se (A) for zero, a saída também será zero. Nessa situação, a saída (Y2) fica constantemente em nível baixo (0). Quando (S) estiver em nível 1, a saída (Y2) terá a mesma informação que está presente na entrada (A), e (Y1) fica constantemente em nível zero.

Multiplexadores e demultiplexadores com números maiores de entradas e saídas são projetados do mesmo modo que os exemplos anteriores de (MUX-2) e (DEMUX-2). Ao montar a tabela de um (MUX-4) e de um (DEMUX-4), verifica-se que a comutação de quatro variáveis necessita de dois seletores. Do mesmo modo, a comutação de oito entradas por parte de um (MUX-8) necessitará de três seletores, assim como a comutação das 16 saídas do (DEMUX-16) somente será possível com quatro seletores.

Seguindo o raciocínio apresentado para os seletores, equaciona-se o número de seletores necessário ao (MUX) em função do número de suas entradas como sendo: $2^s = E$, em que (S) é o número de seletores e (E) o número de entradas. Da mesma maneira que o (MUX) para o (DEMUX), o número de seletores segue a equação: $2^s = O$, O é o número de saídas (*output*) do (DEMUX). Por exemplo, para um (MUX-64) são necessários seis seletores, pois $2^s = E \rightarrow 2^6 = 64$. Para um (DEMUX-128) são requeridos sete seletores, porque $2^s = E \rightarrow 2^7 = 128$.

Os multiplexadores são encapsulados em CI possuindo muitas entradas de acordo com o tipo. Esse CI pode ter um terminal extradestinado à inibição ou habilitação de seu funcionamento, que é conhecido por *enable*, *disable*, *gate* ou *strobe*. Tais terminais fazem com que o (MUX), quando inibido, tenha suas saídas permanentemente em nível 0. Alguns fabricantes mudam a característica de saída. Nesse sentido, as saídas assumem um estado semelhante a circuitos abertos, independentemente dos níveis presentes em seus seletores e entradas.



Enable: terminal existente em alguns circuitos integrados que possui como função a habilitação do seu funcionamento.

A seguir, está a tabela-verdade de um (MUX-2) com terminal *enable* (E).

Tabela 52 - Tabela-verdade para o (MUX-2) com terminal *enable*

E	S	A	B	Y
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

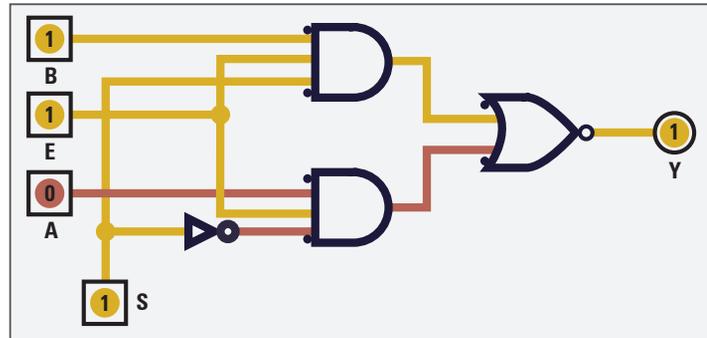


Figura 81 - Circuito equivalente ao (MUX-2) com terminal *enable*

O funcionamento do (MUX-2) da Tabela 52 é igual ao explicado anteriormente, a mudança ocorre só pela inserção do terminal (E) (*enable*) para habilitar ou não o funcionamento do circuito. Quando (E) está em nível 0, a saída (Y), independentemente do nível que esteja nas entradas (A) e (B), terá sempre o nível 0. Quando (E=1), o circuito está habilitado, assim o funcionamento é normal; quando (S=0), a saída (Y) acompanha a entrada A; e quando (S=1), a saída acompanha a entrada (B). Se nesse momento houver 1 em (B), a saída terá 1 também.

Uma prática comum é ampliar a capacidade de um sistema multiplex associando vários multiplex de menor capacidade. Por exemplo, associando dois multiplex de 32 canais, obtém-se um (MUX) de 64 canais. Utilizando a associação de dois (MUX-2) para obter um (MUX-4), é possível entender como é o processo de associação e seu funcionamento .

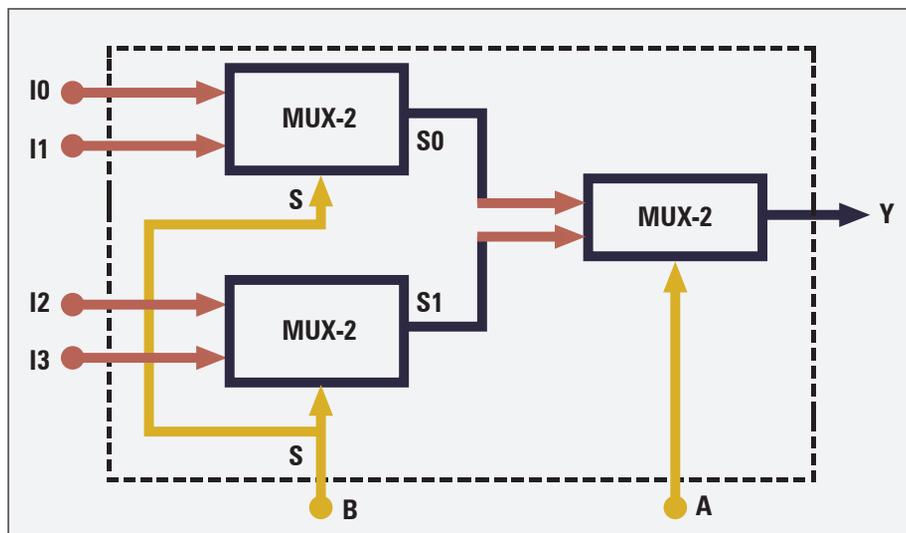


Figura 82 - Associação de (MUX-2)

Na Figura 82, estão associados dois (MUX-2) para montar um (MUX-4). Os seletores (A) e (B) são responsáveis por colocar na saída (Y) uma das entradas de (I0) a (I3). Por exemplo, para a entrada (I2) estar na saída, é necessário (B=0), nessa situação (I0) estará em (S0) e (I2) em (S1).

Para (I2) ir a (Y), o próximo passo é colocar (A=1), pois, nessa situação, (S1) vai para (Y), e como em (S1) está (I2), (I2) vai para a saída (Y).

Seguindo o raciocínio anterior, é possível montar um (MUX) 16 associando dois (MUXs) de oito canais e um (MUX) de dois canais. Como cada (MUX-8) tem três seletores, após a associação de dois (MUX-8) e um (MUX-2) têm-se 16 saídas e, para controlá-las, o (MUX) fica com quatro seletores, três do (MUX-8) e um do (MUX-2).

Resumindo

Neste capítulo, foram abordados os conceitos básicos para realizar a análise de circuitos combinacionais. Por intermédio de quatro passos básicos, é possível implementar qualquer circuito lógico digital, sendo eles: identificação da lógica da situação problema, montagem da tabela-verdade, retirada da expressão que soluciona o problema e montagem do circuito digital.

Os circuitos somadores e subtratores foram explicados com suas funções e lógicas de funcionamento. Os codificadores e decodificadores são circuitos muito utilizados na eletrônica digital devido à constante necessidade de conversão entre códigos, adequando os dados internos das máquinas para a troca de informações entre elas ou entre elas e o homem, por meio de uma linguagem acessível.

Os multiplexadores (MUX) e demultiplexadores (DEMUX) são amplamente usados na transferência de dados entre sistemas digitais. O (MUX), mediante a sua principal característica de reunir várias informações em uma única via, e o (DEMUX), o qual desmembra as diversas informações reunidas em uma única via em várias, proporcionam uma comunicação mais fácil de *bits* entre os sistemas digitais.

Capítulo 4

Circuitos contadores e *flip-flops*

Flip-flop é um dos componentes mais utilizados no campo da eletrônica digital. Uma das suas principais aplicações está no armazenamento de informações, sendo usado nas memórias de computadores e outros equipamentos eletrônicos.

Ao serem associados, formam circuitos contadores digitais empregados para diversos fins como contagem de pulsos e divisão de frequências. Circuitos mais complexos são configurados a partir dos contadores digitais. Assim, o *flip-flop* é o elemento básico na montagem de inúmeros equipamentos, ganhando destaque na área da eletrônica digital.

4.1 Tipos e funcionamento de *flip-flops*

Diferentemente dos circuitos combinacionais (Figura 83), as saídas dos circuitos sequenciais não mudam exclusivamente com a variação imediata de suas entradas, pois dependem também de seus estados anteriores, valores que estão antes da aplicação do novo estado lógico.



Figura 83 - Diagrama esquemático do circuito combinacional

A composição básica de todos os circuitos sequenciais está apresentada na Figura 84. Os circuitos sequenciais, na verdade, são constituídos por circuitos combinacionais devidamente realimentados.

A realimentação dos circuitos sequenciais (Figura 84) é o que lhes proporciona a mudança de seu estado em função dos níveis de saída anteriores à inserção dos *bits* de entrada. A Tabela 53 apresenta uma porta (OR) realimentada para ser feita uma análise do funcionamento básico dos circuitos sequenciais. Para analisar, é necessário seguir os passos na Tabela 53.

Tabela 53 - Tabela-verdade para a porta (OR) realimentada

	Entrada	Saída
1º Passo	Indeterminado	0
2º Passo	0	0
3º Passo	1	1
4º Passo	0	1

Fonte: Elaboração dos autores.

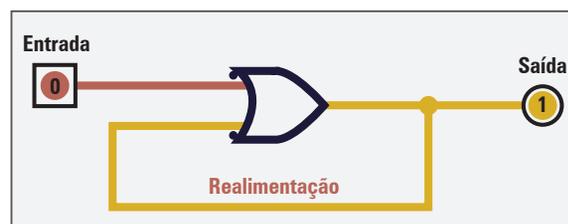


Figura 84 - Realimentação do circuito sequencial

No primeiro passo, a identificação de indeterminado é apresentada porque não é possível saber qual o valor lógico anterior à observação, pois é o primeiro momento a ser observado na tabela. No segundo, é aplicado nível 0 à entrada, como já havia 0 na saída, ela permanece em 0.

No terceiro passo, é aplicado 1 à entrada e, com isso, a saída é levada para 1. O que ocorre a partir do quarto passo é o travamento do nível lógico 1 na saída, logo após o seu surgimento na entrada. Isso se deve à realimentação que aplica o nível 1 da saída para a outra entrada da porta (OR).

Esse travamento constitui um sistema de memorização, pois a existência do *bit* 1 na saída indica que sua presença ocorreu em algum momento na entrada do circuito. Além disso, essa memória permanece inalterada devido à realimentação, mesmo que a entrada retorne para o nível 0, conforme o desenho do circuito da Tabela 53.

Essa dependência da situação anterior é que define o estado de um circuito sequencial: não basta a entrada ser igual a 0, é necessário conhecer o valor assumido anteriormente pela saída para defini-la, situação observada na mudança do segundo para o terceiro passo.

A partir do terceiro passo, a saída fica travada em 1, ou seja, independentemente do valor de entrada, a saída sempre ficará no nível lógico 1. Para a saída voltar a ser 0, existem algumas possibilidades. Na Figura 85, são demonstradas essas opções no circuito.

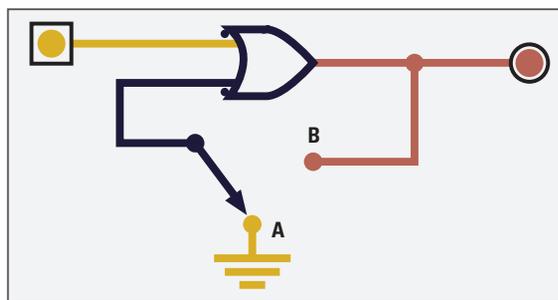


Figura 85 - Recurso para alterar nível de saída de circuito realimentado usando chave mecânica

Ainda na Figura 85, ao colocar a chave seletora no caminho da realimentação, torna-se possível pôr o nível 0 na saída do circuito. Quando a chave está na posição (A), o terra, que representa o nível 0, será colocado em uma das entradas da porta (OR) e, assim, é possível colocar zero na saída novamente, bastando para isso pôr 0 na outra entrada.

Quando a chave estiver na posição (B), o circuito volta para a operação normal. O grande problema desse tipo de circuito é a presença da chave mecânica, pois esse tipo de chave gera muito ruído quando muda de posição, causando mudanças errôneas nos níveis lógicos de entrada do circuito.

Com vistas a solucionar esse problema, é necessário usar uma chave digital como alternativa, no caso, uma porta (AND), conforme a Figura 86.

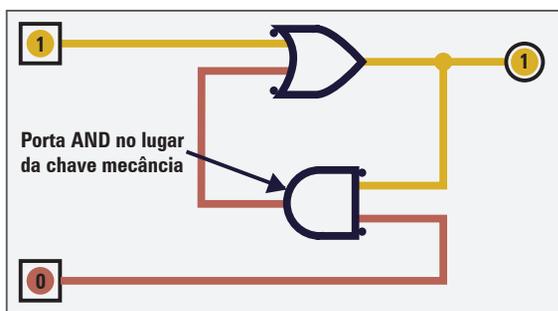


Figura 86 - Recurso para alterar nível de saída de circuito realimentado usando porta (AND)

Ao colocar a porta (AND) no circuito anterior, é possível estabelecer nomenclaturas para as entradas e saídas do circuito da Figura 86. A saída em circuitos sequenciais é conhecida como (Q) e, dependendo do circuito, existe a saída complementar (\bar{Q}). Assim, quando ($Q=1$), ($\bar{Q}=0$). A entrada da porta (OR) é chamada de (S), nomenclatura

derivada do nome *set*. A entrada da porta (AND) é denominada (R), nomenclatura devido ao nome *reset*.

O circuito da Figura 86 pode ser melhorado e, dessa forma, servir de base para implementação dos circuitos conhecidos como *flip-flops* (FF). Essa categoria de circuitos digitais possui muitos tipos, que são usados como base para diversos equipamentos mais complexos dentro da eletrônica digital.

Os FFs são considerados os elementos de memória mais importantes dentro do estudo da eletrônica digital, eles são implementados com portas lógicas simples. Por usarem portas lógicas na sua construção, não têm capacidade de armazenamento de informações, sendo estas os *bits* 0 e 1. Contudo, em virtude de recursos de realimentação no circuito, é possível fazer o FF tornar-se uma memória. O FF é chamado também de *latch* devido à sua característica de armazenamento de dados.

Os *flip-flops* são circuitos que possuem dois estados lógicos estáveis (Q e \bar{Q}), os quais assumem um valor lógico após combinações dos níveis de entrada e um pulso de controle (*clock*), mantendo a sua saída invariável até novo pulso de *clock*. Após esse pulso, as saídas permanecem invariáveis ou não dependendo dos estados lógicos das entradas. Com isso, considera-se o *flip-flop* um bloco lógico com duas entradas, duas saídas e um controle, mudando seu funcionamento de acordo com o tipo de *flip-flop*, porque, internamente ao bloco, o circuito lógico de implementação muda de acordo com o tipo.

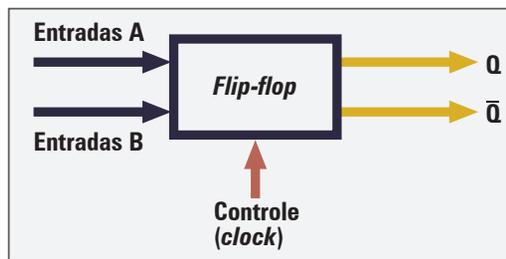


Figura 87 - Bloco básico representativo dos circuitos *flip-flops*

4.1.1 *Flip-flop* tipo (RS)

O *flip-flop* mais básico é o tipo (RS). Para entender seu funcionamento, é necessário analisar passo a passo a tabela-verdade. Como o FF RS possui duas entradas (R e S), elas precisam também fazer parte da tabela. Para efeito de análise, considera-se o estado anterior (Q) e o estado futuro (Q_f), em que (Q) é o estado lógico atual e (Q_f) o estado que o *flip-flop* assumirá.

Tabela 54 - Tabela-verdade e circuito do *flip-flop* (RS) com (NAND)

//////////	R	S	Q	Q _f	//////////
Passo 1	0	0	0	0	Q = Q _f
	0	0	1	1	
Passo 2	0	1	0	1	Saída fixa em 1
	0	1	1	1	
Passo 3	1	0	0	0	Saída fixa em 0
	1	0	1	0	
Passo 4	1	1	0	1	Não permitido
	1	1	1	1	

Fonte: Elaboração dos autores.

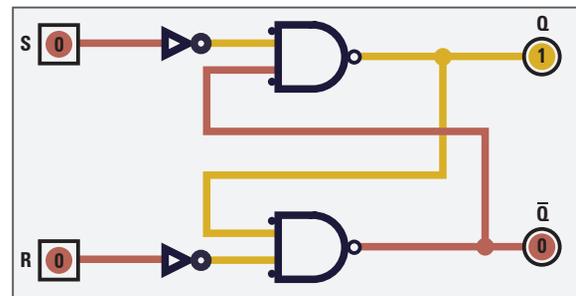


Figura 88 - *Flip-flop* (RS) com portas (NAND)



Latch: tipo de memória temporária montada a partir de circuitos *flip-flops* que possui dois estados lógicos fixos, é também chamado de circuito biestável.

Clock: sinal utilizado na eletrônica digital com a função de mudar os estados lógicos do circuito; onda com formato quadrado que muda os tempos de nível alto e baixo de acordo com a necessidade do circuito.

A fim de analisar o funcionamento do *flip-flop* da Tabela 54, é necessário verificar as entradas e saídas passo a passo. No passo um ($R=0$) e ($S=0$). Conforme a Tabela 50, é possível considerar duas situações anteriores: ($Q=0$) e ($Q=1$). Quando ($Q=0$), sua situação futura não muda, ou seja, ($Q=Qf$) e quando ($Q=1$) ocorre o mesmo com a saída ($Q=Qf$). Assim, a saída não muda novamente. Considera-se, então, que, quando ($R=S=0$), a saída não muda e mantém sua saída inalterada ($Q=Qf$).

No passo dois ($R=0$) e ($S=1$). Pode-se, então, considerar duas situações anteriores: ($Q=0$) e ($Q=1$). Quando ($Q=0$), sua situação futura passará para um ($Qf=1$) e, quando ($Q=1$), o (Qf) permanecerá em 1, assim, diz-se que, quando (S) está em 1, ele mantém a saída fixa em 1, por isso, é chamado de *set*.

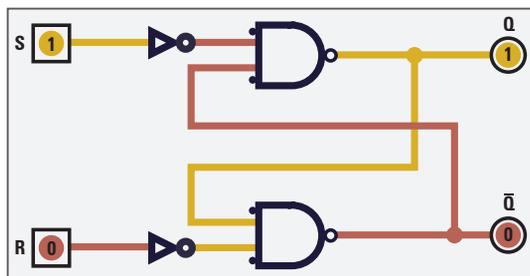


Figura 89 - *Flip-flop* (RS) com as entradas ($R=0$) e ($S=1$)

No passo três ($R=1$) e ($S=0$), apreciam-se também duas situações anteriores: ($Q=0$) e ($Q=1$). Quando ($Q=1$), sua situação futura passará para um ($Qf=0$) e, quando ($Q=0$), o (Qf) permanece em 0, dessa maneira, afirma-se que, quando (R) está em 1, ele mantém a saída fixa em 0, por isso, é chamado de *reset*.

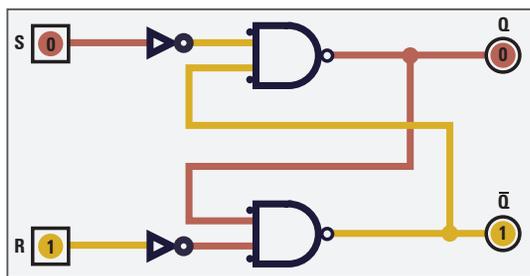


Figura 90 - *Flip-flop* (RS) com as entradas ($R=1$) e ($S=0$)

O passo quatro considera as entradas (R) e (S) em 1. Conforme a Figura 90 demonstra, quando (R) e (S) estão em nível lógico 1, as saídas (Q) e (\bar{Q}) serão iguais a 1, pois qualquer entrada da porta (NAND) que seja 0 garante 1 na sua saída, porém não pode haver situação em que ($Q=\bar{Q}$), uma vez que essa situação contraria a lógica digital e não pode existir, conseqüentemente, considera a situação ($R=S=1$) como não permitida. Independentemente da situação anterior (Q), a futura (Qf) é sempre 1 nas duas saídas do *flip-flop*.

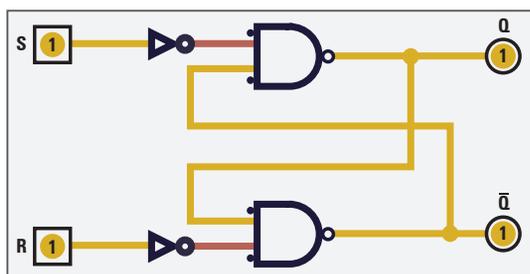


Figura 91 - *Flip-flop* (RS) com as entradas ($R=1$) e ($S=1$)

Após analisar a tabela toda e verificar as situações de saída em razão do funcionamento do circuito, a tabela pode ser reescrita de modo simplificado, representado a tabela-verdade do *flip-flop* (RS) com porta (NAND), conforme desenho e Tabela 55.

Tabela 55 - Tabela-verdade e circuito do *flip-flop* (RS)

R	S	Q
0	0	Q anterior (Q_a)
0	1	1
1	0	0
1	1	Não permitido

Fonte: Elaboração dos autores.

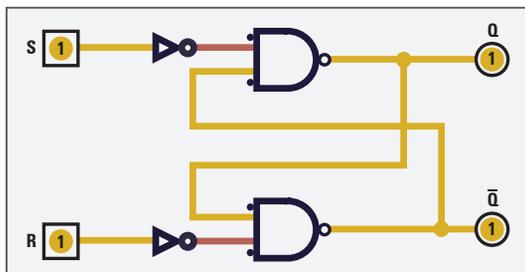


Figura 92 - *Flip-flop* tipo (RS)

Nos circuitos *flip-flop* (RS) apresentados até o momento, quando as entradas alteram, a saída muda, não havendo um controle que evita a variação de saída, e assim modificam os estados de (Q) e (\bar{Q}). Nos sistemas digitais, é muito importante controlar o momento correto para uma saída variar seu estado lógico. Nesse sentido, para o *flip-flop* (RS) ser funcional, é necessário controlar o momento em que suas saídas sofrem variação. Para realizar esse controle, utiliza-se um terminal no *flip-flop* chamado de *clock*. Com ele, é possível habilitar ou não o *flip-flop* para funcionar. O circuito com a tabela-verdade a seguir apresenta como se constrói um *flip-flop* (RS) com *clock*.

Tabela 56 - Tabela-verdade e circuito do FF (RS) com *clock*

Clock	R	S	Q
0	X	X	Q anterior (Q_a)
1	0	0	Q anterior (Q_a)
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	Não permitido

Fonte: Elaboração dos autores.

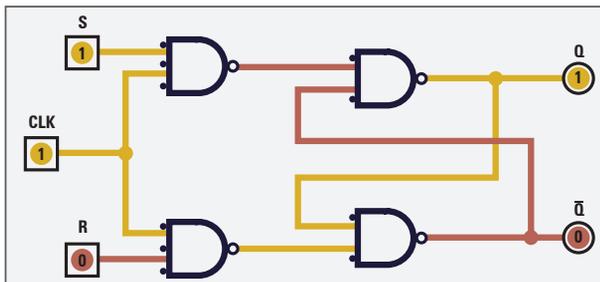


Figura 93 - *Flip-flop* (RS) com *clock*

Na Tabela 56, quando o *clock*=0, independentemente do valor de (R) e de (S), representado na tabela por (X), a saída será sempre o valor anterior, assim, se (Q) fosse 1, permanecer-se-ia com esse valor. Quando o *clock* passa para 1, o *flip-flop* funciona como um (RS) normal. Com a inserção do terminal de *clock*, é possível controlar o momento em que o circuito altera suas saídas, pois, colocando o *clock* em 0, o circuito não muda o estado de (Q) e (\bar{Q}), funcionando assim como uma memória temporária.

As entradas do *flip-flop* (RS) e quaisquer outras entradas de outros tipos de *flip-flops* estudados dentro da eletrônica digital são consideradas entradas de controle. Quando o *flip-flop* possui *clock*, as entradas de controle são denominadas de entradas síncronas, porque dependem da ação em conjunto com o *clock* para atuarem no circuito, mudando ou não suas saídas.

No estudo da eletrônica digital, os *flip-flops* possuem como simbologia um quadrado ou retângulo com os terminais de entrada, saída e *clock* desenhados. Para diferenciar qual é o tipo de *flip-flop*, as letras dos terminais de entrada são identificadas.

Dessa maneira, como cada tipo possui sua letra de identificação, é possível saber qual o desenho. Na Figura 94, está representado o *flip-flop* (RS) com *clock*.

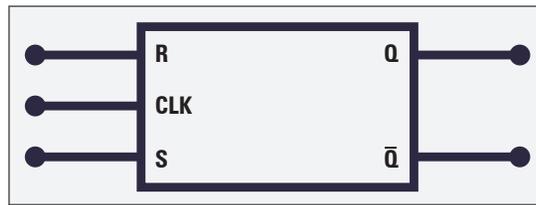


Figura 94 - Representação do *flip-flop* (RS) com *clock*

Existem aplicações para o *flip-flop* (RS) em que é necessário fazer a saída (Q) assumir um valor 0 ou 1 forçadamente, pois, ao ligar o circuito do *flip-flop*, pode ser que sua saída não esteja no valor desejado. Com o intuito de solucionar esse problema, são aplicadas no *flip-flop* (RS) duas entradas chamadas de *preset* e *clear* (Figura 95). A entrada *clear* também é denominada *reset*, porque, quando acionada, leva a saída (Q) ao nível 0.

A função da entrada *preset* é aplicar o nível 1 à saída (Q) e a função do *clear* é colocar o nível 0 na saída (Q). A Tabela 57 demonstra o *flip-flop* (RS) com as entradas *preset* e *clear* e sua tabela-verdade.

Tabela 57 - Circuito e tabela-verdade do FF (RS) com *preset* e *clear*

<i>Preset</i>	<i>Clear</i>	R	S	Q
0	0	X	X	Operação normal
0	1	0	0	Q = 0
1	0	0	1	Q = 1
1	1	1	0	Não utilizada

Fonte: Elaboração dos autores.

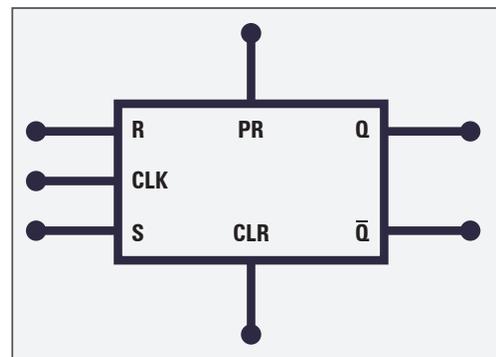


Figura 95 - *Flip-flop* (RS) com *preset* e *clear*

As entradas de controle *preset* e *clear* são consideradas assíncronas, visto que não precisam atuar em conjunto com o *clock* de entrada para operarem nas saídas do FF. Diferente das outras entradas que são consideradas síncronas, conforme visto anteriormente, o *preset* e o *clear* sobrepõem às saídas o valor desejado, independentemente das entradas.

Como *preset* e *clear* são assíncronos e respondem a níveis lógicos fixos, quando, por exemplo, a entrada de *preset* for 1, a saída (Q) será sempre 1, independentemente das combinações e *clock* de entrada. É importante frisar que as entradas *preset* e *clear* são facultativas nos FFs, desse modo, existem CIs que possuem as duas entradas, outros só uma delas. Com isso, seu uso depende do projeto e da disponibilidade por parte do fabricante do CI.

O termo assíncrono utilizado aqui para caracterizar o *preset* e o *clear* do FF é devido à sua independência do sinal de *clock* de entrada, assim, a qualquer momento, o *preset* e o *clear* podem ser ativados sem dependerem do *clock*. Já os sinais de entrada precisam do *clock* para atuarem na saída, diz-se, portanto, que elas são síncronas com o *clock*.

4.1.2 Flip-flop tipo (JK)

O *flip-flop* (RS) possui um estado de saída não permitida quando ($R=S=1$), com essa situação ($Q=\bar{Q}$), fato esse que contraria a lógica digital. Para resolver essa deficiência, usa-se o *flip-flop* (JK) que é um (RS) realimentado por meio de portas (AND), conforme demonstrado na Figura 96.

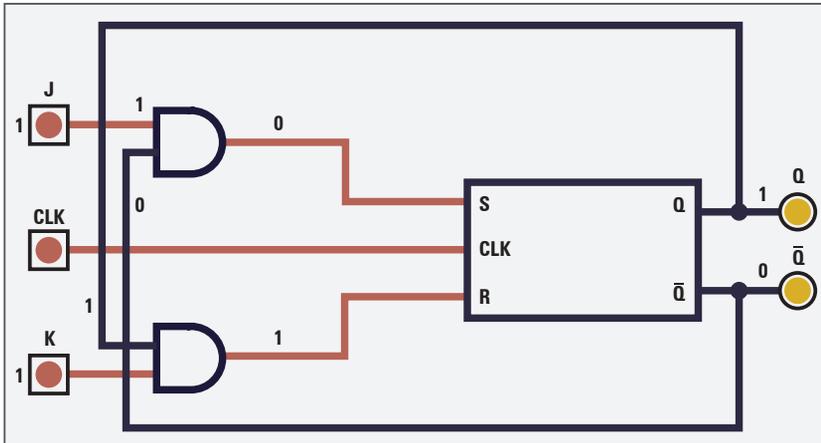


Figura 96 - Flip-flop tipo (JK)

Os níveis lógicos apresentados na Figura 96 servem para analisar o funcionamento do *flip-flop* (JK) quando em suas entradas está presente o nível lógico 1, situação que no *flip-flop* (RS) resultava em estado não permitido. Considerando que as saídas sejam ($Q=1$) e ($\bar{Q}=0$), a realimentação leva esses níveis para a entrada das portas (AND). Nas outras entradas da (AND) está 1, isso leva a saída da (AND) que está ligada à entrada (S) para 0 e a saída da (AND) que está ligada à entrada (R) para 1. Conforme foi visto, quando ($R=1$) e ($S=0$), a saída (Q) é levada para 0, dando um *reset* no (RS), invertendo a situação anterior. Observa-se que, quando ($J=K=1$), a saída anterior (Q_a) é invertida (\bar{Q}_a), no exemplo do desenho, ($Q_a=1$) após a situação analisada, fica ($\bar{Q}_a=0$). A tabela-verdade e a simbologia para o *flip-flop* (JK) ficam conforme a Tabela 58 e a Figura 97.

Tabela 58 - Tabela-verdade e simbologia do *flip-flop* (JK) com clock

Clock	J	K	Q
0	X	X	Q anterior (Q_a)
1	0	0	Q anterior (Q_a)
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	\bar{Q}_a

Fonte: Elaboração dos autores.

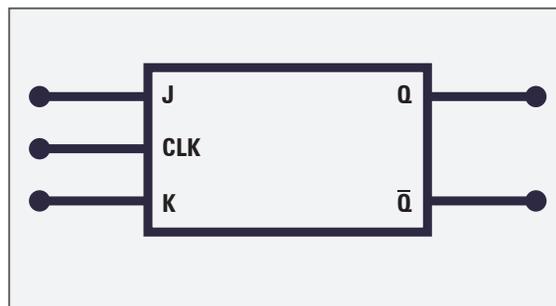


Figura 97 - Flip-flop (JK) com clock

4.1.3 Flip-flop tipo (D)

O FF (JK), assim como o FF (RS), tem a característica de manter a saída inalterada enquanto a entrada de *clock* não habilitar a possível troca do nível de saída. Desse modo, o dado (*bit*) na

saída é armazenado (gravado) até haver a necessidade de alterá-lo, por isso os FFs são chamados também de *latch* (memória). A tabela-verdade e a simbologia do FF (D) estão apresentadas na Tabela 59. O termo (D) do FF é proveniente de dado, em inglês, *data*.

Tabela 59 - Tabela-verdade e simbologia do FF (D) com *clock*

Clock	D	Q
0	X	Q _a
1	0	0
1	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

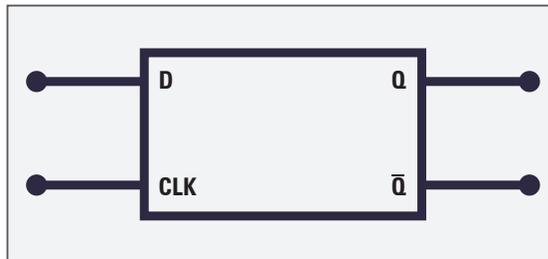


Figura 98 - Flip-flop tipo (D) com *clock*

A Tabela 59 mostra que, quando o *clock* está em zero (CLK=0), independentemente do valor da entrada D (D=X), a saída (Q) não sofre alteração, fica com o nível anterior. Quando o *clock* vai para o nível alto (CLK=1), o FF passa a operar e, com isso, suas saídas dependem da situação da entrada, então para (CLK=1) e (D=0) a saída (Q) será levada para o nível baixo (Q=0), mesmo que seu estado anterior tenha sido alto (1). Quando (D=1) e (CLK=1), a saída (Q) será levada para o nível alto (Q=1) independentemente de haver 0 em (Q) na situação anterior.

Analisando a Tabela 59 é possível afirmar que o dado presente na entrada (D) será levado para a saída (Q) quando o *clock* estiver no nível alto (CLK=1), ficando a saída (Q) inalterada até que o (CLK) habilite para transferir um dado da entrada para a saída.

O FF (D) pode ser implementado a partir do FF (JK), porém é ligada uma porta inversora entre as entradas (J) e (K) para conseguir transformar suas duas entradas em uma única porta de entrada do FF (D). A seguir, está exemplificado o circuito com FF (JK) que implementa o FF tipo (D).

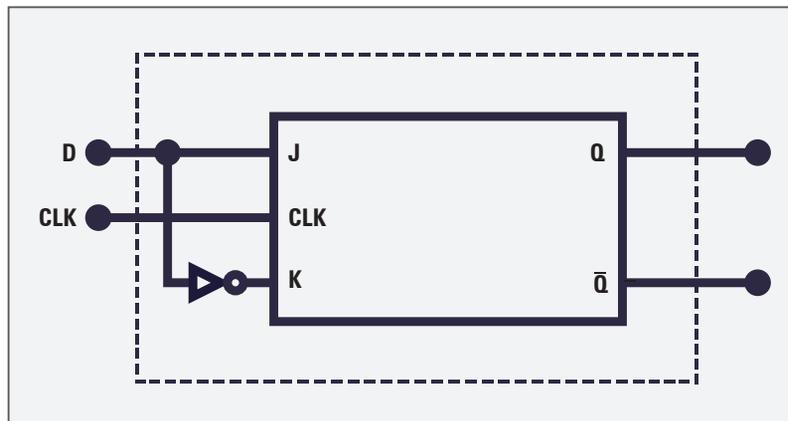


Figura 99 - Flip-flop (D) implementado de FF (JK)

4.1.4 Flip-flop tipo (T)

O FF tipo (T), apresentado na Figura 100, assim como o FF tipo (D), possui como base o FF (JK). No FF tipo (T), as entradas (J) e (K) são interligadas sem utilizar uma porta inversora, ou seja,

as entradas do (JK) estão curto-circuitadas. Com esse tipo de ligação, tem-se ou nível alto 1 ou baixo 0 nas duas entradas simultaneamente.

Tabela 60 - Tabela-verdade e simbologia do FF tipo (T) com *clock*

Clock	T	Q
0	X	Q_a
1	0	Q_a
1	1	\bar{Q}_a

Fonte: Elaboração dos autores.

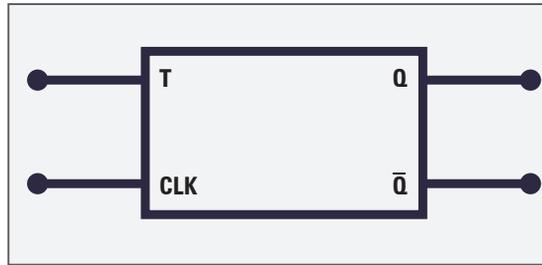


Figura 100 - Flip-flop tipo (T) com *clock*

A Tabela 60 informa que, quando o *clock* está em zero ($CLK=0$), independentemente do valor da entrada T ($T=X$), a saída (Q) não sofre alteração, fica com o nível anterior (Q_a). Quando o *clock* vai para o nível alto ($CLK=1$), o FF passa a operar e, com isso, suas saídas dependem da situação da entrada. Então, para ($CLK=1$) e ($D=0$), a saída (Q) mantém seu estado inalterado ($Q=Q_a$). Quando ($T=1$) e ($CLK=1$), a saída (Q) será invertida, ou seja, se estava em nível baixo passa para alto e vice e versa ($Q = \bar{Q}_a$).

Analisando a Tabela 60, é possível afirmar que o FF estando habilitado pelo *clock* e estando a entrada ($T=1$), a saída sempre inverte seu valor anterior. O FF (T) pode ser implementado a partir do FF (JK), porém suas entradas (J) e (K) são curto-circuitadas para conseguirem transformar suas duas entradas em uma única porta de entrada do FF (T). A seguir, é exibido o circuito com FF (JK) que implementa o FF tipo (T).

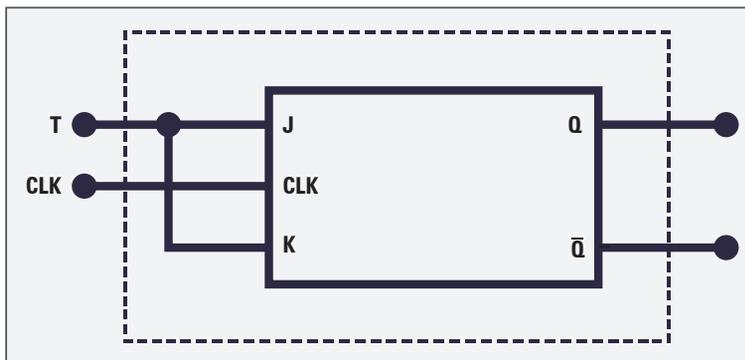


Figura 101 - Flip-flop (T) implementado de FF (JK)

4.1.5 Tipos de sinais de *clock* usados em *flip-flop*

O *clock* visto até o momento possui dois níveis fixos 0 ou 1. Mas, no estudo da eletrônica digital, o *clock* é uma seqüência de pulsos, variando entre alto e baixo (0 e 1). Como a maioria dos circuitos digitais exige um controle preciso da variação do estado lógico de saída em função do *clock*, é importante controlar precisamente as variações desse sinal.

Em função dessa necessidade de controle do *clock*, nos circuitos precisa haver um tipo de identificação para saber como o sinal dele vai atuar nas suas mudanças. É importante salientar que as saídas de um circuito controlado por *clock* só altera seu estado lógico quando houver o *clock* adequado.



Transição: mudança de estado lógico, positivo ou negativo, do sinal de *clock* responsável por mudar a saída do circuito digital.

Conforme estudado até esse momento, o *clock* quando está alto permite que FF funcione e, quando está baixo, o FF não muda seu estado de saída. No entanto, existem mais dois tipos de *clock* chamados de *transição* positiva (borda de subida) e *transição* negativa (borda de descida). Esses dois são os tipos de *clock* mais usados na eletrônica digital, pois a grande maioria dos fabricantes de circuitos integrados os utiliza em seus projetos. Na Figura 102, é demonstrado um sinal de *clock* com a identificação da borda de subida e descida.

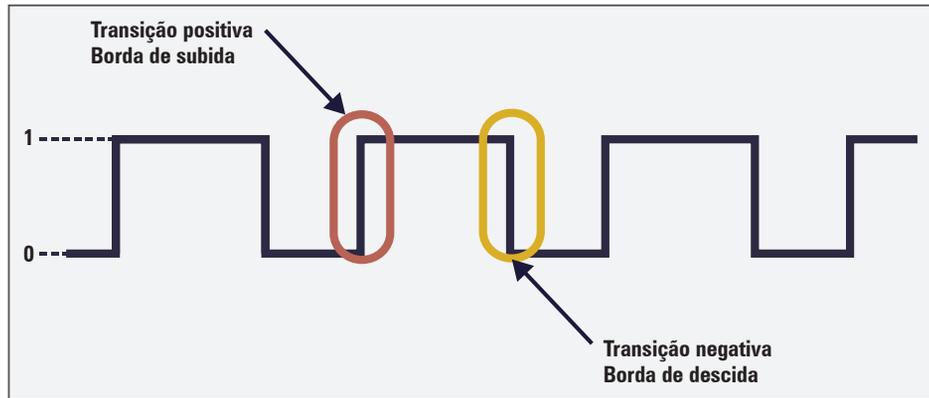


Figura 102 - Identificação das bordas do sinal de *clock*

Na Figura 102, é possível ver que a *transição* positiva do sinal de *clock* acontece no momento em que o sinal sai do nível baixo e vai para o nível alto, passa de 0 para 1. E a *transição* negativa é quando o sinal passa de alto para baixo, passa de 1 para 0.

Diferentemente das análises anteriores para o *clock* fixo, com um sinal variável de *clock*, é preciso analisar passo a passo as suas variações de entrada para determinar sua saída. Por exemplo, o mapa de *clock* da Figura 103 é aplicado em um FF tipo (D) que possui *clock* de *transição* positiva, a saída (Q) do FF está demonstrada nessa mesma figura.

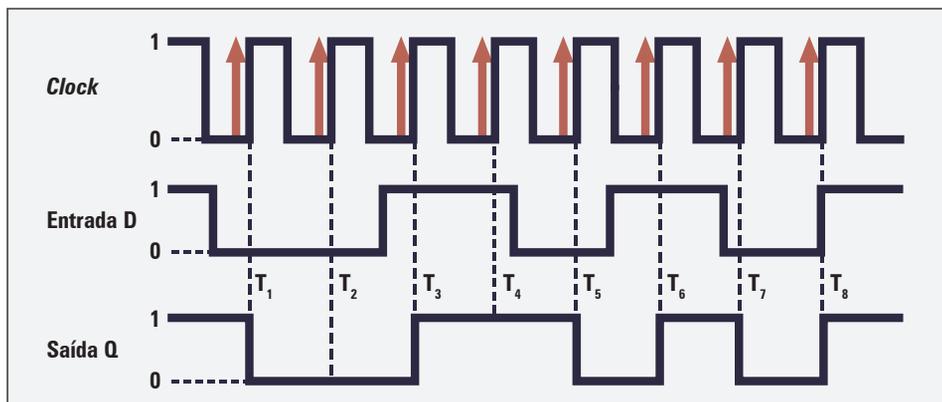


Figura 103 - Análise de *clock* de *transição* positiva em FF tipo (D)

Para entender o mapa de saída do FF tipo (D) da Figura 103, é necessário analisar em cada *transição* do *clock* o efeito causado na saída (Q). Na primeira *transição* positiva do *clock*, no instante (T_1), a entrada (D) está baixa (0) e a saída (Q) está alta 1, assim (Q) muda para nível baixo. No instante (T_2), a entrada (D) está baixa e, como a saída (Q) também está baixa, (Q) mantém o nível lógico baixo.

No instante (T_3), (D) está alto e a saída (Q) está baixa, assim (Q) muda seu nível para alto novamente. No instante (T_4), (D) está alto e como (Q) está alto seu estado lógico não muda. No instante (T_5), (D) volta para nível baixo e como (Q) está em nível lógico alto seu estado é comutado para baixo. No instante (T_6), a entrada (D) está alta e como (Q) está com nível lógico baixo, seu estado é comutado para alto. Em (T_7), (D) volta para 0, assim (Q) passa de 1 para 0. Por último, no instante (T_8), (Q) passa de baixo para alto, pois em (D) tem-se o nível lógico 1.

A análise feita anteriormente, instante a instante, mostra que somente nos momentos nos quais existe a transição positiva do *clock*, de baixo para alto, é que a saída (Q) poderá alterar seu valor. Caso aconteça o *clock* de transição positiva e a entrada não mude seu nível lógico, a saída não será alterada, conforme foi observado nos instantes (T_2) e (T_4) da Figura 103.

Observa-se que, não havendo a transição correta do *clock*, mesmo que a entrada (D) altere, a saída não vai mudar, como ocorrido entre os instantes (T_5) e (T_6), somente com o *clock* correto em (T_6) a saída é modificada.

A seguir, na Tabela 61, são apresentados o símbolo para o FF tipo (D) com *clock* (Figura 104) de transição positiva juntamente à sua tabela-verdade. Na representação do *clock* válido, não são colocados níveis fixos, e, sim, uma seta indicando a transição válida para o FF, no caso a seta é para cima, pois a transição em questão é positiva. No símbolo aparece um triângulo na base do *clock*, significando que o FF responde na transição do sinal e não em nível fixo.

Tabela 61 - Tabela-verdade e simbologia do FF (D) com *clock* de transição positiva

Clock	D	Q
0	0	Q_a
↑	0	0
↑	1	1

Fonte: Elaboração dos autores.

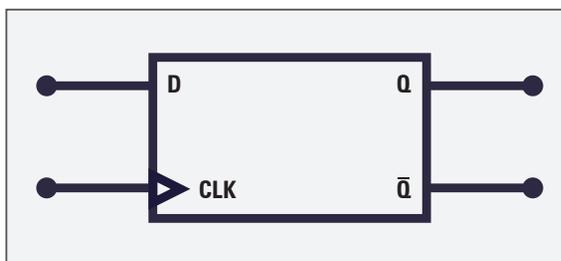


Figura 104 - Flip-flop tipo (D) com *clock*

Existe uma simbologia adequada dos *flip-flops* que utilizam os *clocks* de transição positiva e negativa, a Figura 105 exemplifica a diferença gráfica dos *clocks* nos símbolos para *flip-flops*.

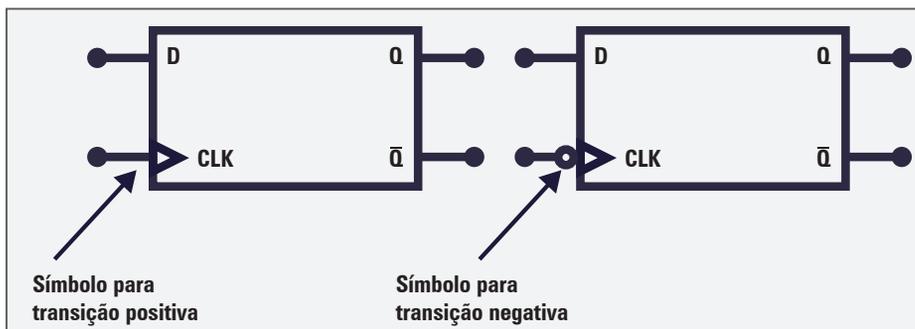


Figura 105 - Simbologia para *clock* de transição positiva à esquerda e transição negativa à direita

A Figura 105 demonstra que existe uma pequena diferença gráfica entre o *clock* de transição positiva e negativa desenhados na simbologia dos FFs. Na transição negativa, existe, além de um triângulo, um pequeno círculo na entrada do *clock*.

Quando o *clock* atua no *flip-flop* por nível lógico e não por transição, a simbologia eletrônica muda, a Figura 106 mostra como deve ser a simbologia dos *clocks* por nível lógico alto e baixo para *flip-flops*.

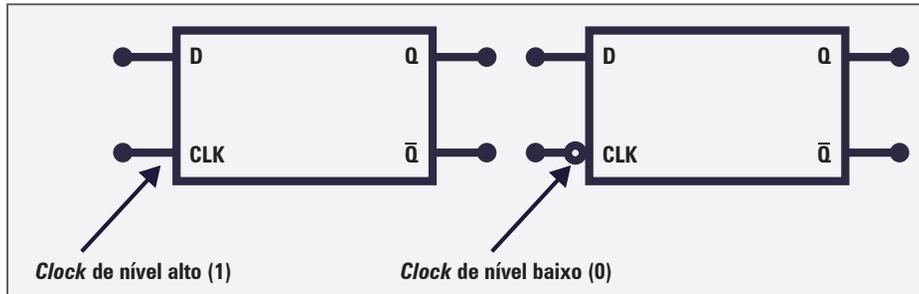


Figura 106 - Simbologia para *clock* de nível lógico alto à esquerda e nível baixo à direita

4.2 Contadores

Os *flip-flops* apresentados até o momento servem de base para a montagem de circuitos digitais maiores como contadores e registradores. Em conjunto com portas lógicas comuns, a associação de vários *flip-flops* pode fazer parte de circuitos integrados nos quais o fabricante fornece o circuito pronto para as aplicações necessárias em equipamentos de telecomunicação e computadores.

Existem diversos tipos de contadores e, conseqüentemente, muitos circuitos diferentes para implementar a contagem. A grande mudança existente entre os diversos tipos de contadores está relacionada à quantidade de *bits* do contador, por exemplo, um contador de 10 *bits* necessita, na sua construção, da associação de 10 FFs, assim a quantidade de FFs na montagem do contador está atrelada ao número de *bits* utilizados no contador.

Em face disso, é possível concluir que a contagem máxima do contador depende da relação 2^N , em que (N) é o número de FFs empregados na montagem do circuito. Por exemplo, um contador que possui cinco FFs na sua montagem é chamado de contador *módulo* 32, pois pode contar de 00000 a 11111.

Como exemplo para análise, a Figura 107 apresenta um contador binário crescente de dois *bits*, também chamado de contador *módulo* 4.

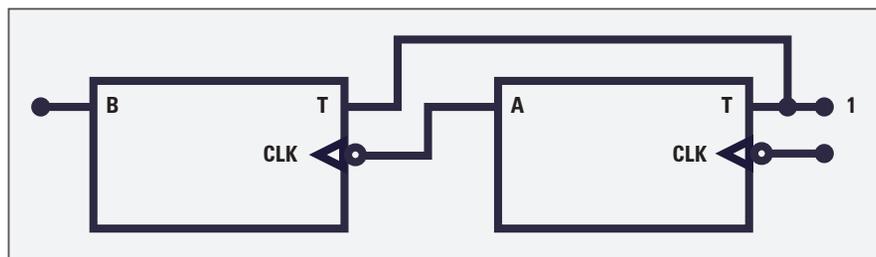


Figura 107 - Contador binário de dois *bits*

O tipo de FF usado na Figura 107 é o (T) e sua entrada é fixa no nível alto. O tipo de *clock* do FF é a transição negativa, logo, cada vez que o *clock* descer do nível alto para o baixo, o FF estará habilitado para mudar a sua saída. O mapa de pulsos a seguir mostra os sinais de *clock* e as saídas (A) e (B).



Módulo: quantidade de códigos digitais não repetidos que o contador ou decontador apresenta nas suas saídas.

Na Figura 108, é possível visualizar que a saída do *flip-flop* (A) é usada de *clock* para o *flip-flop* (B). Como os FFs da figura são do tipo (T) e suas entradas estão fixas em nível alto, a cada sinal de *clock* válido a saída é invertida. O *clock* de entrada é aplicado do *flip-flop* (A), mudando sua saída a cada transição de alto para baixo. No mapa de pulsos, vê-se que em (T₁) o *clock* passa de 1 para 0, logo a saída (A) muda de 0 para 1.

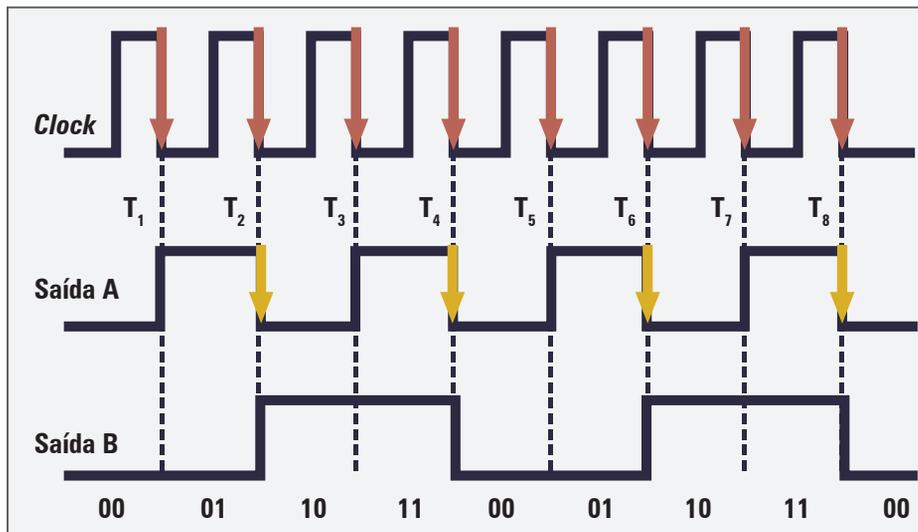


Figura 108 - Mapa de pulsos de saída do contador binário de dois bits

O *clock* do *flip-flop* (B) também é de transição negativa, logo sua saída muda quando o sinal de saída do *flip-flop* (A) passar de 1 para 0. No mapa de pulsos, nota-se a mudança da saída do *flip-flop* (B) no instante (T₂), pois, nesse momento, o *clock* de entrada muda a saída do *flip-flop* (A) que, conseqüentemente, altera a saída do (B) de 0 para 1.

Na parte inferior do mapa de pulsos da Figura 108, é perceptível a contagem binária de dois bits proporcionada pelo circuito. No instante (T₁), a contagem está em 00 e, na medida em que o *clock* muda os FFs, a contagem vai aumentando, chegando a 11 no instante (T₃). No instante (T₄), a contagem volta para 00 e o ciclo recomeça. Para a formação do número, o *flip-flop* (B) é o bit mais significativo.

No circuito contador apresentado na Figura 108, o *clock* não é comum a todos os *flip-flops*, pois a saída de um FF é usada como *clock* para o próximo FF, assim, esse tipo de contador é denominado assíncrono.

4.2.1 Contador assíncrono de módulo menor que 2^N

O contador assíncrono tem sua contagem máxima limitada ao valor de 2^N, em que (N) representa o número de FFs utilizados no circuito, o contador da Figura 109 usa dois FFs, o que produz um contador de módulo 4, ele conta de 00 a 11. Os contadores são modificados para contar menos que o módulo máximo permitido, por exemplo, um contador módulo 16 pode ser modificado e tornar-se um módulo 10.

Um recurso comum usado para diminuir o módulo de contagem de um contador é utilizar portas lógicas de apoio para dar um *reset* na contagem no momento desejado. O exemplo da Figura 109 é um contador com módulo 8 máximo de contagem, porém a porta (NAND) da figura muda o módulo de contagem do circuito para o módulo 5.

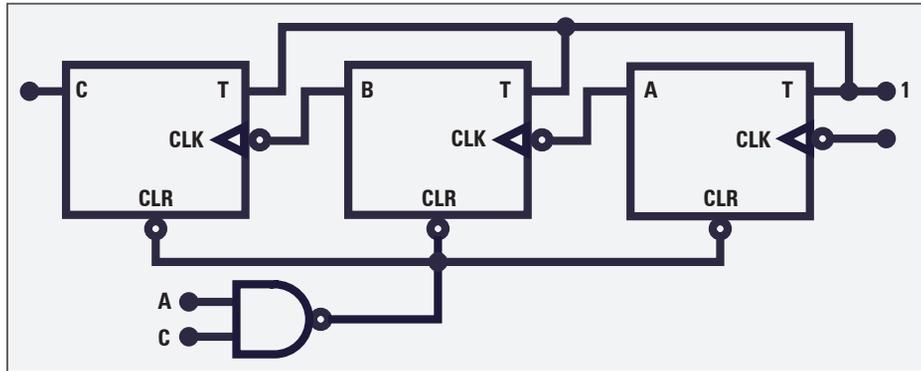


Figura 109 - Contador módulo 5 obtido de contador módulo 8

A saída da porta (NAND) da Figura 110 está ligada às entradas assíncronas de *clear* (CLR) dos FF tipo (T), sendo essas entradas ativadas com nível baixo. Enquanto a saída da porta (NAND) for alta, as entradas (CLR) não atuarão no funcionamento do circuito, funcionando como um contador normal. Quando a saída da (NAND) for baixa, os FFs sofrem um *reset* e suas saídas mudam para nível baixo, começando a contagem.

As entradas da (NAND) são as saídas dos *flip-flops* (A) e (C), dessa forma, quando (A) e (C) estiverem altos, a saída da (NAND) passará ao nível baixo, dando um *reset* nos FFs. O *flip-flop* (C) é o *bit* mais significativo da contagem e o FF (A) o menos significativo.

A situação de saída baixa da (NAND) só ocorrerá quando nas suas entradas houver nível alto, situação essa que acontece apenas quando a contagem estiver em 101, ou seja, a contagem vai até 100 e o número 101 não é contado, pois esse número gera um *reset* no contador e, desse modo, passa automaticamente a saída para 000.

O mapa de pulsos na Figura 110 mostra a contagem do circuito e o momento do *reset* causado pela porta (NAND).

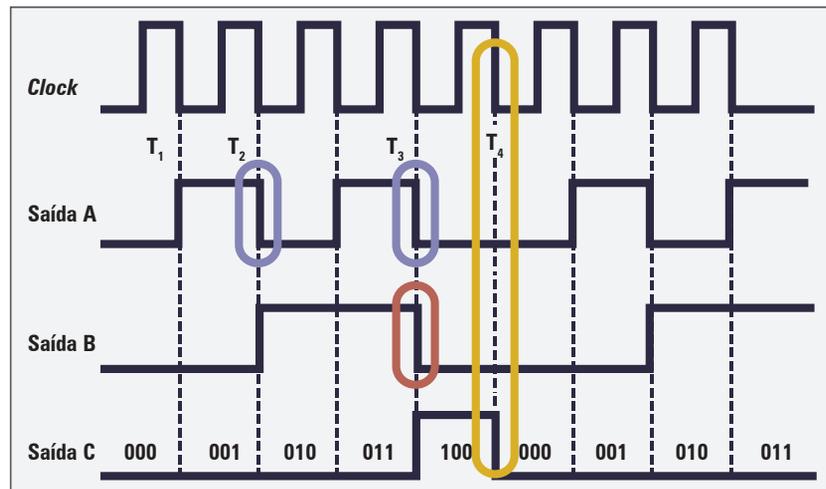


Figura 110 - Mapa de pulsos de saída do contador assíncrono módulo 5

O contador começa a contagem em 000 e no instante (T_1) acontece a primeira transição negativa do *clock*, variando a saída do FF (A) para alto. A contagem continua normal até o instante (T_3) quando a contagem passa para 100. A próxima transição do *clock* de entrada passaria a contagem para 101, porém, como esse contador é módulo 5, a máxima contagem é 4 (100), logo o número 101 não pode aparecer e o contador deve ser zerado.

O recurso empregado no circuito da Figura 110 é colocar as saídas (A) e (C) dos FFs, que, no momento da contagem 101, estariam em alto, na entrada de uma porta (NAND), e gerar um nível baixo na sua saída para dar um *reset* nos FFs, zerando a contagem. É importante salientar que existe uma tendência de mudar a contagem para 101, mas isso é muito rápido e o circuito é zerado antes dessa saída aparecer.

4.2.2 Contador assíncrono decrescente

Os circuitos contadores vistos até o momento são todos de contagem crescente, para elaborar um circuito contador decrescente é necessário mudar alguns pontos do circuito digital. Como exemplo para análise, a Figura 111 apresenta um contador decrescente de dois *bits*, também chamado de contador decrescente módulo 4.

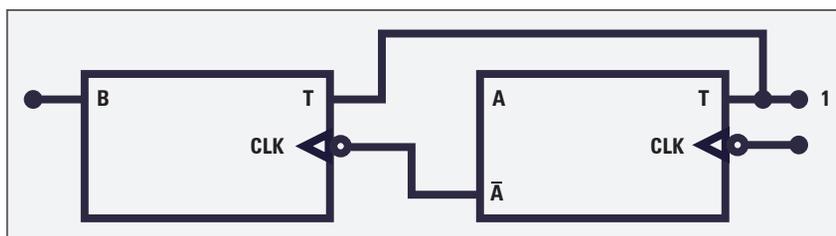


Figura 111 - Contador decrescente de dois *bits*

A mudança do contador crescente para o decrescente tipo (T) está na retirada do *clock*, utilizado do primeiro para o segundo FF, da saída barrada (\bar{A}). Com isso, é possível conseguir o efeito de decontagem.

O mapa de pulsos a seguir possibilita a observação da decontagem realizada pelo circuito da Figura 112. Para a montagem do número, a saída (B) é o *bit* mais significativo, sendo a saída (A) o menos significativo.

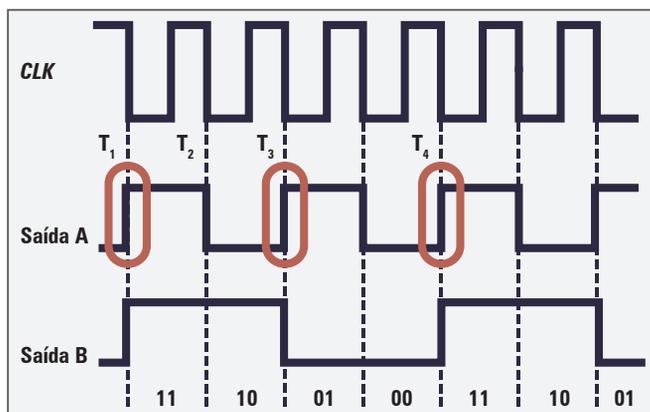


Figura 112 - Mapa de pulsos de saída do contador decrescente assíncrono módulo 4

Para a análise serão considerados o contador partindo de 11 e as saídas (A) e (B) em nível alto. No instante (T_1), a primeira transição negativa do *clock* faz a saída (A) mudar de baixo para alto e, como a saída (\bar{A}) passa de alto para baixo e está servindo de *clock* para o *flip-flop* (B), a saída (B) muda também de baixo para alto, no instante (T_1), a contagem passa de 00 para 11.

No instante (T_2), a saída (A) passa para baixo, pois o *clock* de entrada passa por uma transição negativa. A saída (B) não muda seu estado, porque seu *clock*, a saída (\bar{A}), passou de baixo para alto, não caracterizando transição negativa válida para o FF, mas, sim, uma transição positiva.

A saída (B) volta a mudar de estado no instante (T_3), pois a saída (\bar{A}) gera uma transição negativa para o *flip-flop* (B), que muda a saída de 1 para 0. A contagem decrescente pode ser observada na parte inferior do mapa de pulsos, indo de 11 no instante (T_1) até 00. O ciclo recomeça no instante (T_4), quando as saídas serão levadas para o valor 11 novamente.

Os contadores crescentes e decrescentes são incorporados aos circuitos integrados e, dessa maneira, é possível obter contadores com grandes quantidades de *bits*. As necessidades de projeto e a disponibilidade no mercado determinam qual tipo de contador usar, pois, como é possível mudar o módulo dos contadores utilizando portas lógicas auxiliares, basta alterar as características de contagem do CI.

4.2.3 Contador síncrono crescente

Os contadores apresentados anteriormente são assíncronos, ou seja, seus circuitos necessitam de um *clock* que não é comum, normalmente a saída de um *flip-flop* é usada como *clock* para o seguinte.

Nos contadores síncronos, o *clock* é comum a todos os *flip-flops* da montagem, quando é dado um sinal do *clock*, ele é simultâneo a todos os FFs, porém a mudança das suas saídas dependerá da construção do contador.

No circuito a seguir, é apresentado o contador síncrono crescente de três *bits* utilizando FF do tipo (T).

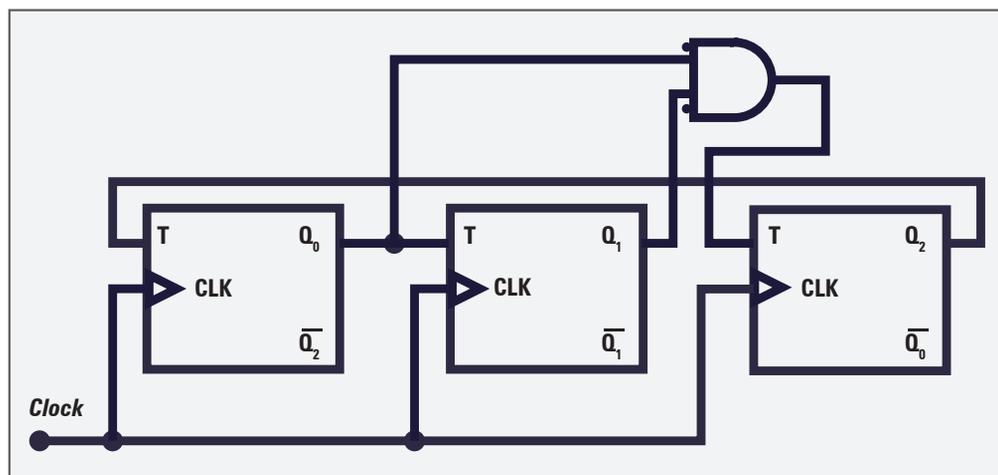


Figura 113 - Contador síncrono crescente de três bits

Para analisar o funcionamento do circuito contador síncrono de três *bits* da Figura 113, é relevante acompanhar o mapa de pulsos e a tabela-verdade do circuito na Tabela 62 e na Figura 114.

Tabela 62 - Tabela da sequência de contagem do contador síncrono de três *bits*

Q_2	Q_1	Q_0	Pulso de <i>clock</i>
0	0	0	Inicial
0	0	1	1
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	4
1	0	1	5
1	1	0	6
1	1	1	7
0	0	0	8

Fonte: Elaboração dos autores.

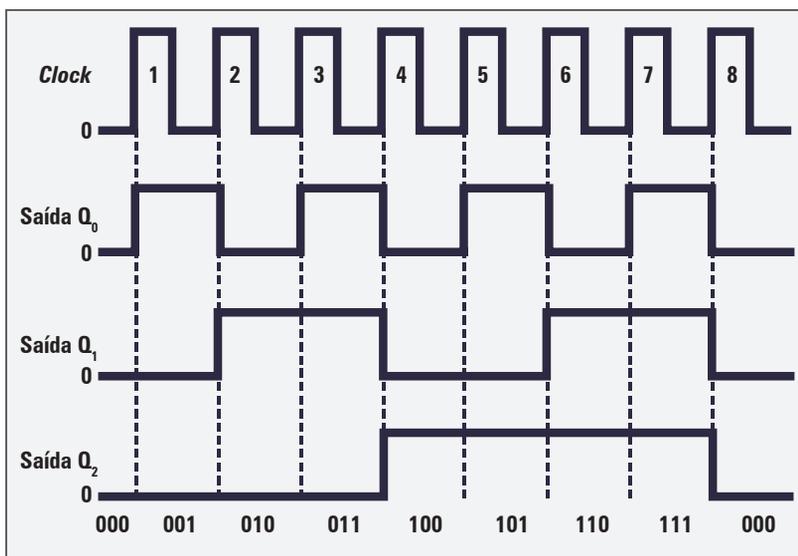


Figura 114 - Mapa de pulsos do contador síncrono de três *bits*

O contador possui como condição inicial de contagem o número 000. A saída (Q_0) muda de estado a cada transição positiva de *clock*. No *clock* 1, ele passa de baixo para alto e no *clock* 2 passa para baixo novamente. A saída (Q_1) muda de estado no *clock* 2, pois, nesse momento, ocorre um *clock* adequado para a mudança da sua saída de 0 para 1, vai mudar esse estado novamente no *clock* 4, quando a sua saída volta para nível baixo.

A saída (Q_2) muda sua saída no *clock* 4 passando de baixo para alto e mudará novamente no *clock* 8, quando sua saída volta para 0. É no oitavo pulso de *clock* que o contador volta para a situação inicial de contagem 000, recomeçando o ciclo novamente.

O contador da Figura 114 possui oito códigos diferentes de contagem antes de o ciclo recomeçar, assim ele é chamado de contador módulo 8. Para mudar o módulo de contagem desse circuito, é necessário alterar o arranjo de ligação da porta (AND) e dos *flip-flops* presentes na montagem. É importante observar que a máxima contagem desse circuito é 111, pois possui apenas três *bits*; a fim de obter uma contagem maior, é necessário aumentar o número de *bits* do circuito, para isso, basta acrescentar o número de FFs da montagem.

4.2.4 Registrador de deslocamento – contador em anel

O registrador de deslocamento, também conhecido como *shift register*, é um contador com registrador de deslocamento circular, sendo a saída do último FF da montagem realimentada para a entrada do primeiro FF. O registrador de deslocamento é, ainda, chamado de contador em



Shift register: tipo de registrador digital que desloca o *bit* de um *flip-flop* para outro, transferindo o dado de entrada para a sua saída.

anel, em razão da realimentação da saída para a entrada. A Figura 115 apresenta o circuito de um contador de deslocamento de três bits usando *flip-flop* tipo (D) na construção, a montagem desse circuito também pode ser feita com *flip-flop* tipo (JK).

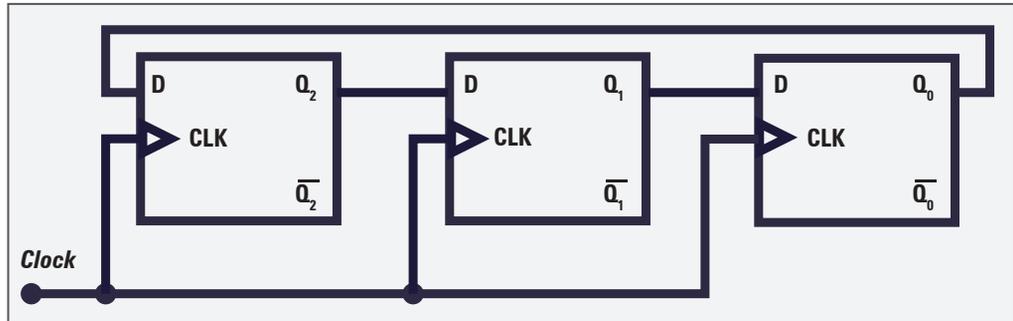


Figura 115 - Registrador de deslocamento de três bits

No contador com registrador de deslocamento normalmente existe apenas um único bit 1 que está circulando pelos registradores, pois a saída do último registrador é realimentada para entrada novamente. O mapa de pulsos (Figura 115) mostra os estados lógicos do circuito da Figura 115 e a Tabela 63 apresenta a contagem realizada pelo circuito.

Tabela 63 - Tabela da sequência de contagem do registrador de deslocamento de três bits

Q_2	Q_1	Q_0	Pulso de clock
1	0	0	Inicial
0	1	0	1
0	0	1	2
1	0	0	3
0	1	0	4
0	0	1	5

Fonte: Elaboração dos autores.

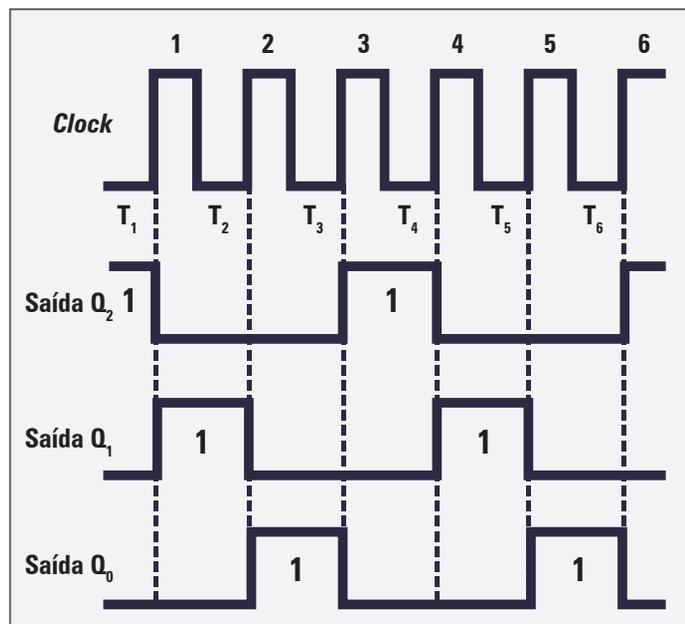


Figura 115 - Mapa de pulsos de um registrador de deslocamento de três bits

Ao analisar o mapa de pulsos da Tabela 63, observa-se que só existe um bit 1 circulando pelo registrador. Com o objetivo de entender como funciona o registrador, é necessário considerar a condição inicial do mapa de pulsos em que ($Q_2=1$), ($Q_1=0$) e ($Q_0=0$). No instante (T_1), o bit 1 do registrador (Q_2) passa para a saída do registrador (Q_1). No instante (T_2), o bit 1 passa de (Q_1) para a saída do (Q_0). No próximo clock válido, transição positiva, a saída de (Q_0) que está ligada (realimentada) na entrada de (Q_2), transfere para a saída deste o bit 1, voltando ao estado inicial de análise. No instante (T_4), o processo recomeça e o bit 1 será novamente deslocado entre os registradores.

O circuito apresentado na Figura 115 é um contador formado por registrador de deslocamento módulo 3, pois a sequência gerada pelo contador possui três estados diferentes antes de repetir a sequência. O registrador analisado, embora a sua contagem não siga a contagem binária normal, é chamado de contador, porque cada número binário gerado possui um único estado lógico para cada *flip-flop*.

O contador em anel do tipo registrador de deslocamento pode ser construído para qualquer módulo de contagem, bastando, para isso, seguir a relação: módulo (N), em que (N) é o número de FF na montagem. Por exemplo, um contador módulo 8 utiliza oito FF na sua montagem. Um contador em anel usa mais FFs na sua montagem do que um contador normal binário, para montar um contador binário módulo 8 são necessários três *flip-flops*.

4.2.5 Registrador de deslocamento – contador Johnson

É possível que o contador em anel básico seja modificado para formar outros tipos de contadores utilizando o registrador de deslocamento. Com vistas à montagem de um contador Johnson, é usado o contador em anel básico com a pequena modificação de retirar a saída do último FF da montagem na saída invertida (\bar{Q}). A Figura 116 exemplifica um contador Johnson de três *bits* com *flip-flop* tipo (D).

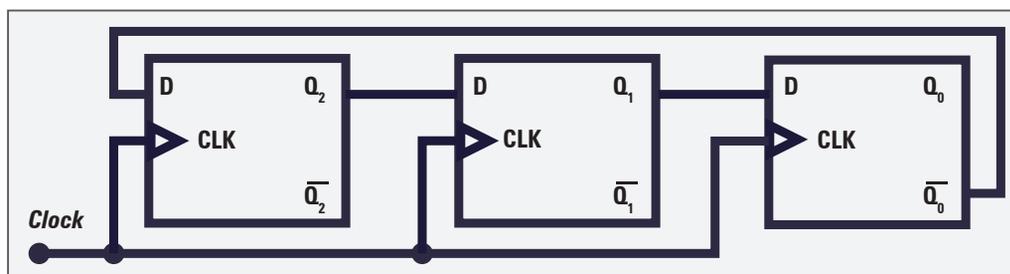


Figura 116 - Contador Johnson de três bits

A diferença entre o circuito da Figura 116 e o da Figura 117 é a retirada da realimentação para o primeiro *flip-flop* feita por meio da saída invertida (\bar{Q}_0). A Tabela 64 mostra o mapa de pulsos e a tabela de contagem do contador Johnson de três bits.

Tabela 64 - Tabela da sequência de contagem do contador Johnson de três bits

Q_2	Q_1	Q_0	Pulso de clock
0	0	0	Inicial
1	0	0	1
1	1	0	2
1	1	1	3
0	1	1	4
0	0	1	5
0	0	0	6

Fonte: Elaboração dos autores.

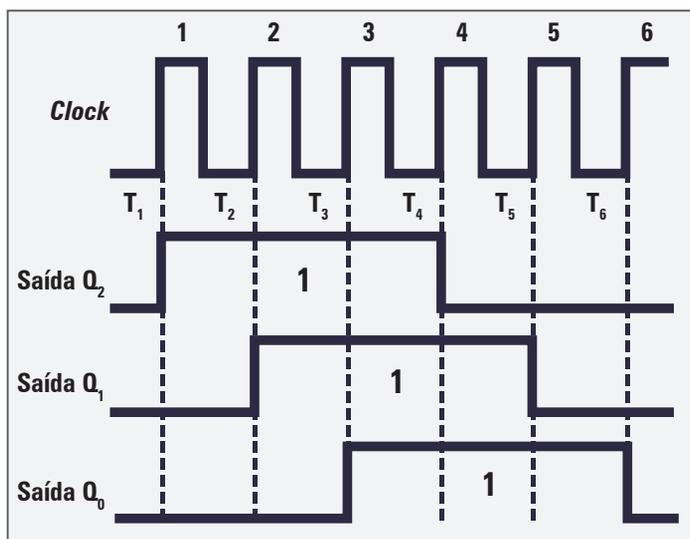


Figura 117 - Mapa de pulsos do contador Johnson de três bits

Com o intuito de analisar a contagem feita pelo circuito, é considerada a situação inicial ($Q_0 = 0$), ($Q_1 = 0$) e ($Q_2 = 0$). No instante (T_1), quando ocorre o primeiro *clock* de transição positiva, a saída (Q_2) muda para nível alto, pois a saída está no nível alto e esse valor é levado para a entrada de (Q_2). No instante (T_2), (Q_1) muda sua saída para alto, porque na entrada está o nível alto da saída de (Q_2).

No instante (T_3), a saída de (Q_0) muda para alto, devido ao nível alto em sua entrada vindo de (Q_1). No instante (T_4), a saída ($\bar{Q}_0 = 1$) e ($\bar{Q}_0 = 0$), com isso, a entrada de (Q_2) possui 0 e o *clock* passa sua saída para baixo. No instante (T_5), a saída de (Q_1) muda para baixo. No (T_6), a saída de (Q_0) muda para nível baixo, nesse instante, a contagem volta para o ponto de início 000, recomeçando o processo de contagem novamente.

O contador Johnson possui seis estados distintos dos FFs antes de repetir a contagem, assim esse contador é módulo 6. Embora o contador Johnson não conte de modo binário, é considerado um contador, porque os estados da contagem não se repetem. O número de FFs usados na montagem de um contador Johnson será sempre a metade de seu módulo, por exemplo, um contador Johnson módulo 12 usa seis FFs na montagem do circuito.

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que os *flip-flops* são circuitos digitais biestáveis, pois possuem dois estados lógicos estáveis, que dependem dos estados lógicos de suas entradas. O *flip-flop* também pode ser chamado de *latch* em virtude de suas características de armazenamento temporário de dados.

Os circuitos digitais de contadores síncronos e assíncronos diferem-se com relação à aplicação do *clock*, nos síncronos o sinal de *clock* é comum a todos os elementos básicos do circuito e nos assíncronos o *clock* depende da saída de estágios anteriores. O módulo de contagem ou decontagem depende da quantidade de números binários diferentes gerados pelo circuito.

Os registradores são chamados também de *shift register*, esses circuitos são contadores com registrador de deslocamento circular. Os registradores implementam vários tipos de contadores, entre eles o Johnson e o em anel.

Capítulo 5

Processamento de sinais digitais

Os equipamentos eletrônicos a bordo de aeronaves modernas têm evoluído muito rapidamente. No conceito moderno de integração de sistemas, esses equipamentos precisam intercomunicar-se. A maneira como fazem isso é por intermédio da troca de dados e, na maior parte das vezes, esses dados devem estar na forma digital para serem transmitidos de um equipamento a outro.

Como os dados a serem trocados entre os equipamentos na sua grande maioria são de origem não digital, por exemplo, a pressão do óleo de um motor, faz-se necessário um processo para converter essas informações analógicas em digitais e vice-versa.

No dia a dia é comum esse tipo de necessidade. Por exemplo: ao se navegar na internet, é possível ver imagens e vídeos na tela do computador, porém esses dados trafegam pela rede mundial de computadores na forma digital. Somente após serem recebidos pelo computador, eles transformam-se novamente em dados analógicos, visto que os olhos humanos só veem essa forma, a analógica.

Assim, a conversão de sinais dentro da eletrônica digital é assunto muito importante, uma vez que, nos dias atuais, é praticamente impossível não haver tal conversão dentro de equipamentos eletrônicos modernos. As conversões analógica-digital e digital-analógica utilizam os conceitos da eletrônica digital vistos anteriormente, assim como novos conceitos de amostragem.

5.1 Conversor analógico-digital

O processo de conversão de um sinal analógico para digital transforma as variações analógicas contínuas em níveis fixos e discretos. A Figura 118 expõe uma onda senoidal e os níveis de tensão amostrados da onda, em que cada nível amostrado será convertido para um valor digital.

Quanto maior o número de níveis de tensão amostrados, mais fiel será a transformação do sinal analógico para o digital. Portanto, quanto mais a escada, que representa os níveis de amostragem de tensão, se aproximar da forma analógica, mais fiel será a conversão.

Cada nível de tensão amostrado que aparece como onda em forma de escada da Figura 118 será convertido para um valor binário. Esse processo é chamado de **quantização** em códigos binários, sendo ele a conversão analógico-digital (A/D). O processo A/D é realizado por um circuito conversor analógico-digital, em inglês, *analogue to digital conversion* (ADC).

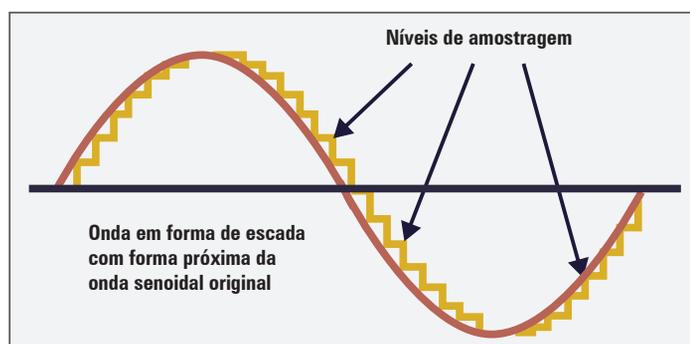


Figura 118 - Onda senoidal e os níveis de amostragem



Quantização: processo responsável por pegar amostras do sinal analógico para transformá-las em códigos digitais.

No processo de conversão analógico-digital, os níveis da escada que representam o sinal analógico amostrado deverão ser convertidos para um valor digital. Porém, entre um degrau e outro da escada, existem valores que não serão convertidos, assim, para a conversão, a quantidade digital deverá ser especificada.

A quantidade digital determina a faixa de valor analógico atribuída a um valor digital. Por exemplo, o sistema pode atribuir o valor binário 010 à faixa de tensão entre 1 e 2 V e o valor binário 011 às tensões entre 3 e 4 V. Quando o A/D identificar o valor de 2,4 V, converte para o valor digital de 011. Assim, fica claro que existem valores analógicos intermediários que não poderão ser codificados, pois existe apenas um código para uma ampla faixa de valores.

A conversão A/D será mais precisa quanto mais *bits* de codificação forem empregados no processo, porque possibilitam diminuir os tamanhos dos degraus de amostragem. Por exemplo: um sistema que possua dois *bits* de codificação terá apenas quatro códigos para representar um sinal analógico, ou seja, a escada possível de conversão poderia ter no máximo quatro valores de tensão analógica, fato que tornará impraticável uma boa conversão A/D.

Para conseguir uma boa conversão A/D, é necessário usar muitos *bits* de codificação, ao contrário do exemplo anterior, em que foram usados dois *bits*. Ao utilizar dez *bits* de codificação, é possível ter: $2^{10}=1024$. Assim, dez *bits* possibilitam uma escada de amostragem com 1.024 degraus, significando que o sinal amostrado pode ser fatiado em 1.024 partes e cada uma possuir um código binário diferente.

A necessidade de precisão do sistema dirá a quantidade requerida de *bits* de codificação, pois sistemas com grandes quantidades de *bits* de amostragem são mais caros e complexos e são usados apenas em situações mais específicas.

A maioria das grandezas físicas é analógica e dentro dos aviões não é diferente. A temperatura, a pressão, a velocidade do vento, por exemplo, são todas grandezas que devem ser monitoradas e possuem origem analógica. Como esses dados trafegam dentro das aeronaves por meio de fios, eles precisam ser convertidos para sinais elétricos e, posteriormente, digitais. Nos aviões mais antigos, a conversão era apenas para o sinal elétrico, porém, com a evolução desses veículos, os sinais que transitam dentro deles são convertidos para digital também.

Em resumo, na maioria dos sistemas, a estrutura básica de um sistema que executa os processos de conversão analógico-digital, em inglês, *analogue to digital conversion* (ADC), e, posteriormente, digital-analógico, em inglês, *digital to analogue conversion* (DAC), pode ser observado a seguir. Na Figura 119, é utilizada como exemplo a monitoração da temperatura interna do avião.

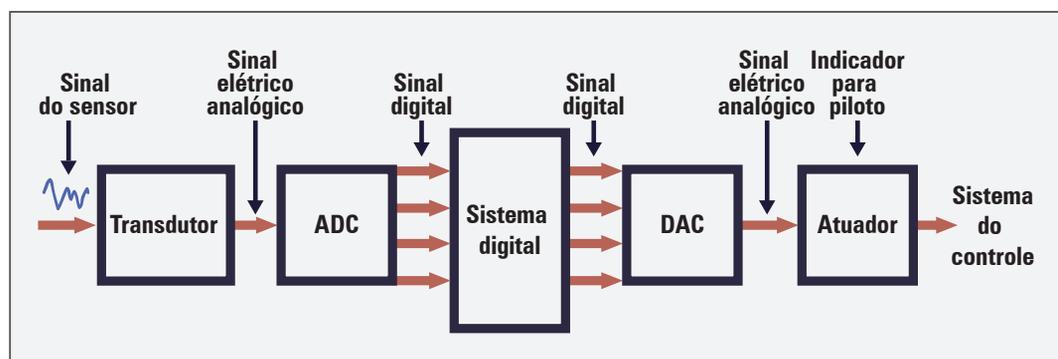


Figura 119 - Sistema de conversão A/D e D/A para indicador de temperatura



O exemplo para análise do sistema da Figura 119 é um sensor de temperatura usado em aeronaves. O sensor de temperatura instalado no avião, independentemente do tipo e do local de instalação, é formado por um transdutor.

O transdutor é elemento essencial de conversão da grandeza física para um sinal elétrico proporcional. Exemplos de transdutores são **fotocélulas**, **fotodiodos**, **termistores** e tacômetros. Dessa maneira, o transdutor é do tipo termistor, o qual vai converter a temperatura interna do avião em um sinal de tensão ou corrente elétrica variável. É possível que a variação causada pelo termistor no circuito que compõe o transdutor seja, por exemplo, uma variação de 20 a 100 mV de tensão para uma variação de 20 a 100 °C. Assim, ocorre que, para cada grau de variação de temperatura, acontece uma variação de 1 mV de tensão de saída.

É importante destacar que esse é apenas um exemplo, existem inúmeros tipos de transdutores de temperatura, cada qual com as suas particularidades, cabendo aos fabricantes escolherem qual a melhor solução para o desenvolvimento de seu projeto.

Após passar pelo transdutor, o sinal variável elétrico analógico é enviado ao conversor ADC, o qual converte a sua entrada em sinal digital. Para isso, é necessário converter os níveis de tensão ou corrente em códigos binários. Para o exemplo dado anteriormente, a tensão de 30 mV de saída do transdutor pode ser codificada para 0011110 binário. O sistema do exemplo da Figura 119 necessita de sete *bits* para conversão, pois, como a variação de temperatura de 20 a 100 °C gera 80 níveis de sinais analógicos diferentes, são requeridos sete *bits* para possibilitar os 80 códigos digitais.

O sistema digital representado na Figura 119 é o equipamento que recebe os dados digitais relativos à medida de temperatura e processa esses dados. O sistema digital é um computador ou outro equipamento especializado para o sistema, que, por meio de seu *software* e *hardware*, trabalha os dados recebidos, direcionando-os, posteriormente, para outros equipamentos.

No sistema digital estará incorporado o circuito chamado processador de sinais digitais, em inglês, *digital signal processor* (DSP), o qual é um circuito de processamento especializado para trabalhar com dados numéricos em tempo real, pois o sinal analógico monitorado varia constantemente e exige um monitoramento contínuo.

O DSP realiza muitas operações diferentes. A depender do sistema em que está inserido, possui as funções de retirada de interferências do sinal, codificação do sinal para uma transmissão mais segura, melhoria da qualidade do sinal convertido pelo A/D, criptografia de áudio da conversação telefônica e adequação do sinal para ser transmitido internamente entre os diversos sistemas que compõem o avião, interligados pelos **barramentos** de dados.

O dado gerado pelo sistema digital é levado a um conversor DAC antes de ser apresentado para o usuário, pois os dados digitais referentes à variável monitorada não são acessados diretamente, em razão de estarem codificados digitalmente. No exemplo supracitado, em que o valor de 30 mV foi convertido para 0011110, este valor binário terá de voltar a ser 30 mV, função exercida pelo conversor DAC.

A saída do DAC vai para um indicador que processa esse valor e apresenta de maneira legível para o piloto por meio de uma tela de computador ou outra tela mais específica para o sistema. Nos aviões mais modernos, é comum a utilização de telas digitais para visualização de todo

Fotocélula: sensor que varia suas características físicas em função da intensidade da luz que incide sobre ele.

Fotodiodo: diodo de silício sensível à luz, cuja corrente de fuga é alterada de acordo com a intensidade luminosa incidente; componente polarizado inversamente para poder funcionar como fotodiodo, se polarizado diretamente, não funciona como fotossensor.

Termistor: tipo de resistor que possui sua resistência variável em função da temperatura.

Barramento: também chamado de *bus*; conjunto de todas as vias por onde passam os dados (*bits*) trocados entre sistemas eletrônicos, cada via do barramento passa apenas um *bit* por vez.

e qualquer dado da aeronave. Tais telas são compostas de diodos emissores de luz, em inglês, *light emitting diode* (LED). Além dos LEDs, são usadas telas de *display* de cristal líquido, em inglês, *liquid crystal display* (LCD).

5.1.1 Fases de conversão analógica-digital

É possível que o atuador do sistema apresentado na Figura 119 seja um equipamento que faz o controle da temperatura. Por exemplo: se a temperatura interna do avião precisa ficar constante em 21 °C, o atuador controlará o sistema a fim de diminuir ou aumentar a temperatura e mantê-la no valor determinado.

O processo de conversão de um sinal analógico para digital começa com a amostragem do sinal. Esta é responsável pela aquisição de valores que representam a forma de onda do sinal a ser convertido, quanto maior o número de amostragens, mais precisão na conversão será obtida. As amostras coletadas pela amostragem são amplitudes do sinal a ser convertido, coletadas em um instante no tempo. A Figura 120 expõe o processo de amostragem.

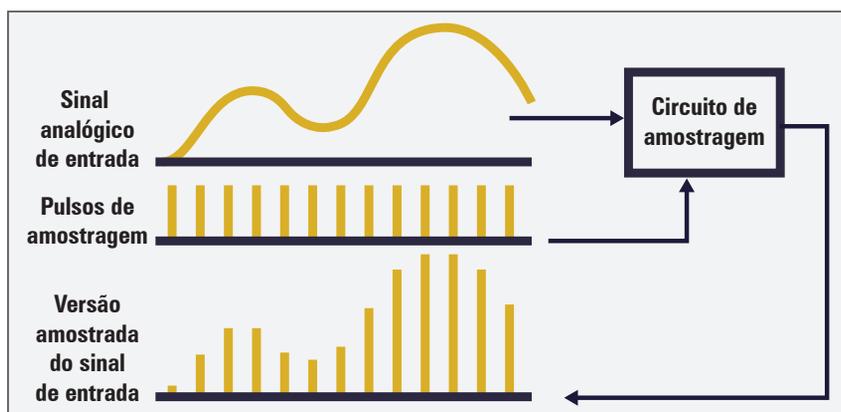


Figura 120 - Processo de quantização do sinal analógico

A Figura 120 mostra, ainda, como é feito o processo de conversão analógico-digital. O sinal a ser amostrado entra no circuito de conversão, o qual realiza a amostragem. Existe uma frequência para gerar os pulsos de amostragem responsáveis por fatiar o sinal analógico no instante da geração do pulso. Ainda na Figura 120, é possível observar que, para cada pulso de amostragem, é gerada uma amostra do sinal naquele instante.

A versão amostrada do sinal é evidenciada na parte inferior da figura. Para cada pulso de amostragem o sinal amostrado terá uma amplitude diferente, pois é um sinal variável no tempo. Assim, a versão amostrada do sinal é uma sequência de pulsos de amplitudes diferentes que, quando recompostos, formam a onda original.

Ademais, é possível observar na figura que, quanto mais pulsos de amostragem houver, melhor será a reprodução do sinal amostrado, pois mais pontos de reconstrução da onda permite uma melhor reprodução do sinal. Contudo, quanto mais pulsos de amostra de sinal, mais códigos binários são necessários ao sistema, desse modo, existe um padrão para a frequência dos pulsos usados na amostragem de um sinal analógico qualquer.

A frequência dos pulsos de amostragem, chamada apenas de frequência de amostragem, é o dobro da maior frequência do sinal analógico a ser amostrado: $F_{\text{amostragem}} \geq F_{\text{sinal analógico MAX}}$



A frequência de amostragem é mais conhecida como *frequência de Nyquist*, a qual determina a necessidade da frequência de amostragem ($F_{\text{amostragem}}$) ser o dobro da maior frequência presente no sinal analógico ($F_{\text{sinal analógico MAX}}$) a ser convertido para digital.

Um exemplo prático é a conversão da voz humana para digital. A primeira contém frequências próximas de 10 kHz, com isso, seria exigido pela frequência de *Nyquist* 20 kHz de frequência de amostragem. No entanto, na prática, é sabido que, para haver inteligibilidade adequada da voz humana, bastam frequências até 4 kHz presentes. Dessa maneira, bastaria uma frequência de amostragem máxima de 8 kHz.

Após a geração do sinal amostrado, composto de vários picos de tensão diferentes que representam a onda original, as amostras mantêm seu valor constante até a próxima amostra do sinal ser realizada. Para executar essa função, existe uma parte do circuito chamado de *retenção*. É na retenção que o valor da amostra mantém-se constante até a próxima amostra.

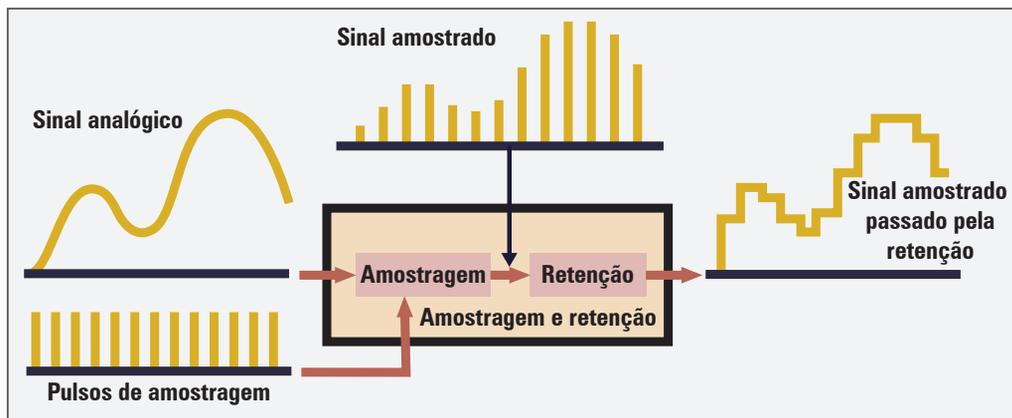


Figura 121 - Processo de retenção das amostras do sinal

A Figura 121 mostra que, após o processo de amostragem, os picos de sinal representantes da onda original são transformados na onda de saída, a qual se parece com uma onda em forma de escada. Esta última onda agora está pronta para o processo final de digitalização. Então, seus níveis serão convertidos para uma série de códigos binários. Como cada nível (degrau) da onda é constante, o circuito converte esse valor para um código binário equivalente.

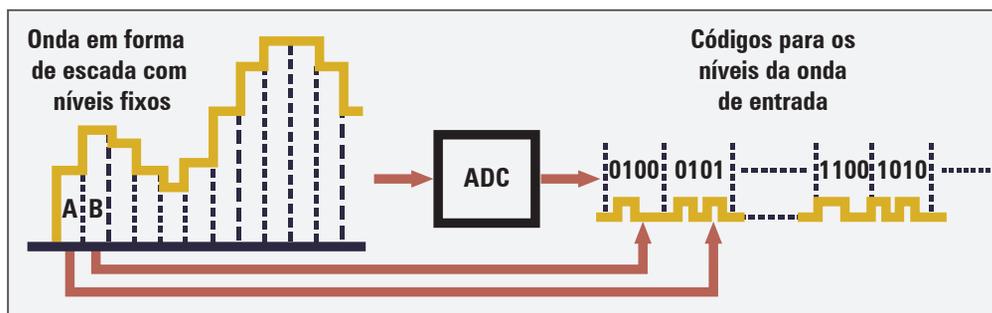


Figura 122 - Conversão da onda em forma de escada para códigos digitais

A Figura 122 mostra que, para cada nível de tensão que forma a onda de entrada, existe um código binário diferente, pois o conversor analógico-digital é responsável por essa função. A forma de onda de entrada do conversor A/D tem vários níveis diferentes e, quanto mais níveis possuir, maior será a quantidade de *bits* para representar a onda.

Frequência de Nyquist: frequência de amostragem mínima necessária à devida conversão de um sinal analógico para digital.

Retenção: circuito digital necessário no processo de conversão analógico-digital cuja função é manter o valor amostrado do sinal analógico constante até a próxima amostragem.

Para a recomposição posterior da onda original, é fato que, quanto mais *bits* e níveis de quantização forem usados no processo de conversão A/D, mais fiel será a onda amostrada da original. A Figura 123 exibe um processo de quantização de quatro níveis e a codificação desse sinal.

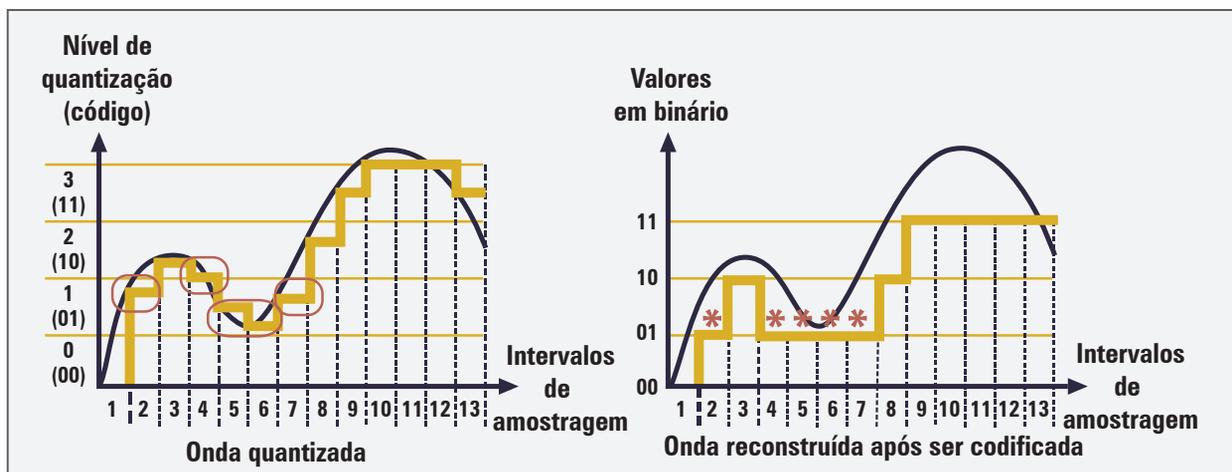


Figura 123 - Conversão A/D utilizando quatro níveis de quantização

Na Figura 123, a onda da esquerda é o resultado da quantização do sinal analógico. No exemplo, são utilizados quatro níveis de quantização, observado no eixo vertical da onda quantizada. Embora existam níveis variados de quantização dentro de cada intervalo de quantização, só existe um código para cada nível.

Os destaques na onda da esquerda da Figura 123 mostram níveis de quantização da onda analógica que estão todos dentro do mesmo intervalo de quantização (01) do gráfico. O resultado disso é que todas as amostras quantizadas (2, 4, 5, 6 e 7 no gráfico) recebem o mesmo código (01). Na onda da direita, nota-se, em destaque (*), que as amostras 2, 4, 5, 6 e 7 ficaram todas com o mesmo valor binário (01), não havendo diferença entre elas.

A onda reconstruída, após ser codificada, fica muito longe da forma original, pois, no exemplo da Figura 123, são usados poucos níveis de quantização. Na Figura 124, é aumentado o número de níveis de quantização para quatro *bits*, ela mostra a onda quantizada e reconstruída.

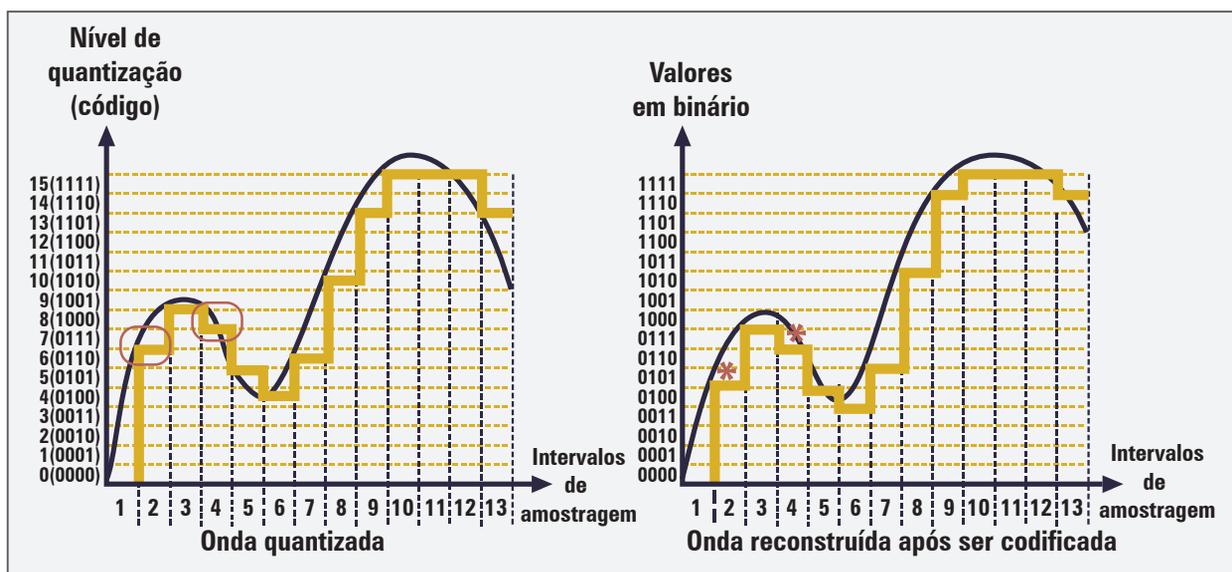


Figura 124 - Conversão A/D utilizando 16 níveis de quantização

Com quatro níveis de quantização são possíveis 16 níveis de amostragem, melhorando, assim, a amostragem do sinal. Na onda quantizada da esquerda, o destaque em vermelho mostra que, em comparação ao exemplo da Figura 124, agora as amostras 2 e 4 são quantizadas e possuem códigos diferentes.

O resultado é observado no gráfico da direita da Figura 124, o destaque (*) das amostras 2 e 4 demonstram códigos binários diferentes para elas, aproximando a onda reconstruída da onda analógica original.

5.1.2 Circuito conversor analógico-digital

Existem diversos tipos de circuitos digitais para conversão de um sinal analógico para digital, porém o amplificador operacional (*amp-op*) é utilizado na maioria dessas montagens.

Os *amp-op* são circuitos lineares que possuem uma entrada inversora e outra não é uma saída. Teoricamente, tem ganho infinito trabalhando em malha aberta, mas, na prática, esse ganho não é infinito, e sim muito grande. A impedância de entrada do *amp-op* é muito alta também e possui baixa impedância de saída, características muito boas para circuitos eletrônicos.

Nas Figuras 125.A, B e C, são evidenciados o símbolo do *amp-op*, o *amp-op* configurado para trabalhar como amplificador inversor e o *amp-op* trabalhando como comparador de tensão, respectivamente.

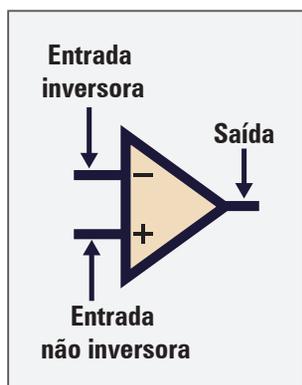


Figura 125.A - Símbolo do *amp-op*

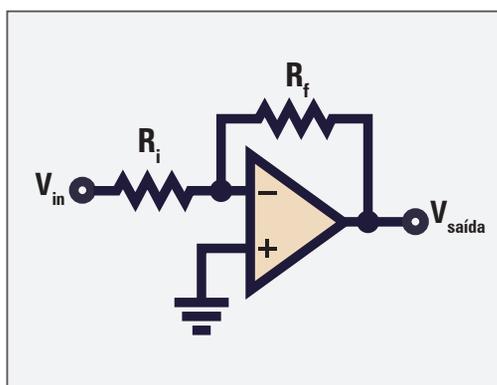


Figura 125.B - *Amp-op* como amplificador inversor

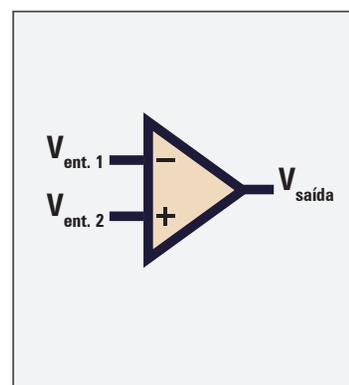


Figura 125.C - *Amp-op* funcionando como comparador de tensão

Na Figura 125.A, é mostrado o símbolo eletrônico para o amplificador operacional, com sua entrada inversora e não inversora e a saída. O *amp-op* funcionando como amplificador inversor é apresentado na Figura 125.B. Quando o *amp-op* está funcionando nessa configuração, a relação entre os resistores (R_f) e (R_i) determina o ganho (G) do circuito: $G = \frac{R_f}{R_i}$.

A configuração amplificador-inversor é muito empregada nos circuitos conversores A/D. Na Figura 125.C, é apresentado o *amp-op* funcionando como comparador, outra configuração muito utilizada em circuitos de conversão A/D.

Um circuito usado para a conversão A/D é chamado de conversor analógico-digital *flash*. Esse tipo de conversor é formado por um conjunto de comparadores de tensão que fornecem uma saída em nível alto quando a tensão de entrada for maior que a sua referência.

A Figura 126 mostra um conversor A/D tipo *flash* de três *bits*, usando para isso sete comparadores de tensão. São necessários para esse circuito $2^N - 1$ comparadores na sua montagem, em que (N) é o número de *bits* necessários ao sistema. Na Figura 126, três *bits* $2^3 - 1 = 7$.

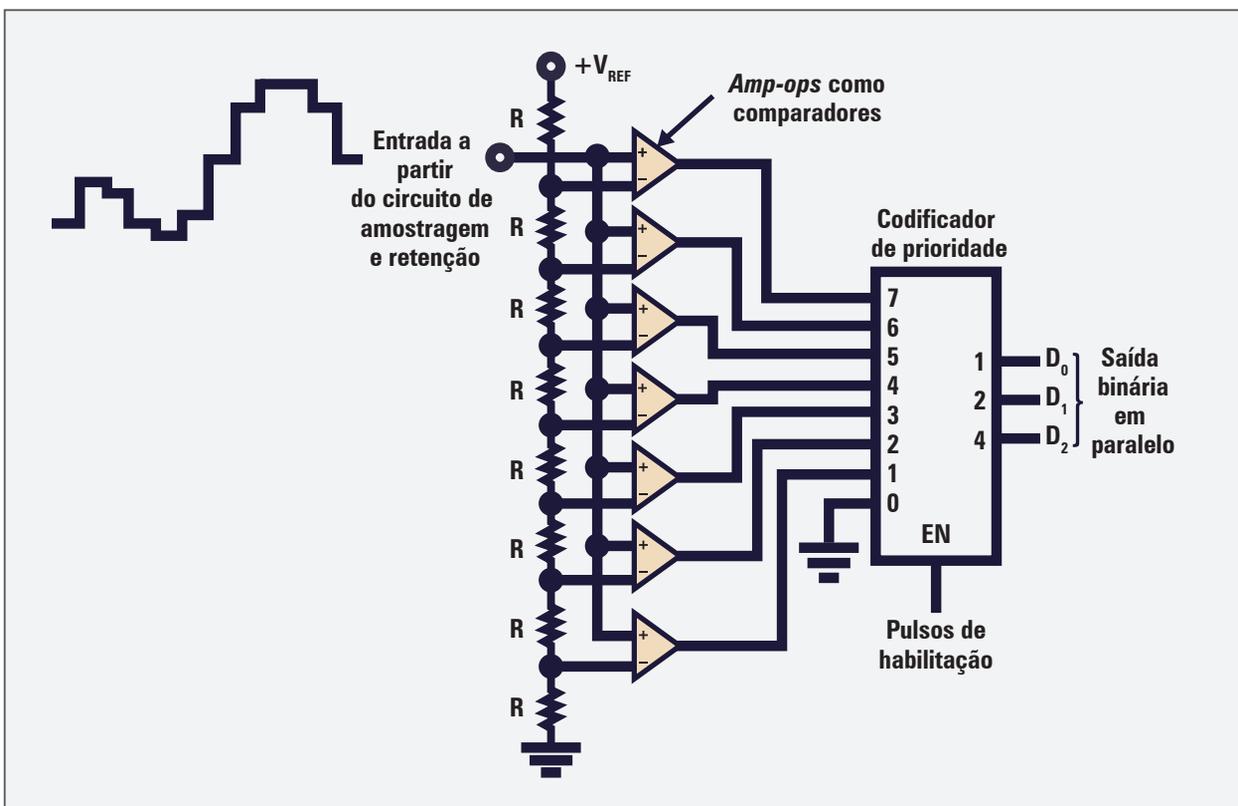


Figura 126 - Circuito conversor A/D tipo *flash*

Na Figura 126, cada *amp-op* tem um valor de tensão de referência fornecido pelo conjunto de resistores. O sinal em forma de escada vindo do retentor é levado à entrada dos comparadores. Quando um dos valores dos degraus da escada supera o valor de referência de um dos *amp-ops* da associação, o CI codificador de prioridade recebe um nível alto e, assim, procede à conversão para um código binário de três *bits* equivalente. O pino *enable* (EN), presente no CI, habilita ou não ele para o funcionamento.

Uma das desvantagens desse circuito é o número de comparadores de *amp-op* necessários à montagem, porque quanto maior o número de *bits* exigido, maior é a quantidade de *amp-op* no circuito, por exemplo, um conversor de cinco *bits* exige 31 comparadores de *amp-op*.

Um método mais utilizado do que o A/D *flash* é o conversor A/D de aproximação sucessiva. A Figura 127 mostra o diagrama-bloco básico para esse circuito.

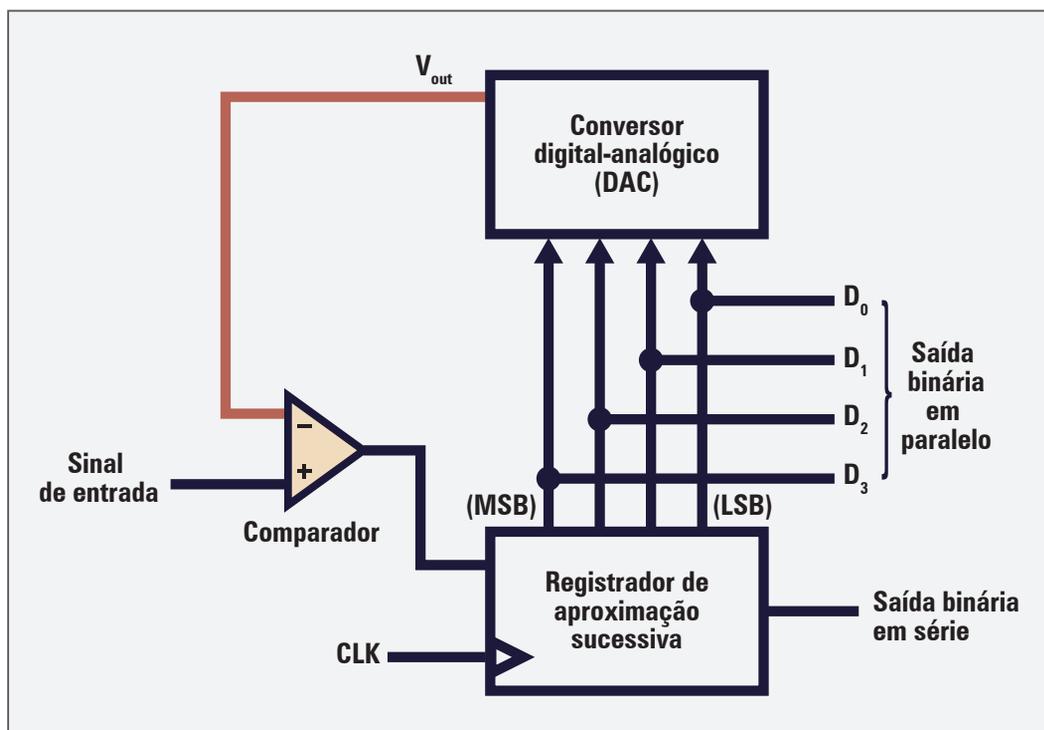


Figura 127 - Circuito conversor A/D tipo aproximação sucessiva

O conversor da Figura 127 é formado por um comparador, um conversor A/D e um registrador de aproximação sucessiva (RAS). O funcionamento começa com as saídas do registrador sendo mudadas para nível alto uma por uma, começando da saída do *bit* mais significativo (MSB) e vai até o menos significativo *bit* (LSB).

Para cada código gerado na saída do registrador, o DAC o converte para um sinal de tensão de saída (V_{out}) que é levado para o *amp-op* comparador. Caso a tensão V_{out} seja maior que o sinal de entrada, a saída do comparador será nível baixo e a saída do RAS, que havia sido levada para nível alto, passa para zero (*reset*). Esse processo continua até que a saída V_{out} seja menor que a entrada, assim, a saída do registrador que foi levada para alto permanece e outra saída é mudada para 1.

O processo continua até que o código de saída do registrador seja uma aproximação para o valor do sinal de entrada. Nas Figuras 128.A, B, C e D, detalha-se um exemplo de conversão para facilitar a compreensão do funcionamento do conversor de aproximação sucessiva.

Antes de analisar o funcionamento, é importante indicar os valores de tensão para as saídas do RAS. A tensão V_{ref} para 2^3 é +8 V, que, nesse caso, é o MSB, V_{ref} é +4 V para o *bit* 2^2 , V_{ref} para o *bit* 2^1 é +2 V e V_{ref} é +1 V para o *bit* 2^0 , sendo este último o LSB.

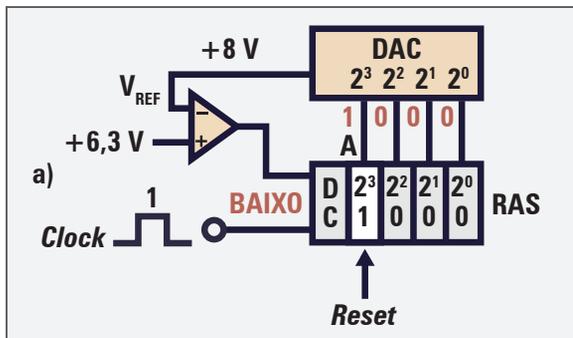


Figura 128.A - Processo de conversão do circuito de aproximação sucessiva - 1º passo

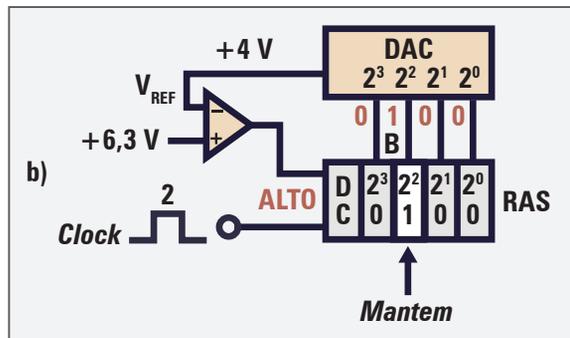


Figura 128.B - Processo de conversão do circuito de aproximação sucessiva - 2º passo

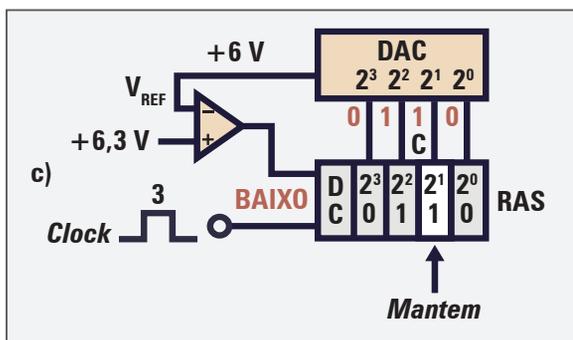


Figura 128.C - Processo de conversão do circuito de aproximação sucessiva - 3º passo

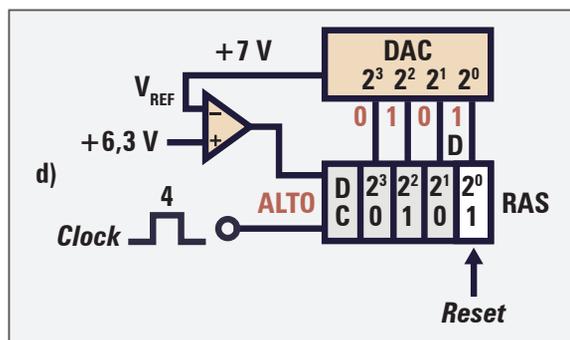


Figura 128.D - Processo de conversão do circuito de aproximação sucessiva - 4º passo

Para o exemplo das Figuras 128, a tensão de entrada do conversor é +6,3 V. Na Figura 128.A, o *bit* MSB 2^3 é levado para nível alto, gerando uma V_{ref} de +8 V. Como esse valor é maior que a entrada, o RAS dá *reset* nesse *bit* e passa para o outro passo.

Na Figura 128.B, o *bit* 2^2 é levado para nível alto, gerando uma V_{ref} de +4 V, como esse valor é menor que a tensão de entrada, esse *bit* é mantido em alto, e o RAS segue o ciclo. Na Figura 128.C, o *bit* 2^1 é levado para o nível alto, produzindo, assim, uma V_{ref} de +2 V mais a tensão do *bit* anterior, ou seja, nesse momento o V_{ref} é +6 V. Esse valor é menor que a tensão de entrada, então o RAS mantém o *bit* 2^1 em nível alto e passa para o último passo do ciclo de medida do sinal.

Na Figura 128.D, o *bit* 2^0 é levado para 1 e assim gera a tensão V_{ref} de +1 V mais o +6 V que estava mantido de V_{ref} e, assim, V_{ref} passa para +7 V. Como esse valor é maior que a entrada, o RAS dá *reset* no *bit* 2^0 . Nesse ponto, o processo de conversão termina e o código binário obtido para a tensão de +6,3 V é 0110. Para cada passo do processo, um pulso de *clock* é utilizado, dessa forma, para todo o ciclo, foram usados quatro pulsos de *clock*.

O número binário obtido na conversão é uma boa aproximação da entrada. No entanto, para haver mais precisão, são necessários mais *bits* de conversão. Após o término do ciclo, ele é recommençado com um novo pulso de *clock*. E para que o sinal se mantenha convertido na saída, é necessário inibir os pulsos de *clock* do sistema.

5.2 Conversor digital-analógico

O processo de conversão de códigos digitais para um sinal analógico atribui valores de tensão ou corrente para cada valor digital.

Basicamente, um conversor digital-analógico (DAC) pode ser comparado a um bloco que possui as entradas digitais, uma saída e uma tensão de referência (V_{ref}). A Tabela 65 mostra as tensões de saída analógica de um DAC de três *bits* básico. No exemplo, não é importante saber ainda qual é o circuito interno do conversor D/A (Figura 129).

Tabela 65 - Tabela da tensão de saída do conversor D/A com três *bits*

A	B	C	V_{out}
0	0	0	0 V
0	0	1	1 V
0	1	0	2 V
0	1	1	3 V
1	0	0	4 V
1	0	1	5 V
1	1	0	6 V
1	1	1	7 V

Fonte: Elaboração dos autores.

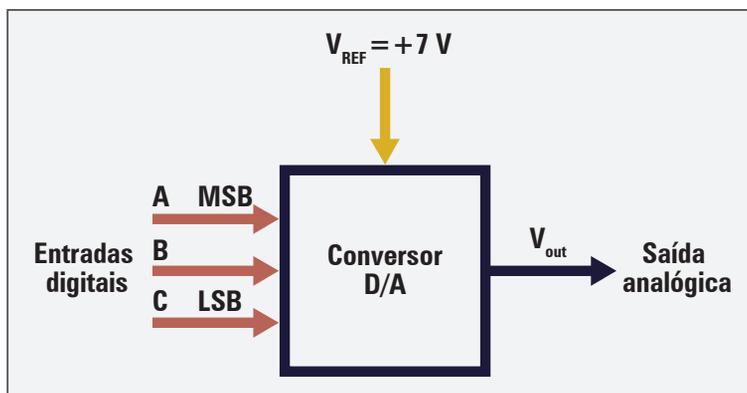


Figura 129 - Conversor D/A de três *bits*

A tensão de referência da Tabela 65 determina a maior tensão de saída do DAC, no caso do exemplo +7 V. A tabela de tensões mostra que, para cada código, existe um valor para a tensão V_{out} , sendo 111 o valor máximo atribuído ao maior código. Com os três *bits* do sistema, é possível obter oito níveis diferentes para V_{out} , assim o sinal de saída varia de 0 V até 7 V.

A Tabela 65 mostra que a menor variação possível para a saída é de 1 V para o LSB, pois o conversor não gera uma V_{out} diferente desse valor para o menor código binário diferente de zero. Esse valor de tensão para o LSB determina o tamanho do degrau, pois representa as variações de saída do sinal.

O bloco conversor D/A da Tabela 65 foi analisado sem explicar qual circuito eletrônico compõe esse bloco. Um exemplo de circuito que faz parte desse bloco está na Figura 130. Nela, está o conversor D/A com *amp-op* com entradas ponderadas em binário.

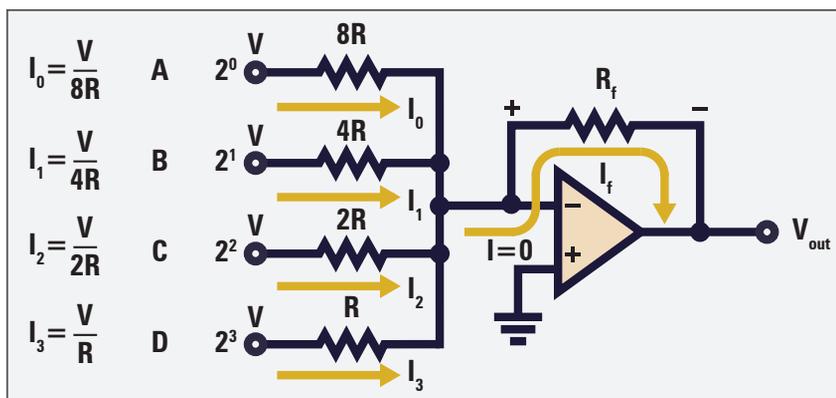


Figura 130 - Conversor D/A de quatro *bits* com entradas ponderadas em binário

O circuito da Figura 130 utiliza um *amp-op* na configuração somador de tensão, assim a saída V_{out} terá um valor de tensão representando a soma dos níveis alto que aparecem no código binário nas entradas (A), (B), (C) e (D).

Os valores dos resistores do circuito da Figura 130 dependem da entrada, pois estas possuem pesos diferentes. A entrada (D) recebe o *bit* MSB, e o *bit* LSB entra em (A). Desse modo, os valores dos resistores variam em função do valor de tensão de saída para cada *bit* que entra no circuito.

O grande problema desse circuito é o valor dos resistores de entrada, porque, aumentando a quantidade de *bits* de conversão, será necessário maior número de valores diferentes de resistores. Por exemplo, para um conversor de dez *bits*, são precisos dez resistores com valores próximos e que possuam grande precisão de valor, pois uma variação grande no valor resistivo do componente compromete o valor de saída, o qual deve ter uma boa precisão para representar o sinal analógico original.

Outro circuito comum empregado para conversão digital-analógica é apresentado na Figura 131. Esse circuito é conhecido como conversor digital-analógico com escada ($R/2R$), em seguida é apresentado um DAC ($R/2R$) de quatro *bits*.

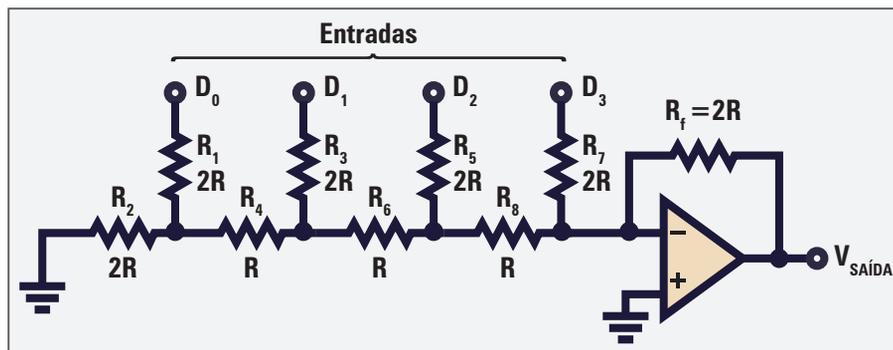


Figura 131 - Conversor D/A de quatro *bits* com escada ($R/2R$)

O DAC com escada ($R/2R$) não possui o problema do circuito DAC de entradas binárias ponderadas, pois usa apenas dois valores diferentes de resistores. No circuito, a entrada (D_0) é o *bit* LSB e o (D_3), o *bit* MSB. Assim como no DAC com entradas ponderadas, o DAC com escada ($R/2R$) soma as entradas com nível alto e exibe uma tensão de saída que representa a onda analógica original.

Considerando que o código binário 1000 entre no circuito da Figura 131, a tensão de saída será determinada de acordo com a Figura 132, que é o mesmo circuito, porém simplificado conforme o código de entrada.

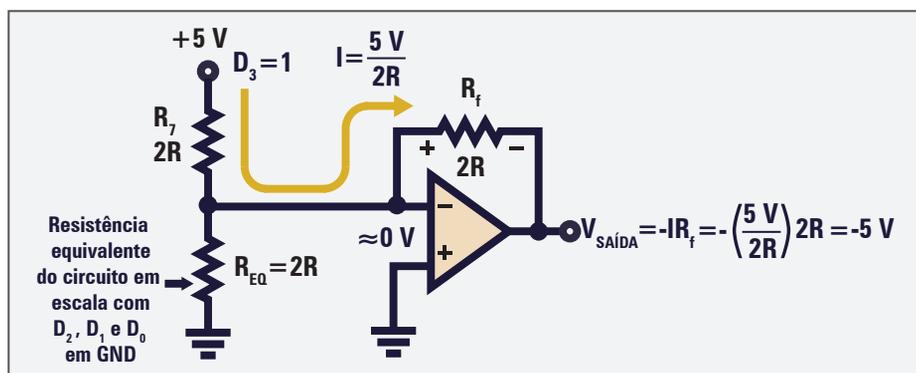


Figura 132 - Simplificação do conversor D/A de quatro *bits* com escada ($R/2R$)

O código binário 1000 é aplicado na entrada do circuito da Figura 132, assim, a entrada (D_3) está alta e as outras – (D_2), (D_1) e (D_0) – estão todas em nível baixo. Com isso, é possível simplificar pelo método de Thévenin a associação de resistores que estão com nível baixo, obtém-se o valor de ($R_{eq} = 2R$), em destaque na Figura 132.

Com a (R_{eq}) é possível determinar a tensão de saída, porque, como a corrente que passa por (R_f) é determinada por $I = \frac{5V}{2R}$ e a queda de tensão em (R_f) é a própria tensão de saída, então $V_{SAÍDA} = -R_f \cdot I = -2R \cdot \left(\frac{5V}{2R}\right) = -5V$. O sinal negativo da tensão de saída é devido à configuração em que o *amp-op* do circuito está montado, pois se trata de um amplificador inversor.

Considerando agora que o código binário 0100 seja aplicado na entrada do circuito da Figura 133, a entrada (D_2) estará alta e as outras – (D_3), (D_1) e (D_0) – todas em nível baixo. Em face disso, é possível simplificar pelo método de Thévenin a associação de resistores que estão com nível baixo, obtém-se o valor de corrente passando em (R_f) de $I_f = \frac{2,5V}{2R}$, a qual está em destaque na Figura 133.

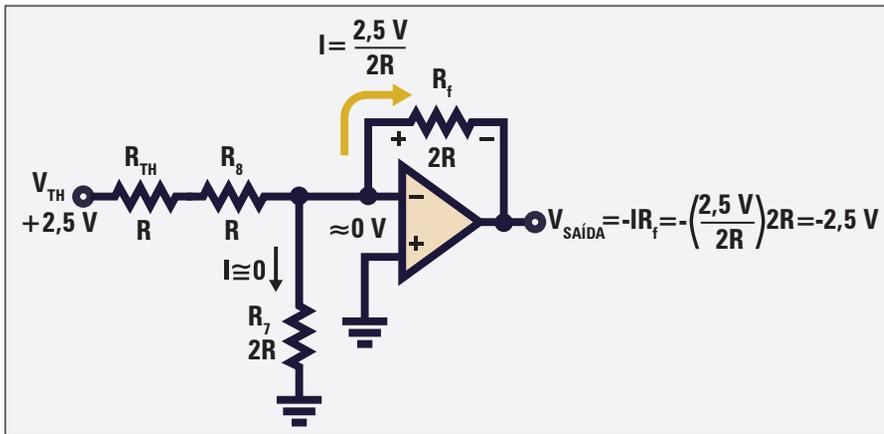


Figura 133 - Simplificação do conversor D/A de quatro bits com escada ($R/2R$)

Com a corrente (I) que passa pelo (R_f) determinada, é possível calcular a tensão de saída, pois, como a corrente segue a equação $I = \frac{2,5V}{2R}$ e a queda de tensão em (R_f) é a própria tensão de saída, então $V_{SAÍDA} = -R_f \cdot I = -2R \cdot \left(\frac{2,5V}{2R}\right) = -2,5V$.

O procedimento para determinar a tensão de saída quando as outras entradas estão no nível alto é o mesmo, mudando apenas o valor da (R_{eq}) do circuito, o que gera uma tensão diferente de saída.

Independentemente do tipo, todos os DACs possuem características comuns. A resolução é uma característica comum e muito importante para o projeto de um DAC e depende do número de degraus ou códigos que entram no conversor. Ela será melhor quanto maior for o número de bits envolvidos no processo de conversão.

A precisão de um DAC é outra característica observada nesses circuitos. A precisão de um sinal é o quanto a saída real está parecida com a saída esperada. Esse parâmetro é expresso em porcentagem, por exemplo, um DAC que possua uma precisão de 0,2% e sua tensão máxima de saída seja 8 V pode ter variação de ± 16 mV, o que representa uma variação muito pequena e aceitável para o DAC.

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que o processamento de sinais digitais é o processo de converter sinais analógicos para digitais e vice-versa, com o intuito de melhorar o sinal ou viabilizar a utilização deste em sistemas digitais, como computadores de bordo de aeronaves.

Para converter um sinal analógico para digital, é preciso amostrar o sinal e, depois, o quantizar, atribuindo um código binário para cada amostra do sinal analógico original. A quantização é feita de acordo com a frequência de *Nyquist*, segundo a qual determina uma frequência de amostragem mínima igual ao dobro da maior frequência a ser amostrada. Quanto maior a quantidade de *bits* envolvida na quantização, melhor será a conversão do sinal analógico para digital e vice-versa.

Os circuitos digitais utilizados como conversores digital-analógico são do tipo escada ($R/2R$) ou entradas ponderadas, sendo aquele primeiro mais empregado nas montagens de conversores D/A, pois só são necessários dois valores para os resistores empregados na montagem do circuito.

Capítulo 6

Armazenamento de informações digitais

Memória é entendida como qualquer dispositivo capaz de armazenar informações, permanente ou temporariamente. São exemplos comuns de memórias: *pen drive*, disco rígido, RAM, ROM, cartões de memória, etc. Cada uma apresenta uma função e aplicação específica, podendo ser classificadas em relação a diversos critérios.

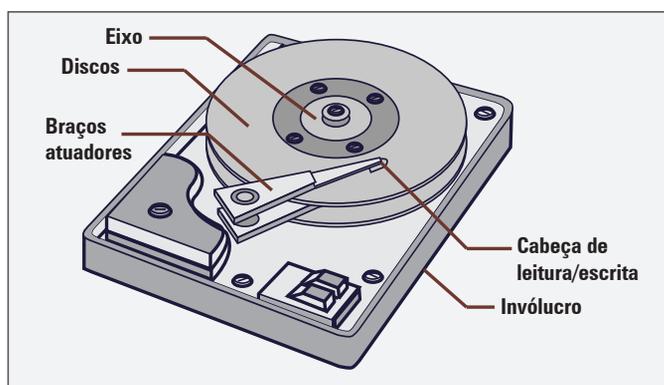


Figura 134 - Exemplo de memória permanente

6.1 Classificação de memórias

As memórias são classificadas quanto aos seguintes critérios: acesso, volatilidade, troca de dados e armazenamento, a seguir.

a) Acesso

As memórias possuem divisões internas que recebem o nome de endereços. Sua capacidade está diretamente ligada ao número de endereços que elas possuem e à quantidade de *bits* que podem ser armazenados neles. Esses *bits* representam um dado qualquer ou um comando de um programa utilizado no computador, recebendo o nome de informação.

O acesso a um endereço com vistas a buscar determinada informação requer um tempo para que esta seja apresentada no local desejado, como, por exemplo, o monitor de um computador. O tempo recebe o nome de tempo de acesso e varia conforme a informação é buscada na memória. Em suma, a busca é feita de duas formas: sequencial ou aleatório.

- Acesso sequencial

Nesse tipo de memória, o acesso a um endereço é realizado de forma sequencial, ou seja, para acessá-lo é necessário passar por todos os endereços anteriores. O tempo de acesso é variável, pois depende de qual localização da memória se encontra a informação a ser buscada. A fita magnética é o exemplo mais comum de acesso sequencial.

- Acesso aleatório

O acesso ao endereço desejado em uma memória aleatória é direto. Isso quer dizer que não há a necessidade de passar pelos endereços anteriores. Por esse motivo, seu tempo de acesso é curto. A memória de acesso aleatório, em inglês, *random access memory* (RAM), por sua rapidez na busca das informações, é amplamente empregada nos equipamentos digitais.

b) Volatilidade

Quando se refere à volatilidade das memórias, elas podem ser voláteis ou não.

- Voláteis

As memórias voláteis perdem as informações quando a alimentação é cortada. O exemplo mais comum de memória volátil é a RAM.

- Não voláteis

Ao contrário das memórias voláteis, elas não perdem as informações armazenadas quando a alimentação é cortada. O exemplo mais comum é a memória de somente leitura, em inglês, *read only memory* (ROM).

c) Troca de dados

Com relação à troca de dados ou de informações das memórias, elas são classificadas como memórias de escrita e leitura ou memórias de somente leitura.

- Memória de escrita e leitura

Nesse tipo de memória são permitidos o acesso e a escrita (gravação) de uma informação em um determinado endereço. As memórias RAM também são de escrita e leitura.

- Memória de somente leitura

Esse tipo de memória permite somente a leitura da informação contida em um determinado endereço. Não é possível alterar o conteúdo desse endereço, somente consultá-lo. As memórias ROM são somente de leitura.

d) Armazenamento

Quanto à forma como as informações são armazenadas na memória, elas se classificam em dinâmicas e estáticas.

- Estática

As informações inseridas nesse tipo de memória são mantidas enquanto houver alimentação.

- Dinâmica

As informações inseridas nessa memória não se mantêm de forma permanente, mesmo havendo alimentação. Tais informações precisam ser reescritas de tempos em tempos, recebendo o nome de *refresh*.



Refresh: recurso responsável por manter o dado na memória.

Evolução das memórias

Assim como qualquer equipamento eletrônico, as memórias passaram por um processo de evolução e aperfeiçoamento até chegar ao ponto que hoje se encontram. As atualizações visaram a atender às necessidades da sociedade diante do rápido crescimento tecnológico. A Figura 135 mostra os tipos de memória ROM desde a sua criação às mais atuais.

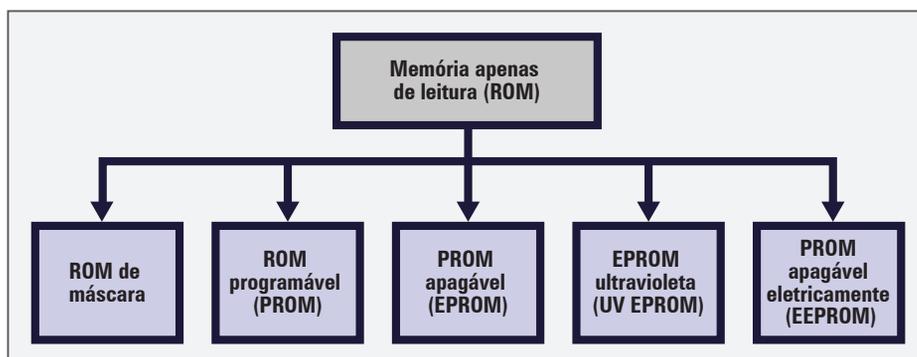


Figura 135 - Tipos de memória ROM

a) Memória ROM

A memória ROM armazena informações gravadas pelo fabricante do equipamento que o utiliza e não é possível sejam alteradas por um usuário comum. Tais informações se referem a comandos e dados essenciais à correta operação do equipamento, como a inicialização do sistema operacional, testes e verificações de *hardware*.

- *Mask*-ROM (ROM programada por máscara)

Conhecida como ROM programada por máscara ou *mask*-ROM foi a primeira ROM a ser desenvolvida. As informações dessa memória eram inseridas pelo fabricante do dispositivo, de acordo com as exigências do cliente. A desvantagem é que as informações uma vez gravadas não podem ser alteradas.

- PROM (ROM programável)

A memória ROM programável ou PROM se difere da *mask*-ROM pelo fato de o usuário inserir as informações na memória e não mais o fabricante. Entretanto, a escrita dos dados é definitiva, não podendo ser reprogramada posteriormente.

- EPROM (ROM programável e apagável)

A memória EPROM, também conhecida como UV EPROM, apresentou a vantagem de as informações poderem ser apagadas, reprogramadas e inseridas pelo próprio usuário. O apagamento é realizado por luz ultravioleta por meio de uma janela existente no encapsulamento do circuito integrado. Assim, para modificar uma simples informação, é necessário apagar todo o seu conteúdo e depois inseri-lo novamente com as devidas alterações.

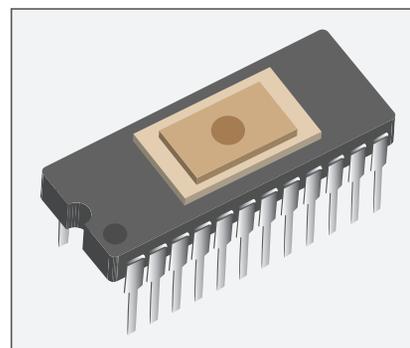


Figura 136 - Memória EPROM ou UV EPROM

- EPROM (ROM programável e apagável eletricamente)

A memória EEPROM, também conhecida como E²PROM, se diferencia da EPROM pela forma como é realizado o apagamento, sendo feito eletricamente. Além disso, apaga-se apenas a informação que se deseja e não mais todo o conteúdo da memória, como é feito na EPROM.

b) Memória RAM

A memória RAM, memória de acesso aleatório, é a que permite a leitura e a escrita de suas informações. Ela armazena de forma temporária as informações dos programas que o equipamento está utilizando. É uma memória volátil, ou seja, suas informações são perdidas quando a alimentação é cortada. Dependendo do tipo de componente empregado em seu circuito interno para armazenar as informações, ela é classificada como estática ou dinâmica.

A memória estática, em inglês, *static RAM (SRAM)*, usa o *flip-flop* como elemento de armazenamento. Sua principal vantagem é a velocidade, porém apresenta o inconveniente de o custo ser elevado.

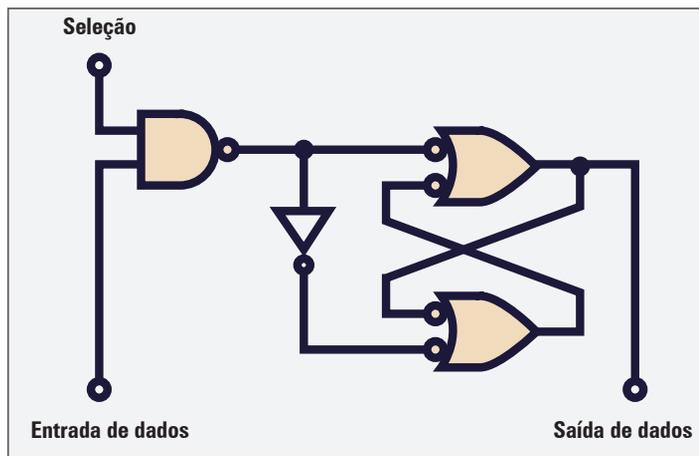


Figura 137 - Estrutura básica de uma memória SRAM

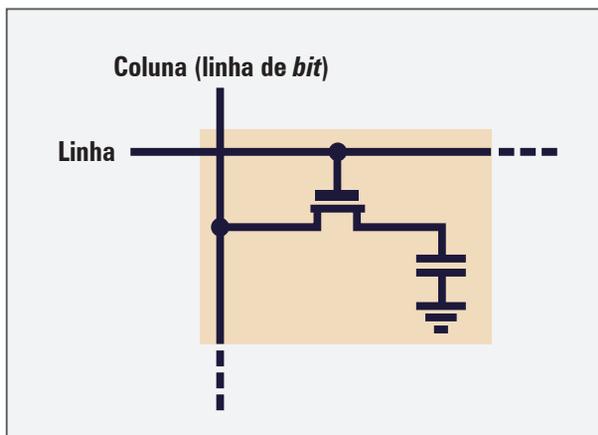


Figura 138 - Estrutura básica de uma memória DRAM

A memória dinâmica, em inglês, *dynamic RAM (DRAM)*, por sua vez, utiliza o capacitor como elemento de armazenamento. Sua principal vantagem é o baixo custo e a maior capacidade quando comparada à SRAM, porém apresenta a desvantagem de ser mais lenta por precisar de pulsos periódicos de recarga nos capacitores. Estes recebem o nome de *refresh*.

A memória RAM também passou por evoluções desde a sua criação até chegar ao ponto em que está hoje. A memória DRAM surgiu na década de 70 e é definida como padrão de memória mundial.

Nessa época, o padrão de encapsulamento que a memória utilizava era o encapsulamento em linha dupla, em inglês, *dual in-line package (DIP)*, e localizada na placa-mãe do computador.

Com a evolução dos computadores, o padrão de memória a ser adotado passou a ser o encapsulamento com pinos em uma única linha, em inglês, *single in-line pin package* (SIPP). Porém, por motivos técnicos, esse padrão deixou de ser utilizado para dar lugar ao padrão módulo de memória em uma linha, em inglês, *single in-line memory module* (SIMM), muito parecido com o padrão DIP.

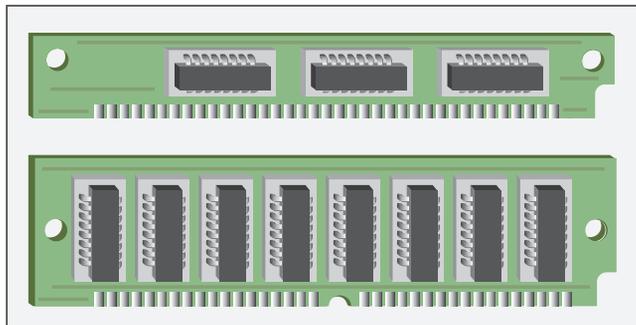


Figura 139 - Memória SIMM

As primeiras memórias SIMM foram utilizadas nos computadores pessoais 286 e 386 e possuíam 30 pinos. Mais tarde, evoluíram para os modelos com 72 pinos que apresentavam uma transmissão maior de dados e eram usados nos computadores 486.

O padrão SIMM continuou sendo empregado nos computadores, porém adotando novas tecnologias. A tecnologia que possibilita o acesso rápido aos dados de uma linha da memória, modo de página rápida, em inglês, *fast page mode* (FPM), permitia a escrita ou a leitura de múltiplos dados e alcançava a capacidade de armazenamento de até 256 *kilobytes*. Além dela, a tecnologia saída de dados estendida, em inglês, *extended data out* (EDO), possibilitou aumento no desempenho da memória quando comparada à FPM.

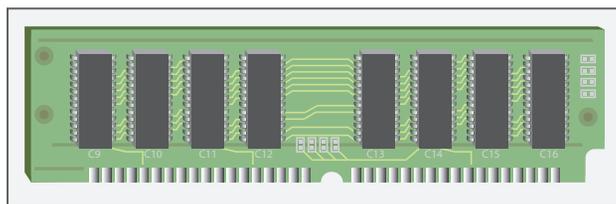


Figura 140 - Memória EDO

Com a evolução dos processadores, o padrão SIMM não atendia à capacidade de armazenamento que os novos processadores exigiam, fazendo com que os fabricantes desenvolvessem um novo modelo. O resultado foi a criação de um padrão com capacidade de armazenamento superior, chamado módulo de memória em linha dupla, em inglês, *dual in-line memory module* (DIMM).

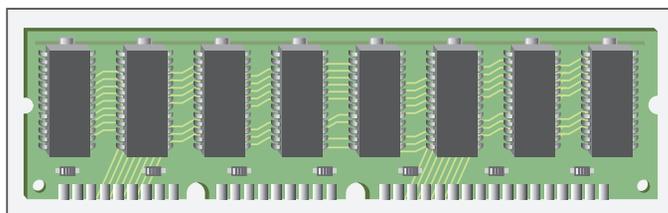


Figura 141 - Memória DIMM

O padrão DIMM permaneceu por muitos anos e serviu de base para o desenvolvimento de outros padrões de memórias até chegar ao padrão DDR, que é o utilizado nos computadores atuais.

O padrão dupla taxa de transferência, em inglês, *double data rate* (DDR), teve seu início operando com frequências de até 200 MHz. Após esse modelo, surgiu a DDR2, com frequência de operação de até 1.300 MHz. O padrão DDR3, utilizado atualmente, possui uma frequência de operação na faixa de 2.400 MHz .

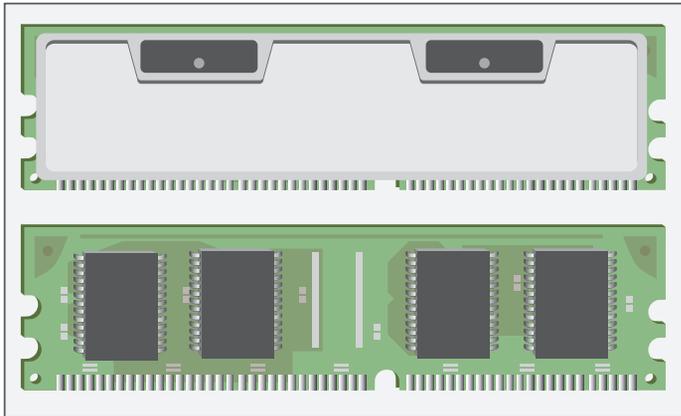


Figura 142 - Memórias DDR

Toda essa evolução se deve ao fato de os processadores atuais possuírem a capacidade de processar números enormes de informações simultaneamente, exigindo a mesma *performance* por parte das memórias. No entanto, ela não conseguiu evoluir nas mesmas proporções que os processadores, fazendo com que alguns recursos fossem adotados para minimizar essa diferença.

Uma alternativa para que a memória acompanhasse a velocidade do processador foi a criação de uma memória DRAM

sincronizada com o *clock* do sistema, possibilitando que a memória trabalhasse junto ao microprocessador. Esse tipo de memória é chamado de memória de acesso aleatório dinâmica e síncrona, em inglês, *synchronous dynamic random access memory* (SDRAM).

Outra possibilidade foi a utilização de uma memória que intermediasse o processador e a memória RAM, aumentando a velocidade de acesso à informação desejada por parte do processador. Ela recebeu o nome de memória *cache* e sua principal função é evitar que o processador acesse a RAM o tempo todo e deixe o computador lento. A memória cache é fundamental para que o computador tenha um alto desempenho. É, portanto, essencial a qualquer sistema *microprocessado*. Ela é dividida em três tipos: (L_1), (L_2) e (L_3):

- cache (L_1) - inserida dentro do processador e com pequena capacidade, fazendo com que fosse desenvolvida a (L_2);
- cache (L_2) - apresenta uma capacidade maior que a (L_1) e pode estar localizada dentro do processador ou na placa-mãe do computador. Normalmente, está localizada fora do processador devido ao alto custo;
- cache (L_3) - localizada na placa-mãe do computador, é considerada uma memória cache adicional, sendo pouco utilizada nos computadores atuais.



Cache: tipo de memória de alta velocidade usada para acelerar o processamento dos dados internos ao microprocessador.

Sistema microprocessado: sistema eletrônico que possui como componente principal o microprocessador, o qual executa funções específicas complexas.

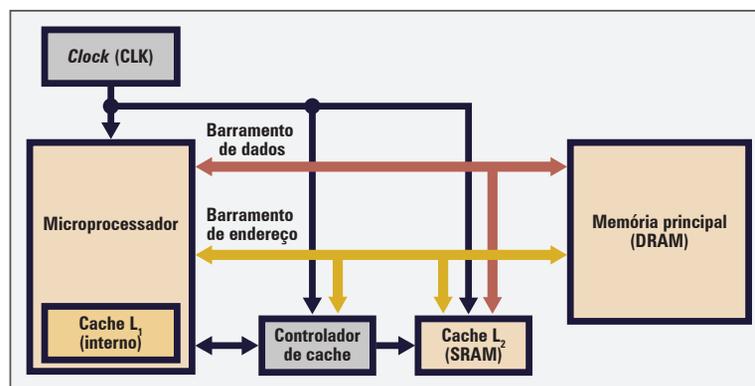


Figura 143 - Memória cache

A busca por sistemas mais velozes prevê a criação de caches cada vez mais eficazes. Assim, o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas memórias caches é apenas uma questão de tempo.

Quando se refere às memórias de um computador ou a sistema microprocessado, além das classificações já apresentadas, é comum nomeá-las de memórias principal ou secundária. Esse tipo de classificação também é empregado em bibliografias e sites especializados e se refere às mesmas memórias já estudadas aqui, porém com nomenclaturas diferentes.

Memória principal é aquela que armazena informações de forma temporária. É utilizada pelo processador para acessar os dados de forma mais rápida. Sua principal característica é a alta velocidade e seus exemplos mais comuns são: a memória cache e a RAM.

Memória secundária são aquelas que armazenam informações de forma permanente. Sua principal característica é a alta capacidade de armazenamento, porém são mais lentas. São exemplos comuns: os discos rígidos, *pen drives* e cartões de memória.

A Figura 144 mostra um resumo dos tipos de memórias empregadas no computador.

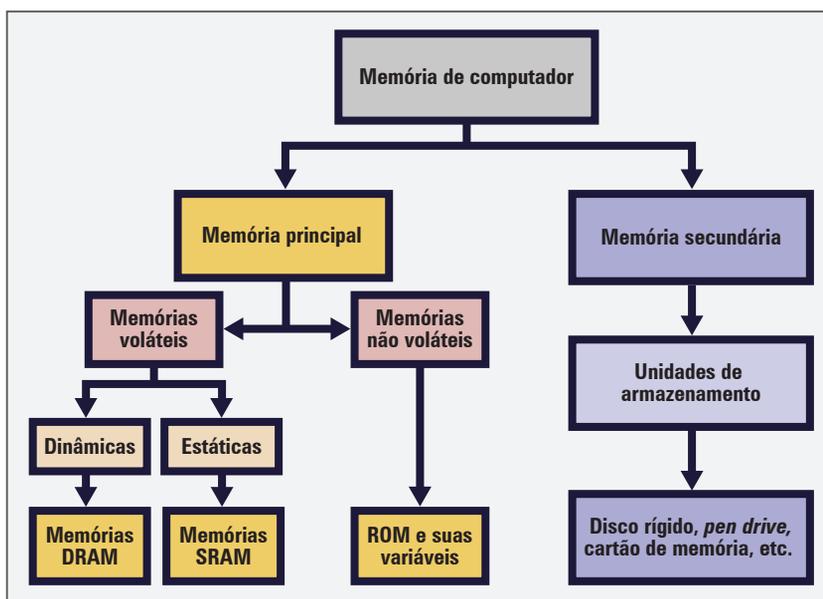


Figura 144 - Memórias empregadas no computador

6.2 Princípio de operação das memórias eletrônicas

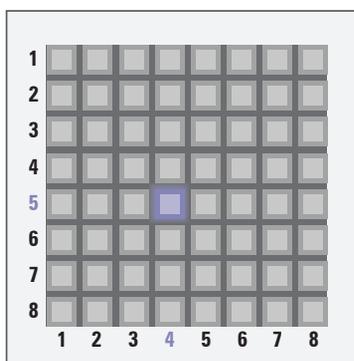


Figura 145 - Endereço de memória

Memórias são componentes que armazenam informações utilizadas pelos programas dos equipamentos. Essas informações ficam armazenadas em locais denominados endereços de memória ou simplesmente endereços.

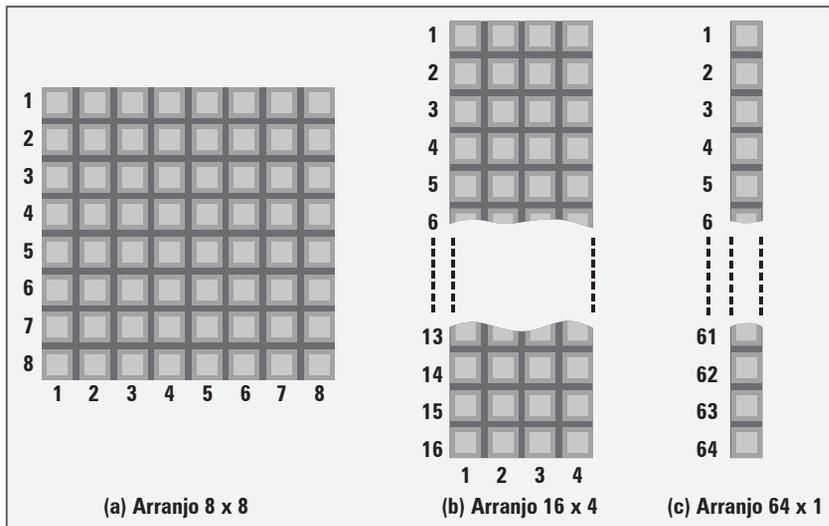


Figura 146 - Arranjos de memória

Assim, uma memória é especificada por intermédio da seguinte notação:

$$\text{N}^\circ \text{ de endereços} \times \text{N}^\circ \text{ de bits}$$

A notação 32x4 indica que a memória possui 32 endereços e cada um deles suporta quatro *bits*. É importante saber que o número de endereços é sempre múltiplo de 2, conforme a Tabela 66.

Tabela 66 - Múltiplos de 2 para cálculo de linhas de endereço

$2^1 = 2$	$2^6 = 64$	$2^{11} = 2^{10} \times 2^1 = 1 \text{ K} \times 2 = 2 \text{ K}$
$2^2 = 4$	$2^7 = 128$	$2^{12} = 2^{10} \times 2^2 = 1 \text{ K} \times 4 = 4 \text{ K}$
$2^3 = 8$	$2^8 = 256$	$2^{13} = 2^{10} \times 2^3 = 1 \text{ K} \times 8 = 8 \text{ K}$
$2^4 = 16$	$2^9 = 512$	$2^{20} = 2^{10} \times 2^{10} = 1 \text{ K} \times 1 \text{ K} = 1 \text{ Mega}$
$2^5 = 32$	$2^{10} = 1024 = 1 \text{ Kilo}$	$2^{30} = 2^{10} \times 2^{10} \times 2^{10} = 1 \text{ K} \times 1 \text{ K} \times 1 \text{ K} = 1 \text{ M} \times 1 \text{ K} = 1 \text{ Giga}$

Fonte: Elaboração dos autores.

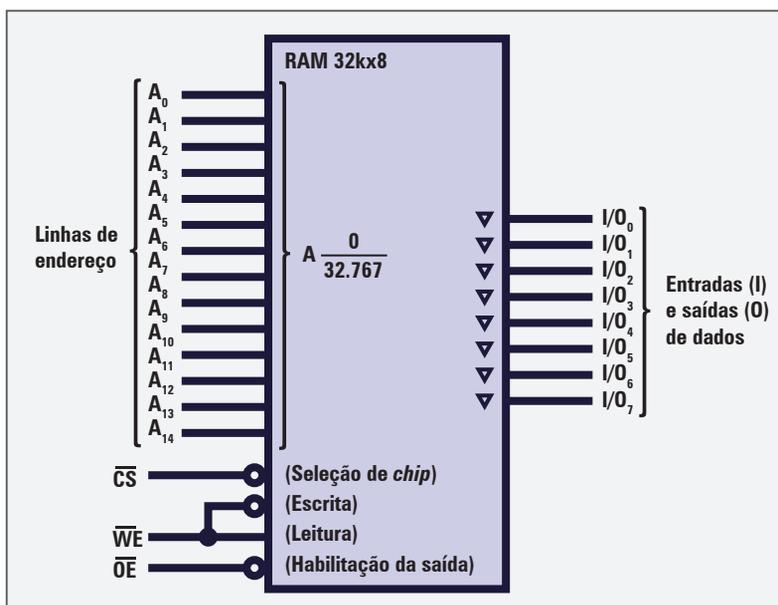


Figura 147 - Memória 32kx8

Cada memória tem um arranjo específico, de acordo com o fabricante ou a necessidade do circuito ao qual será aplicada.

A capacidade de uma memória está diretamente ligada ao número de endereços que ela possui e a quantidade de *bits* (dados) que cada endereço consegue armazenar.

As linhas de endereço são normalmente representadas pela letra (A) e as de dados pela letra (D). Na Figura 147, as linhas de dados estão sendo representadas por I/O, que significa entrada e saída de dados. A memória a seguir possui quinze linhas de endereço por oito linhas de dados, representada pela seguinte notação: 32kx8. ($2^{15} = 32\text{k}$).

Quanto maior o número de linhas de endereços, maior o número de localidades de uma memória e quanto maior o número de linhas de dados, maior o tamanho da informação a ser armazenada em cada endereço.

A ampliação do número de linhas de dados e de endereço pode ser feita por meio da associação de *chips* de memória. Uma memória de 64kx16 é possível mediante a associação de quatro *chips* de 64kx4, conforme a Figura 148. Nesse caso, aumentou-se o barramento de dados, armazenando-se mais informação dentro de um endereço.

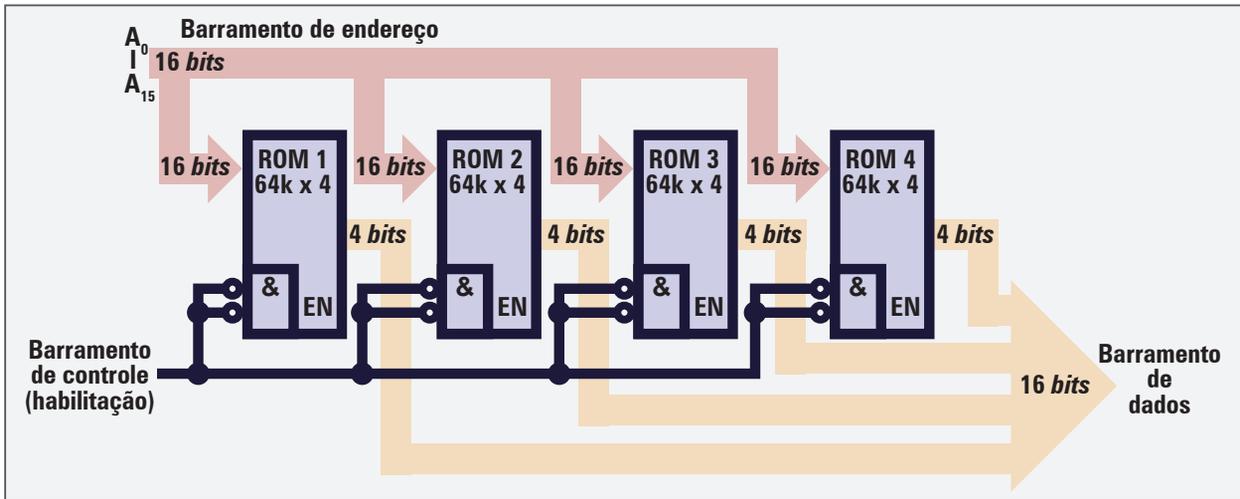


Figura 148 - Expansão do barramento de dados

Outro tipo de expansão de memória é aumentando o barramento de endereço. Nesse caso, apenas o número de localizações é ampliado, mantendo o mesmo tamanho da palavra. Para essa situação, faz-se necessário o uso de um decodificador que habilitará o *chip* no qual se encontra o endereço desejado. A Figura 149 mostra uma memória de 2Mx8 por meio da associação de dois *chips* de 1Mx8.

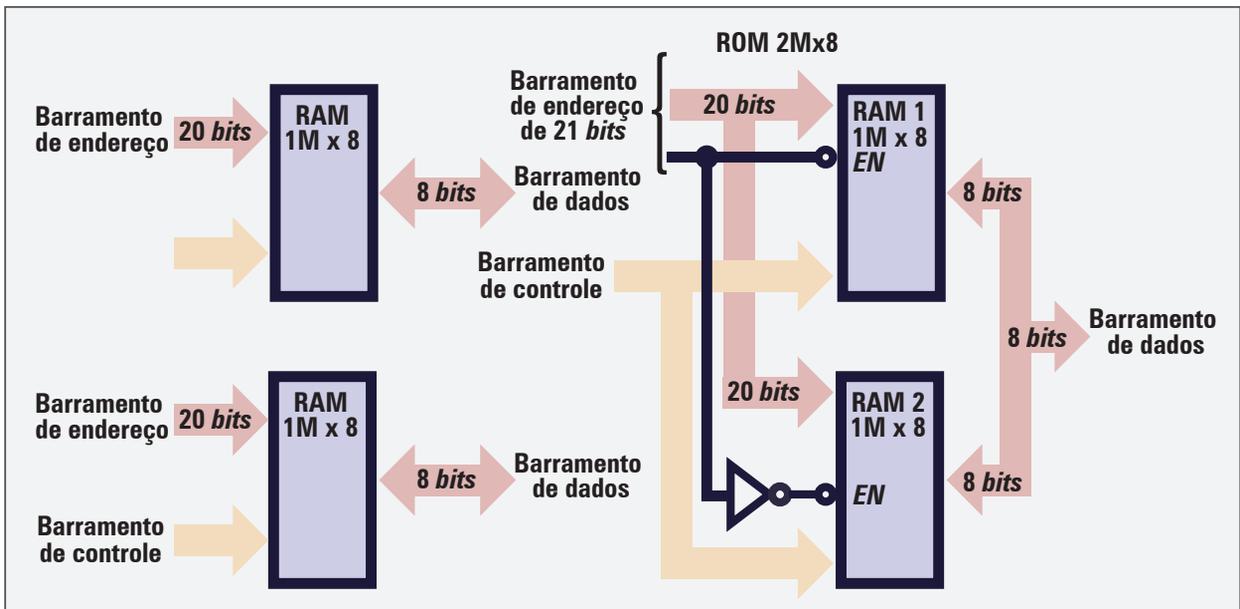


Figura 149 - Expansão do barramento de endereço

Além das linhas de dados e endereços, as memórias apresentam linhas de comando que servem para selecionar qual *chip* de memória será utilizado e qual operação será realizada: escrita ou

leitura. Dessa forma, há a linha que controla a escrita/leitura, em inglês, *read/write* (R/\overline{W}) e a linha que habilita o *chip*, chamada de habilitador de *chip*, em inglês, *chip enable* (CE) ou seletor de *chip*, em inglês, *chip select* (CS), a seguir.

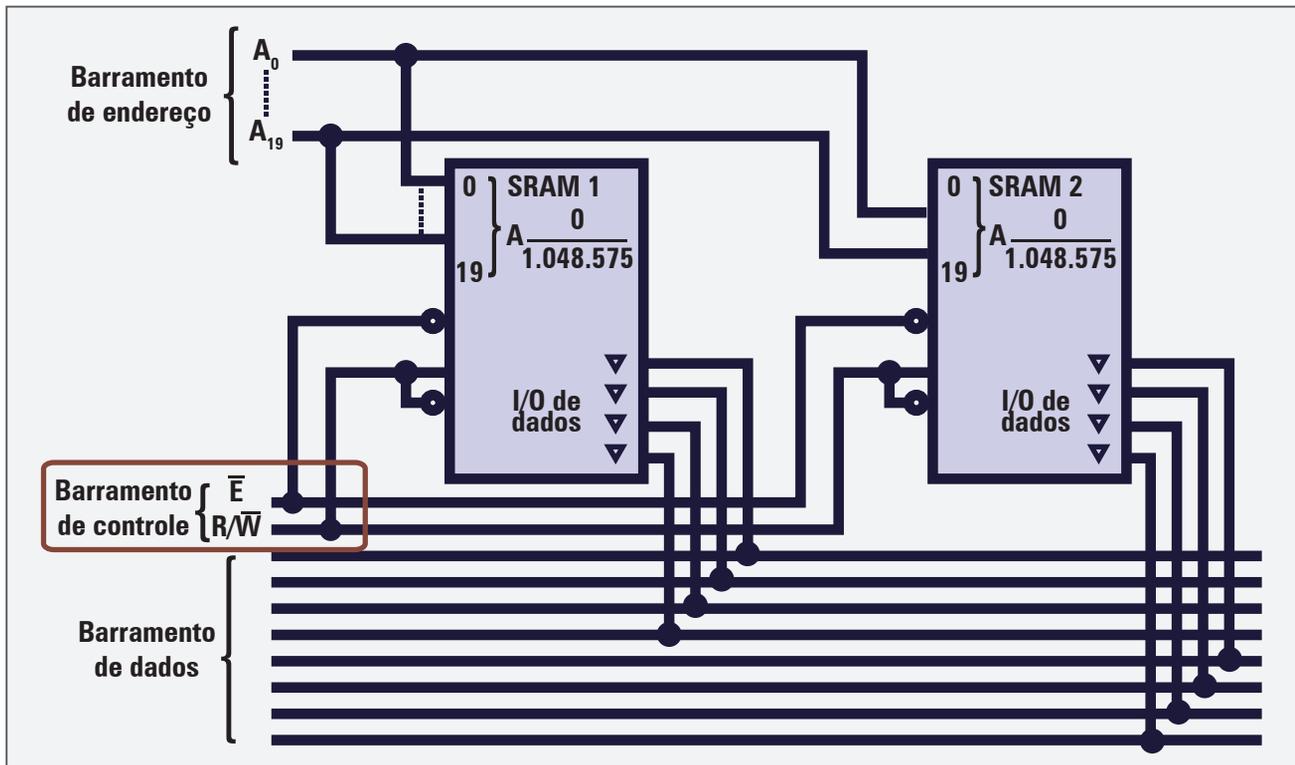


Figura 150 - Barramento de controle

a) Controle de leitura/escrita (R/\overline{W})

A linha de controle (R/\overline{W}) comanda se a operação será de leitura (R) ou de escrita (\overline{W}). A operação a ser executada dependerá do nível lógico aplicado a essa linha. Assim:

- nível lógico 0 na linha (R/\overline{W}) habilita a escrita;
- nível lógico 1 na linha (R/\overline{W}) habilita a leitura.

Apenas as memórias RAM possuem essa linha de controle. No caso das ROMs, por ser uma memória de somente leitura, ela não existe.

b) Habilitador de *chip* (\overline{CE})

A linha de habilitação de *chip* (\overline{CE}) é usada em sistemas que possuem vários *chips* para aumentar a capacidade de memória do sistema. Assim:

- nível lógico 0 na linha (\overline{CE}) desabilita o *chip* e nenhum endereço pode ser utilizado;
- nível lógico 1 na linha (\overline{CE}) habilita o *chip* e os endereços podem ser usados.

Na Figura 150, essa linha é representada pela letra (\overline{E}) .

Resumindo

Neste capítulo, foram abordados os tipos de memórias quanto a diversos critérios. Também foi mostrada a evolução das memórias ROM, com as devidas implementações nos circuitos para adequação às necessidades de cada época. Além disso, foram apresentados os tipos de memória RAM e sua função junto ao processador do computador, demonstrando a sua essencialidade para que o equipamento trabalhe com grandes velocidades.

Foram estudados também os arranjos de memórias, permitindo um aumento na capacidade da máquina a partir de memórias disponíveis no mercado. O arranjo é feito em relação à capacidade de armazenamento ou ao tamanho da palavra a ser armazenada, utilizando as devidas linhas de habilitação de *chip*.

Capítulo 7

Introdução aos computadores

A evolução da humanidade teve seu início a partir do momento em que o homem sentiu a necessidade de se comunicar, surgindo a comunicação oral e, posteriormente, a escrita. Diante desse contexto, a tecnologia teve sua evolução em virtude das necessidades da época, tornando a vida do ser humano mais confortável. Dentro da área da eletrônica, o computador se destaca, assumindo papel de extrema importância para a evolução da sociedade. Sua invenção não é atribuída a uma só pessoa ou a um grupo isolado. Ele é resultado de diversas invenções e descobertas até seu produto final.

O ábaco (Figura 151) é considerado a primeira máquina com o propósito de executar contagens. Sua estrutura é formada por um molde retangular de madeira com varetas paralelas e contas deslizantes.

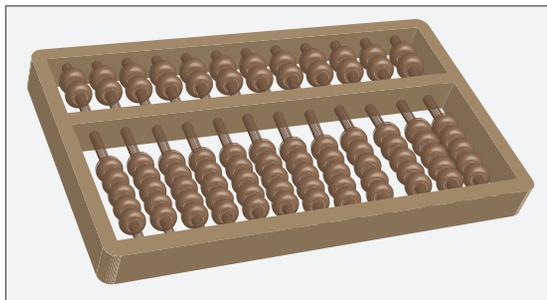


Figura 151 - Ábaco

Por volta de 1642, Blaise Pascal inventou uma máquina de calcular chamada pascalina (Figura 152), que realizava somente a soma. Ela é considerada a precursora das calculadoras atuais.



Figura 152 - Pascalina

Fonte: commons.wikimedia.org / © 2005 David Monniaux

Décadas mais tarde, por volta de 1694, Leibnitz aperfeiçoou a pascalina, porém, ainda assim, ela realizava somente a soma. Entre 1792 e 1871, Charles Babbage criou uma máquina (Figura 153) capaz de executar as quatro operações aritméticas, além de armazenar tais informações na memória e imprimi-las. Infelizmente, sua criação só foi concluída um ano após sua morte com base em seus desenhos. Ele é considerado o pai do computador.

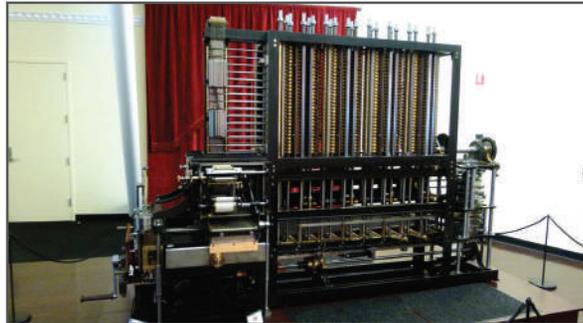


Figura 153 - Máquina analítica

Fonte: commons.wikimedia.org / ©2011 Jordiipa

Mais tarde, Herman Hollerith criou uma máquina que projetava códigos para representação de dados em cartões e cálculo de folha de pagamento, cujo nome permanece até hoje como holerite. Em 1924, a empresa que criou essas máquinas se transformou na *International Business Machine* (IBM).



Figura 154 - Tabulador de Hollerith (1890)

Fonte: commons.wikimedia.org / © 2008 Pargon

Na década de 40, a 2ª Guerra Mundial contribuiu para a evolução dos computadores, devido à necessidade da realização de cálculos balísticos com rapidez e perfeição. Mark I, o maior computador eletromecânico construído, foi concluído em 1944 e possuía por volta de 760.000 peças e 800 km de fio.



Cálculo balístico: cálculo realizado para determinar a trajetória de um projétil.



Figura 155 - Mark I

Fonte: commons.wikimedia.org /

© *International Business Machines Corporation* (IBM)

Em 1946, foi construído o computador e integrador numérico eletrônico, em inglês, *eletronic numeral interpreter and calculator* (ENIAC). Totalmente eletrônico, possuía 18.000 válvulas, 30 toneladas de peso total e ocupava uma área de 180 m². Foi desativado em 1955.

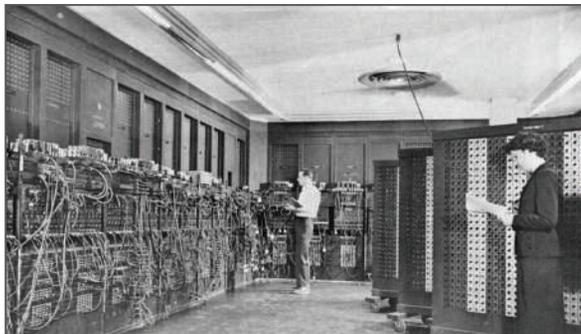


Figura 156 - ENIAC (1946)

Fonte: commons.wikimedia.org / © U.S. Army

Em 1951, foi construído o UNIVAC I, o primeiro computador disponível comercialmente. Logo depois, a IBM lançou o IBM701 e o IBM705, que marcou o fim dos computadores à válvula.

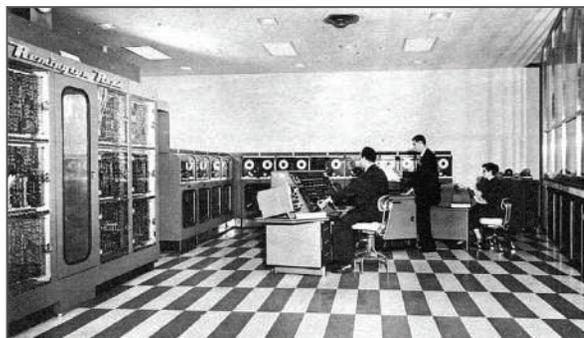


Figura 157 - UNIVAC I

Fonte: commons.wikimedia.org / © U.S. Army

Em 1957, os computadores passaram a utilizar os transistores como principal tecnologia. O resultado foi uma diminuição significativa no tamanho, no volume e no número de componentes deles. Em 1960, a invenção do circuito integrado permitiu a criação de computadores mais rápidos e menores, utilizando os CIs com tecnologia LSI e VLSI. O computador IBM360, demonstrado na Figura 158, é um exemplo.



Figura 158 - IBM360

Fonte: commons.wikimedia.org /

© International Business Machines Corporation (IBM)

A evolução dos computadores foi classificada por gerações até a década de 90, conforme exposto a seguir.

- a) 1ª Geração - surgiu na década de 50 e seus principais componentes são a válvula e o relé. Apresentam como principais características o excessivo calor gerado, curto tempo de vida e dimensões exageradas. São exemplos de computadores desta geração: ENIAC, UNIVAC e IBM650.
- b) 2ª Geração - surgiu na década de 60 e seu principal componente é o transistor. Quando comparado à válvula, apresenta algumas características como dimensões reduzidas, tempo de vida longo e boa confiabilidade. São exemplos de computadores dessa geração: IBM 7094 e CDC 6600.
- c) 3ª Geração - surgiu na década de 70 e seu principal componente é o circuito integrado (CI). Possuía a capacidade de integrar mais de 100.000 transistores em um único circuito integrado. Nessa geração, apareceram as linguagens de programação como *pascal*, *lisp*, *forth* e *basic*. São exemplos de computadores: IBM370 e o PDP-11.
- d) 4ª Geração - surgiu na década de 80 e seu principal componente é a integração em larga escala, em inglês, *large scale integration* (CI LSI). Nessa época, também apareceram sistemas especializados e banco de dados de alta *performance*.



Figura 159 - Quarta geração dos computadores
Fonte: commons.wikimedia.org / © Rama & Musée Bolo

- e) 5ª Geração - surgiu na década de 90 e permanece até os dias atuais. Seu principal componente é a integração em muito larga escala, em inglês, *very large scale integration* (CI VLSI). Exemplos de computadores dessa geração são a partir do 286 aos mais atuais.



Figura 160 - Quinta geração dos computadores
Fonte: commons.wikimedia.org / © Kris Mendoza

7.1 Organização de um sistema computacional básico

A organização de um sistema computacional básico é feita a partir de cinco elementos que pertencem a três unidades básicas, independentemente em qual geração ele se inclua. Por intermédio desses elementos, é possível a comunicação entre homem e máquina. São elas:

- unidade lógica e aritmética, em inglês, *arithmetic logic unit* (ALU);
- memória;
- unidade de controle;
- entrada de dados;
- saída de dados.

As unidades lógica e aritmética e a de controle pertencem à unidade central de processamento, em inglês, *central processing unit* (CPU), de um computador, que são representadas por uma unidade no diagrama em blocos da Figura 161. A unidade de memória representa todos os tipos de memória existentes no computador. As unidades de entrada e de saída de dados também são responsáveis pela ligação de qualquer equipamento externo que seja conectado ao computador. Porém, para que isso aconteça, é necessária uma padronização entre a comunicação das unidades internas com os equipamentos externos, recebendo o nome de **interfaceamento**.

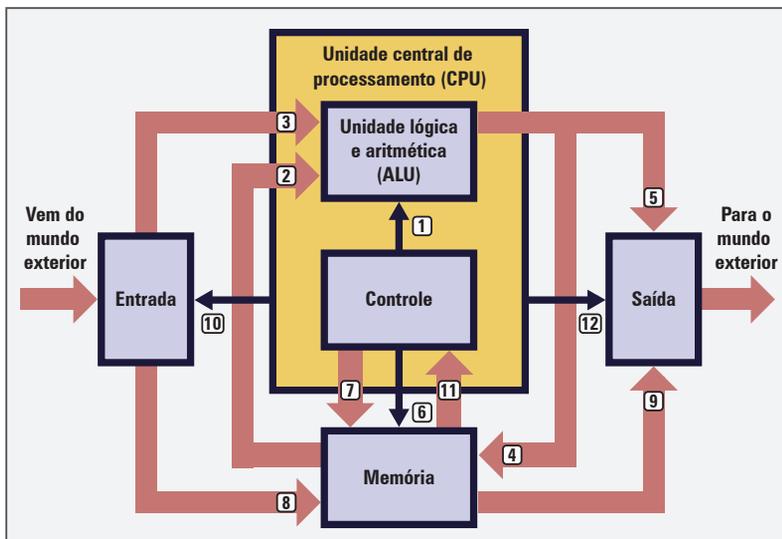


Figura 161 - Diagrama em blocos de um sistema computacional básico

Interfaceamento: termo proveniente de interface; equipamento necessário para interligar os componentes ou as partes de um equipamento que não pode ser ligado direto devido à incompatibilidade dos sistemas.

7.2 Elementos básicos de um computador

O computador ou microcomputador, comumente chamado, tem diversas funções, tais como controlar processos e executar cálculos complexos por intermédio de instruções ou programas simples. É capaz de receber informações, processá-las e fornecer resultados.

O microcomputador básico é formado por três unidades: CPU, memória e dispositivo de entrada/saída. Cada unidade possui função específica e são interligadas por fios paralelos que recebem o nome de barramento.

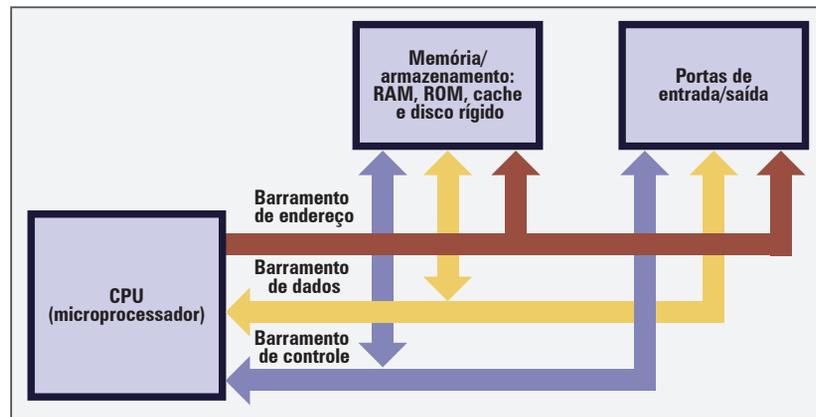


Figura 162 - Microcomputador básico

a) Unidade central de processamento (CPU)

A CPU também é conhecida como processador ou microprocessador. Sua estrutura é normalmente formada por uma pequena pastilha de silício com a integração de milhares de componentes.

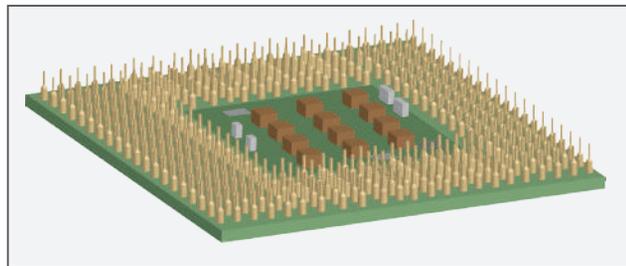


Figura 163 - Processador

A CPU possui a função de gerenciar todo o sistema do computador. Ela é responsável pela execução dos programas, do sequenciamento das instruções, do controle do fluxo de dados, da temporização do sistema, dentre outras mais. Por esse motivo, é considerada o coração do computador.

b) Memória

Memória é a unidade responsável pelo armazenamento das informações do computador. Esse armazenamento precisa ser realizado de forma organizada para que o processador consiga encontrar as informações adequadas no momento da busca. Conforme visto anteriormente, a memória é dividida em pequenas áreas chamadas de endereços e é de dois tipos: ROM e RAM.

Dentro da memória ROM, está armazenado, de forma permanente, um programa chamado sistema de entrada/saída básico, em inglês, *basic input/output system* (BIOS), que contém instruções de inicialização do sistema. Assim, toda vez que o computador é inicializado, o BIOS faz um teste de *hardware* e carrega informações do *sistema operacional*.



Hardware:
elementos físicos que compõem qualquer equipamento eletrônico.

Sistema operacional:
software necessário ao funcionamento de todas as partes integrantes de um sistema computadorizado.

c) Dispositivo de entrada/saída

Os dispositivos de entrada/saída, também conhecidos como I/O, do inglês *input* e *output*, são responsáveis por viabilizar a comunicação entre o homem e a máquina por meio de equipamentos denominados periféricos.

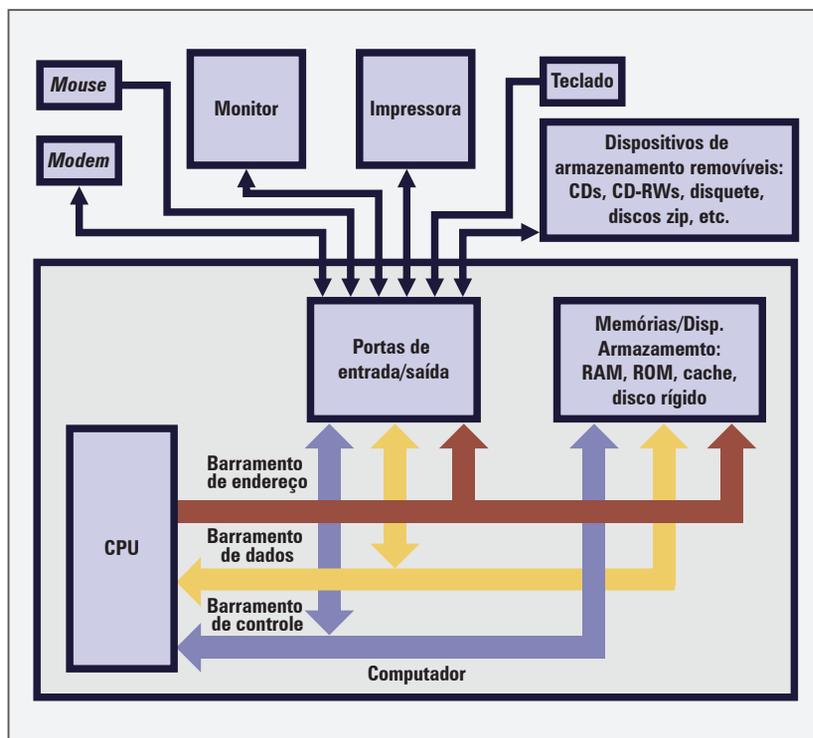


Figura 164 - Computador básico e seus periféricos

Os periféricos são classificados como dispositivos de entrada, saída ou entrada e saída de dados, como explicitado a seguir.

- Dispositivo de entrada de dados - são aqueles que possuem a função de entrar/inserir dados no computador. Exemplos: teclado, *scanner* e leitor de código de barras. O teclado é o principal dispositivo de entrada de dados.
- Dispositivos de saída de dados - são aqueles que possuem a função de fornecer dados do computador. Exemplos: monitor e impressora. O monitor é o principal dispositivo de saída de dados.
- Dispositivos de entrada e saída de dados - são aqueles que possuem a função tanto de entrar com dados no computador quanto de fornecer dados deste. Exemplos: *modem*, *pen drive*, CD e DVD.

d) Barramentos

As unidades básicas do computador são interligadas por fios paralelos denominados barramentos, em inglês, *bus*. O computador possui três tipos de barramentos: de dados, de endereços e de controle. É por meio deles que as informações são processadas e os programas executados.

- Barramento de dados - também conhecido como *data bus*, tem como objetivo garantir o fluxo de dados no computador. É bidirecional e seu tamanho indica a quantidade máxima de *bits* processados durante uma instrução. Cada processador possui um tamanho específico. Os processadores atuais têm o barramento de dados de 64 *bits*.
- Barramento de endereços - também conhecido como *address bus*, visa a garantir o fluxo de endereços no computador. Ele é unidirecional, pois somente a CPU pode fazer o endereçamento para qualquer instrução, ou seja, ela é responsável por escolher a localização na memória que irá armazenar ou retirar uma determinada informação.
- Barramento de controle - também conhecido como *control bus*, possui característica bidirecional e objetiva garantir o fluxo de comandos do computador como: *clock*, sequência de instruções, operação de escrita ou leitura, dentre outros.

7.2.1 Arquitetura de um microprocessador

A arquitetura de um microprocessador básico é formada por quatro unidades. São elas: ALU, decodificador de instrução, conjunto de registradores e unidade de controle. Cada uma possui uma função específica no microprocessador.

- Unidade lógica e aritmética (ALU) - é responsável por realizar as operações lógicas e aritméticas do microprocessador. Os resultados das operações da ALU são armazenados em registradores específicos para este fim.
- Decodificador de instrução - tem a função de decodificar as instruções dos programas executados pelo microprocessador. Um programa nada mais é do que uma sequência de instruções, sua decodificação deve ser feita na ordem e no tempo corretos, para que não ocorra falha na execução.
- Conjunto de registradores - representa todos os registradores internos do microprocessador. Registradores são endereços de memória utilizados com fins específicos, além de terem o acesso mais rápido por parte dos processadores. Ao realizar uma soma, o resultado é armazenado de forma temporária em um registrador especial, que guarda os resultados de todas as operações lógicas e aritméticas realizadas pela ALU. Alguns registradores ficam disponíveis para o processador utilizar de diversas formas.
- Unidade de controle - é responsável por enviar os comandos de controle para o processamento das instruções. É a unidade de controle que define se a operação será de escrita ou leitura, sinais de sincronismo e temporização das instruções.



Figura 165 - Arquitetura básica de um microprocessador

Execução de um programa

A execução de qualquer programa pelo microprocessador é realizada por intermédio de três operações básicas. São elas busca, decodificação e execução:

- busca - é o primeiro passo da execução de um programa. É neste momento que o processador faz a busca da instrução no endereço de memória;
- decodificação - após a instrução ser buscada, ela é decodificada pelo decodificador de instruções. Este é o momento em que o processador descobre o que deve fazer;
- execução - ao saber o que precisa ser feito, o processador executa a instrução, enviando os resultados para os registradores específicos ou para um endereço de memória indicado pelo programa.

Ao finalizar a terceira etapa de uma instrução, o processador inicia a busca da instrução seguinte e realiza novamente todas as etapas até que as instruções do programa sejam completamente executadas.

7.3 Palavras em sistemas computacionais

A comunicação interna de um computador ocorre na forma de sequências de códigos binários, anteriormente mencionado. Essas informações recebem o nome de palavra e apresentam diferentes tamanhos de acordo com a tecnologia utilizada nos módulos do computador. Assim, o tamanho da palavra indica o potencial dos componentes internos do computador. Dessa forma, palavra é a unidade fundamental do computador. Para mensurá-la, alguns termos são comumente utilizados, quais sejam:

- *bit* - tem como origem os termos dígitos binários, em inglês, *binary digit*. Ele representa a menor unidade de informação disponível em qualquer computador, podendo assumir apenas os valores zero ou um;
- *nibble* - conjunto de quatro *bits*;
- *byte* - tem como origem os vocábulos em inglês *binary term* (termo binário). É o conjunto de oito *bits*;
- instrução - é um grupo de *bits*, *nibbles* ou *bytes* com uma função específica;
- programa - é um conjunto ordenado de instruções.

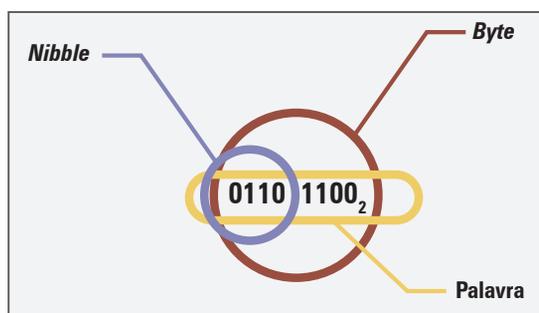


Figura 166 - Terminologia do computador

As denominações anteriores servem apenas como referência para que os usuários possam diferenciar as diversas configurações de computadores.

7.3.1 Linguagens do computador

O computador é um equipamento que necessita de um suporte lógico para realizar qualquer tarefa. Sua estrutura física, também conhecida por *hardware*, nada faz sem os programas, denominados *softwares*.



Software: elemento lógico que proporciona o funcionamento das partes integrantes de um sistema microprocessado.

A comunicação entre homem e máquina só foi possível por meio de programas específicos que receberam o nome de linguagem. A primeira linguagem criada pelo homem foi nomeada linguagem de máquina. Ela era composta de enormes sequências de códigos binários, o que a tornava cansativa e de difícil compreensão. Em virtude da dificuldade de trabalhar com números binários, a programação passou a ser em hexadecimal, sendo cada quatro dígitos binários substituídos por um dígito hexadecimal. Mesmo assim, a programação ainda era restrita a poucas pessoas que trabalhavam diretamente com o computador.

Com vistas a facilitar o trabalho desse seleto grupo de pessoas, criou-se uma linguagem formada por mnemônicos (grupos de letras que representavam uma instrução) denominada *assembly*. Essa linguagem é considerada de baixo nível por estar próxima ao *hardware* do computador. O último nível é representado por linguagens mais fáceis de serem escritas e mais próximas da humana, sendo denominadas linguagens de alto nível. São exemplos desse tipo de linguagem: *fortran*, *cobol*, *basic*, *pl* e *pascal*.

Algumas literaturas dividem as linguagens de programação em níveis, conforme sua relação com o *hardware* do computador. A Figura 167 mostra a hierarquia das linguagens de programação.

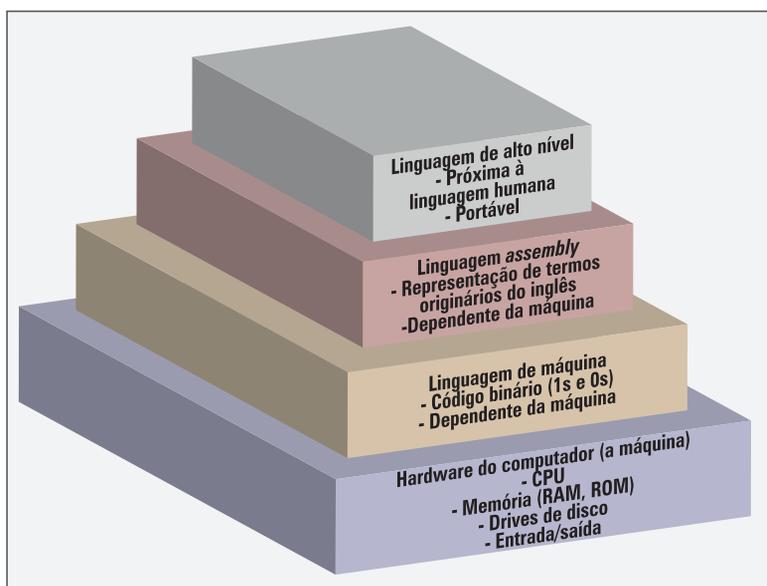


Figura 167 - Linguagens do computador

As linguagens de alto nível são portáteis, ou seja, elas são utilizadas para qualquer tipo de processador. Isso as diferencia da *assembly*, a qual é criada para um processador específico, tornando-a limitada quanto ao campo de atuação.

A utilização de linguagens diferentes da linguagem de máquina (binário) fez com que fossem criados programas que convertessem as linguagens *assembly* ou de alto nível para a linguagem binária. Cada uma delas possui um programa específico para essa tarefa.

A linguagem *assembly* utiliza o assembler, ou *assembler*, para realizar essa conversão. Sua maior aplicação está no controle das máquinas em processos industriais e na programação de jogos eletrônicos.

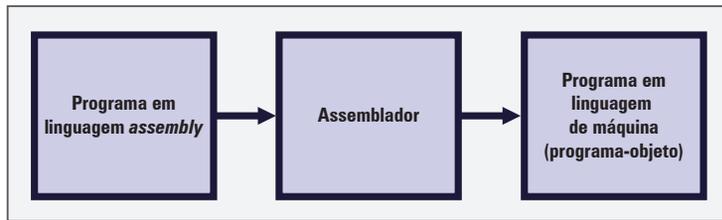


Figura 168 - Assemblador

Enquanto as linguagens de alto nível utilizam um programa chamado **compilador** para converter sua linguagem em código de máquina. Cada uma das linguagens de alto nível possui um compilador específico, tornando possível sua utilização em qualquer computador. Algumas linguagens de alto nível utilizam outro programa para realizar sua conversão em binário, o qual é denominado interpretador.

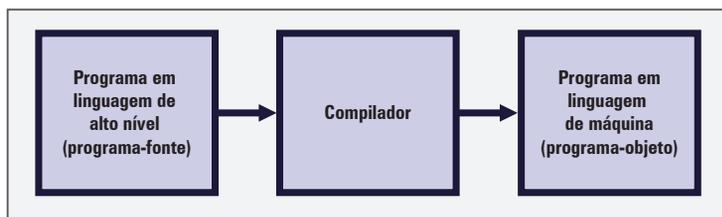


Figura 169 - Compilador

As linguagens utilizadas para escrever um programa (*assembly* ou alto nível) também são referenciadas como programa-fonte. Por seu turno, o resultado da conversão do programa-fonte para o binário recebe o nome de programa-objeto. A Tabela 67 mostra um resumo das linguagens do computador com seus respectivos conversores.

Tabela 67 - Programas-fonte, objeto e conversores

Programa-fonte	Conversor	Programa-objeto
Máquina (binário)	-	Binário
<i>Assembly</i>	Assemblador (<i>assembler</i>)	Binário
Alto nível	Compilador/interpretador	Binário

Fonte: Elaboração dos autores.

Fluxogramas

As linguagens de programação estão presentes nos mais diversos equipamentos eletrônicos dos vários setores do mercado. Suas aplicações são extensas e cada programa é criado para um fim específico. Uma esteira eletrônica em determinada fábrica pode permitir a passagem de um número X de produtos e, logo em seguida, parar ou acender uma luz ou até mesmo tocar um alarme. Os programas permitem que as máquinas trabalhem de acordo com a necessidade do usuário ou se uma condição for satisfeita. Assim, a programação se torna ferramenta fundamental para uma sociedade cada vez mais tecnológica.



Compilador: *software* que realiza a conversão da linguagem de alto nível, empregada por alguns *softwares*, em linguagem de máquina, chamada também de linguagem de baixo nível.

Para a criação de um programa, é necessário expor o que ele vai fazer. O exemplo da Figura 157 quer que o computador some uma lista de números localizados na memória até que o último número da lista seja o zero. Ele serve para indicar o final da lista. Os passos a serem seguidos pelo computador são:

- determinar o local na memória em que será armazenado o resultado da soma dos números;
- indicar o primeiro número da lista;
- verificar se o número é zero. Em caso afirmativo, finalizar a soma;
- se o número não for zero, somar este número e armazená-lo na memória;
- indicar o próximo número da lista;
- repetir os passos 3, 4 e 5 até chegar ao último número da lista.

A representação da sequência dos passos de um programa é comumente feita por intermédio de **fluxogramas**, auxiliando os estudantes e projetistas a escreverem as linhas do programa, bem como na atualização e correção de falhas. Em seguida, a Figura 170 mostra o fluxograma do programa supracitado.



Fluxograma:
simbologia gráfica usada para representar os passos realizados pelo *software* para a execução de suas funções.

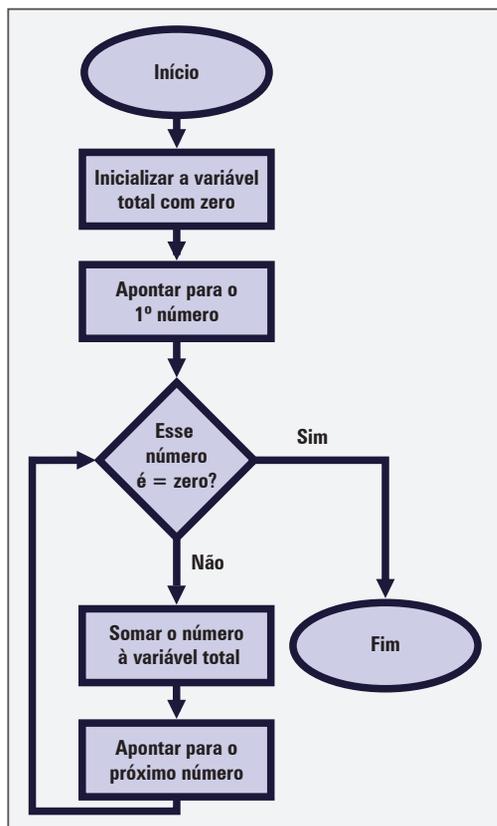
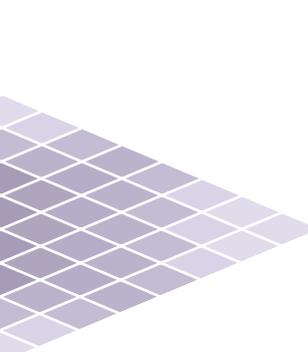


Figura 170 - Fluxograma (arrumar as linhas)

Resumindo

Neste capítulo, foi abordada a evolução dos computadores, desde o ábaco – considerado a primeira máquina no auxílio à contagem – às atuais gerações. Também foi estudada a estrutura interna do computador, com seus elementos básicos, processador, memórias e os diversos tipos de periférico de entrada e saída de dados.

Em seguida, foi mostrada a sequência de procedimentos para a execução de um programa do computador e as nomenclaturas utilizadas. Ademais, foi apresentado o programa responsável por converter as diversas linguagens (programa-fonte) para a linguagem de máquina (programa-objeto) e a utilização do fluxograma – uma ferramenta muito empregada na escrita dos programas. Dessa maneira, facilita o entendimento e a apuração de falhas e erros.



Unidade 4

Eletrônica III – comunicação de dados

A evolução das aeronaves, e conseqüentemente sua eletrônica embarcada, tem exigido a incorporação de novos sistemas para o funcionamento dos aviões e apoio à sua correta navegação. Nesse cenário, a comunicação de dados desempenha papel essencial, pois os equipamentos de bordo têm utilizado a troca de dados entre sistemas e entre estes e toda a estrutura aeronáutica, a fim de assegurar o tráfego aéreo brasileiro.

A comunicação de dados será tratada nesta unidade em quatro capítulos, apresentando a estrutura básica de um barramento de dados, o uso do computador com os microprocessadores para o controle do barramento e os sistemas aviônicos que utilizam da troca de dados.

O capítulo um aborda os conceitos do barramento de dados e de tipos e utilidades do protocolo digital. O computador com sua estrutura física básica, suas linguagens de programação e *softwares* será explicado no capítulo dois. O capítulo três traz o microprocessador, que faz parte da estrutura elementar de um computador, sendo analisado na sua arquitetura básica e em operação, explicando, assim, como seu funcionamento proporciona a concepção do computador moderno. Por fim, os sistemas aviônicos, que utilizam estruturas computadorizadas, e a comunicação de dados, serão explicados no capítulo quatro.

Capítulo 1

Barramento de dados

Barramento de dados é formado por várias vias, também chamadas de caminhos, por onde trafegam os dados e as mensagens enviadas ou recebidas por equipamentos. A quantidade e os tipos de caminhos dependem do sistema, pois existem barramentos para comunicações constituídos de um único caminho e outros que utilizam dezenas deles.

A fim de que informações transitem por barramentos dentro das aeronaves, é necessário entender vários conceitos relacionados à transmissão e à recepção de dados, como as técnicas e os padrões utilizados.

Um primeiro aspecto a ser considerado são as técnicas usadas para transmissão de dados. Assim, esses padrões e normas empregados levam informações de um ponto a outro de um sistema, mantendo as características originais da informação. É importante seguir modelos para a transmissão, pois isso garante a intercomunicação correta e eficiente entre sistemas, ainda que não sejam equipamentos de mesmo fabricante.

1.1 Introdução ao barramento de dados

Existem vários órgãos de padronização no mundo. A seguir, estão relacionados os dois mais importantes.

- a) Organização de Padrões Internacionais, em inglês, *International Organization for Standardization* (ISO) - as normas da ISO atuam em todos os tipos de padrões, como na área de sistemas abertos e interoperabilidade de sistemas. Estes, por sua vez, integram o sistema aberto de interconexão, em inglês, *open system interconnection* (OSI). Nos Estados Unidos da América, a ISO é representada pelo Instituto Nacional Americano de Padrões, em inglês, *American National Standards Institute* (ANSI), e no Brasil, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- b) Associação das Indústrias Eletroeletrônicas, em inglês, *Electronics Industries Association* (EIA) - é formada pela associação de fabricantes norte-americanos de rádio e televisão que tem contribuído com várias normas, as quais, posteriormente, têm sido padronizadas por outros órgãos internacionais.

A comunicação de dados entre dois equipamentos, seja de modo aéreo ou físico, é feita de forma serial ou paralela.

Na transmissão serial, os dados são enviados um após o outro, como se estivessem em uma fila. Esse tipo de transmissão é realizado apenas com dados digitais (*bits*), por exemplo. Se for transmitida uma palavra digital de 8 *bits*, ela será dividida em oito partes, que serão transmitidas uma após a outra.



Dado: qualquer informação que esteja sendo processada pelo computador.

Interoperabilidade: capacidade de comunicação entre sistemas, sendo essa troca feita de forma transparente e compatível.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Entidade privada e sem fins lucrativos, fundada em 1940, responsável por toda normalização para a produção de bens e serviços no Brasil, seguindo as orientações de órgãos normativos internacionais da padronização de equipamentos eletrônicos no Brasil.

Na transmissão paralela, vários dados são enviados ao mesmo tempo. Com propósito exemplificativo, para transmitir uma palavra digital de 4 *bits*, o sistema deve possuir quatro caminhos (cabos) para que cada *bit* passe por um. Enquanto a transmissão paralela utiliza vários cabos, a serial usa apenas um (Figura 1).

Quando a transmissão dos *bits* se dá de modo serial, a velocidade de transmissão é expressa em *bits* por segundo. Assim, uma velocidade de 1 Kbps significa que 1.000 *bits* (1 kilo = 1.000 = 103) serão transmitidos por segundo.

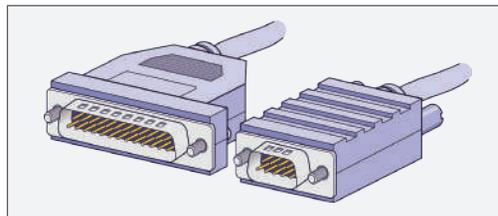


Figura 1 - Cabos para comunicação serial e paralela

Não há possibilidade de a transmissão paralela ser feita por longas distâncias, devido à interferência causada entre os cabos. Esse efeito é chamado de **autoindução** e impede a transmissão de dados de forma paralela por longas distâncias.

Na transmissão serial, a vantagem é a redução de custo, pois são usados menos cabos para transmitir **serialmente**, comparando ao modo paralelo. Esse sistema de transmissão é o mais utilizado para longas distâncias, como as linhas telefônicas, enquanto o sistema paralelo é usado para curtas distâncias, empregando os barramentos de dados externos e internos aos microprocessadores.

Na transmissão serial ou paralela, os dados trafegam de três modos diferentes: *simplex* (simples), *half duplex* (semiduplo) e *full duplex* (duplo).

No sistema *simplex*, a transmissão de dados é realizada apenas em um sentido, com a utilização de um único par de fios. Um exemplo de transmissão *simplex* é a transmissão de TV.

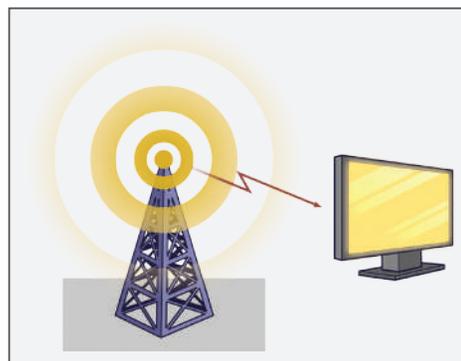


Figura 2 - Transmissão tipo *simplex*

No sistema *half duplex*, também chamado de semi *duplex*, a transmissão dos dados é feita nos dois sentidos. Entretanto, ela não é simultânea, ocasionando a necessidade de sincronismo. Quando um sistema transmite, o outro precisa receber, caso contrário, a informação será perdida. Apenas dois fios são usados nesse sistema. Um exemplo de transmissão *half duplex* é utilizado pelo



Autoindução: efeito indutivo causado em fios que passam paralelos a outros fios onde esteja circulando corrente elétrica.

Serialmente: método de transmissão dos dados *bits*, um após o outro, utilizando, assim, uma única via de comunicação serial.



walkie talkie, pois, quando alguém está falando no aparelho, os outros não transmitem, uma vez que haverá perda de informação.

Walkie talkie: tipo de transceptor, pois transmite e recebe sinais de áudio por meio de ondas de rádio.



Figura 3 - Transmissão tipo *half duplex* (rádio *walkie talkie*)

No sistema *full duplex*, a transmissão dos dados é feita nos dois sentidos e pode ser simultânea. Para implementá-lo, são usados quatro fios. Um exemplo é o sistema telefônico comum.



Figura 4 - Transmissão tipo *full duplex*

Independentemente do tipo de transmissão, todos são utilizados tanto por meio físico quanto por transmissão de rádio. O meio a ser empregado dependerá apenas do tipo de sistema.

Todo dado transmitido precisa possuir sincronismo para o transmissor e o receptor identificarem o início e o fim da informação que está sendo transmitida. Existem dois tipos de sincronização: síncrona e assíncrona.

- Transmissão tipo síncrona - os dados são divididos em pedaços ou pacotes e, para cada pacote, existe uma sincronização. Um exemplo de sistema síncrono são os protocolos, que dividem a mensagem em vários pacotes de informações para os quais é enviado o sincronismo.
- Transmissão tipo assíncrona - o sincronismo não é realizado constantemente durante a transmissão, porque a mensagem é dividida caractere por caractere. Como exemplo, está a antiga transmissão telegráfica, na qual, para cada caractere de uma palavra, era feito o sincronismo e todo o conjunto de palavras formava a mensagem completa.

Os avanços tecnológicos têm levado os fabricantes a integrarem os diversos sistemas que compõem os aviões modernos. Além disso, a eletrônica embarcada está ficando cada vez maior e essencial à viabilização de comodidades aos passageiros e recursos técnicos para um voo mais seguro e econômico.

O aumento de aparatos eletrônicos levou à evolução da tecnologia necessária para interligar esses vários equipamentos. Assim, os protocolos de comunicação têm viabilizado a troca de informações entre os diversos equipamentos de uma aeronave.

O compartilhamento das informações disponíveis em cada componente do sistema tem sido fundamental para o conveniente funcionamento das aplicações. Nesse sentido, a utilização de sistemas eletrônicos interligados, os quais compartilham informações entre si, facilita o projeto e viabiliza a execução de inúmeras tarefas. De outra maneira, isso só seria possível com a aplicação de sensores e atuadores redundantes e de excessiva quantidade de cabeamento elétrico.

Sistemas desenvolvidos dentro desse contexto têm sido disponibilizados pelos mais variados fornecedores de sistemas eletrônicos, proporcionando uma ideia de sistema único.

As formas como os diversos sistemas de controle são implementadas e interconectadas em uma aplicação embarcada denominam-se arquiteturas eletroeletrônicas (ou simplesmente arquiteturas elétricas). Elas são divididas em três grandes grupos:

- arquitetura centralizada;
- arquitetura semidistribuída;
- arquitetura distribuída.

Para as arquiteturas semidistribuída e distribuída, é necessário utilizar os chamados protocolos de comunicação digital. Por intermédio destes últimos, é feita a interconexão das unidades eletrônicas de controle, em inglês, *engine control unit* (ECU), e a troca dos dados pertinentes a cada uma das funções controladas pelo sistema.

O protocolo de comunicação de dados é um conjunto de regras que controla a comunicação, tornando-a eficiente e livre de erros. Um dos objetivos principais do protocolo é detectar e evitar a perda de dados ao longo da transmissão, solicitando a retransmissão deles, caso seja necessário.

O protocolo pode estar incorporado a um *firmware* (*software* residente no microcontrolador) para alguns equipamentos. Eles recebem ou enviam os dados a serem transmitidos, realizando as funções de agregar no início e no fim da mensagem transferida:

- os caracteres de controle;
- a confirmação de recebimento;
- o controle de sequência das mensagens ou blocos de dados transmitidos;
- os cálculos e a checagem do algoritmo de detecção de erros;
- outros controles necessários a uma boa transmissão.

Todas as funções citadas são controladas e definidas pelo protocolo.

A transmissão de dados, ao longo de um meio de transmissão, pode ser realizada de diversas formas, pois os protocolos conseguem controlar essa função, sendo possíveis as seguintes formas de transmissão.



Firmware:
pequeno *software* formado por um conjunto de instruções próprias do equipamento, as quais são carregadas diretamente no *hardware* a ser controlado.

- a) Transmissão por circuito - existe uma linha física entre os pontos da comunicação. Os dados percorrem sempre o mesmo caminho físico e fixo ou, então, criado temporariamente, não sendo compartilhado. As conexões telefônicas são um exemplo típico de comutação de circuitos, pois, em uma ligação telefônica, existe um caminho direto e fixo entre o transmissor e o receptor.
- b) Transmissão por mensagem - não existe uma linha física dedicada entre os pontos da comunicação. Os dados são enviados através dos nós da rede, por meio dos caminhos disponíveis para a transmissão. A mensagem, dado do sistema, vai sendo transportada de um ponto da rede para outro até atingir o seu destino final. O sistema não garante a ordem de entrega das mensagens, mas é possível que o protocolo monte a mensagem final de acordo com a original transmitida. Caso ocorra perda de mensagem no caminho da transmissão, ela é retransmitida. O tamanho dessa mensagem não é padrão, variando de um protocolo para outro.
- c) Transmissão por pacote - método mais usado para transmissão de dados em redes de computadores. As mensagens são divididas em pedaços, isto é, pacotes menores, cujo tamanho depende do sistema. Estes podem seguir por caminhos diferentes ao longo da rede e, ao chegarem ao destino, são reagrupados e colocados em ordem. Existe um gerenciamento do fluxo de pacotes em que é feito o controle da sequência deles dentro da rede.

Os protocolos de comunicação de dados são fundamentais para que ocorra transferência de informações de forma correta e segura. A falta deles na transmissão por barramentos pode corromper a integridade dos dados ao longo da transmissão, inviabilizando a comunicação entre os programas, computadores e outros equipamentos eletrônicos.

O protocolo é um programa agregado à interface de comunicação, com o objetivo básico de garantir a chegada de um dado qualquer a outro ponto, da mesma forma como foi transmitido. A integridade dos dados é mantida, independentemente do meio utilizado na transmissão, como, por exemplo, linha discada telefônica, barramentos de dados, canais de voz, satélite, ou qualquer outro meio de transmissão. Isso porque o controle da transmissão é feito nas pontas, na chegada do dado ao destino.

O protocolo coloca caracteres de controle no início e no fim de cada bloco de dados transmitido. Quando chegam ao destino, esses controles são conferidos pelo protocolo do receptor. Se na transmissão ocorre algum erro, o protocolo detecta esse erro e o envia novamente até chegar corretamente. Assim, o protocolo é responsável por:

- sincronização da comunicação entre dois pontos;
- detecção de erros ocorridos no meio da transmissão para retransmitir a informação;
- controle de fluxo de informações entre dois pontos, superando problemas de meio físico ou caminho percorrido pela informação.

1.2 Protocolo digital

O desenvolvimento da eletrônica presente nas aeronaves modernas se deu em função dos protocolos digitais utilizados nos barramentos de comunicação. Protocolo é um *software* que proporciona um padrão de comunicação de dados dentro de uma estrutura de barramento. O rádio aeronáutico associado, em inglês, *aeronautical radio incorporated* (ARINC), por intermédio do ARINC - 429, foi o primeiro modelo de protocolo utilizado na aviação.

Com a concepção do protocolo, foi possível implementar barramentos de dados internos ao avião e, assim, diminuir seu peso, melhorando o consumo de combustível. Além disso, proporcionou a incorporação de equipamentos eletrônicos mais modernos capazes de atender às necessidades tecnológicas da aviação.

O protocolo MIL-STD-1553, modelo elaborado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, foi desenvolvido no primeiro momento para aplicações militares em aviões de caça-bombardeiro. Atualmente, está sendo utilizado também em aplicações espaciais.

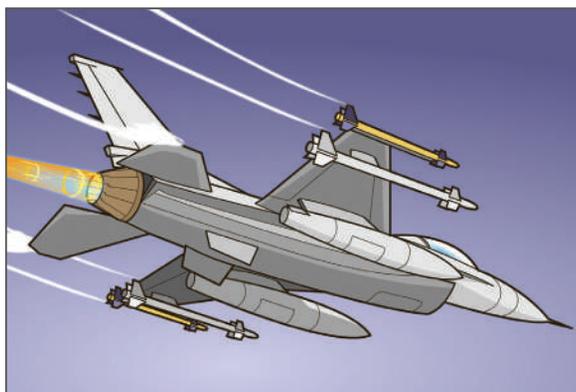


Figura 5 - Tipo de caça que utiliza protocolo MIL-STD-1553

Os equipamentos eletrônicos que utilizam protocolos digitais facilitam a atualização do sistema, pois, se tratando de um *software*, sua atualização não implica necessariamente mudanças de estrutura física. A manutenção também é otimizada em aeronaves que usam protocolos, porque as partes são mais bem identificadas por meio do emprego de computadores que podem ser conectados ao barramento de dados da aeronave.

O avião que possui um sistema de protocolo interno carrega uma rede de equipamentos eletrônicos. Ele é semelhante ao funcionamento da internet, mas, em vez de interligar computadores, interliga equipamentos. Assim, como se trata de uma rede, é possível relacionar também os aviões por meio de uma malha sem fio, criando uma rede mundial de aviões. Em resumo, esta poderá melhorar todo o funcionamento da malha aérea mundial em um futuro próximo.

1.2.1 Protocolo ARINC 429

Protocolo muito utilizado na aviação civil de passageiro ou carga, o ARINC 429 determina o modo como os equipamentos eletrônicos internos do avião se comunicam e a estrutura física adequada para seu funcionamento. Ele trabalha com taxas unidirecionais, em um único sentido, de transmissão de 12,5 a 100 Kbps. Para isso, utiliza barramentos formados por dois fios que interligam todos os módulos controláveis, constituindo uma rede do tipo ponto a ponto.

Os módulos do barramento transmitem e recebem as mensagens geradas pelo protocolo, sendo possível comandar até 20 deles. Esses módulos controláveis são os equipamentos eletrônicos ligados ao barramento, como, por exemplo, o radar meteorológico, o radioaltímetro, entre vários outros possíveis de equipar um avião.

O protocolo é responsável por ajustar a mensagem ao meio físico para onde será transmitida, isto é, quando for adequada ao barramento. Desse modo, o ARINC 429 transforma as mensagens em sinais elétricos e as transmite no fio, empregando, para isso, a codificação do tipo retorno a zero, em inglês, *return zero* (RZ), com duas polaridades (bipolar).

Todo transmissor, antes de enviar determinada mensagem, conduz uma solicitação de envio que será respondida pelo receptor caso este esteja disponível, pronto para atender. O tamanho de uma palavra no ARINC 429 é de 32 *bits*, dos quais apenas 19 são *bits* de dados. Os outros são responsáveis pela verificação de **paridade**, pelo destino da mensagem e pelas condições do sistema. A forma de onda do sinal do ARINC 429 é mostrada na Figura 6.

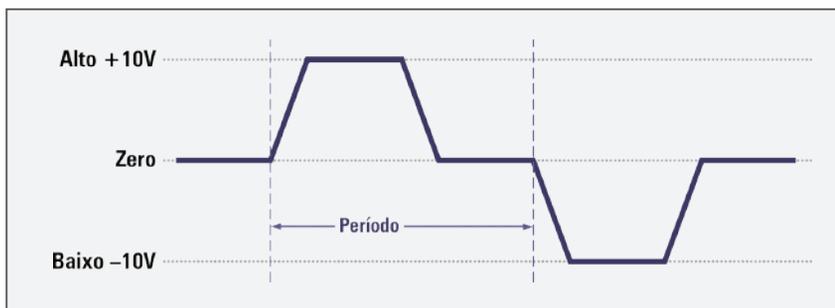


Figura 6 - Forma de onda RZ bipolar usada na transmissão do protocolo ARINC 429

1.2.2 Protocolo MIL-STD-1553B

O protocolo MIL-STD-1553 é de uso militar, também conhecido como 1553, na sua versão mais recente: 1553B. O barramento de dados padrão 1553B utiliza a modulação por divisão de tempo, em inglês, *time division multiplexing* (TDM), com comando e resposta operando no modo assíncrono, sincronismo a cada transmissão e a transmissão operando no modo *semi duplex*.



Paridade: recurso digital para verificar a validade do dado que foi transmitido.

TDM: modulação usada para a transmissão de vários sinais digitais em um mesmo meio.

A estrutura do barramento é uma linha de transmissão composta de um par trançado de cabos blindados. Ele é feito para constituir o barramento principal e de vários trechos de linha, em inglês, *stubs*, que interligam os equipamentos ao barramento principal.

A taxa de transferência do protocolo MIL-STD-1553 é de 1 Mbps, imposta pela limitação tecnológica da época de implementação do protocolo (1978), empregado em aplicações militares, integrando os diversos sistemas do avião.

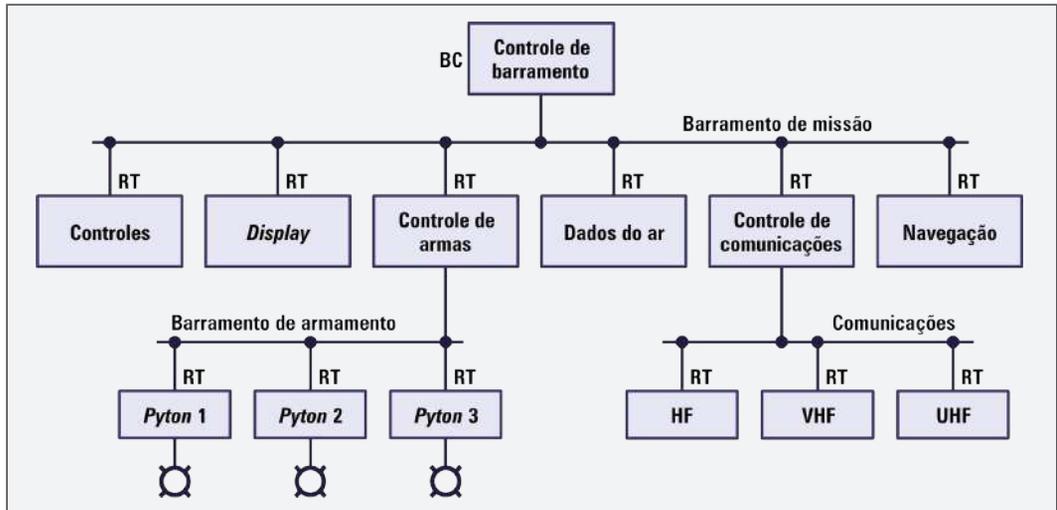


Figura 7 - Barramento do MIL-STD-1553 interligando sistemas de um avião

A Figura 7 mostra o componente mais importante no barramento 1553B, o chamado controlador de barramento, em inglês, *bus controller* (BC). Ele monitora o fluxo dos dados de todas as transmissões realizadas. Outro elemento básico nesse protocolo é o terminal remoto, em inglês, *remote terminal* (RT), condutor dos dados dos subsistemas ao BC. Em caso de falha do BC, o RT assume suas responsabilidades, uma vez que possui capacidade própria de processamento.

A norma MIL-STD-1553B foi projetada para interligar, no máximo, 31 terminais de barramento RT. Assim, os aviônicos, os equipamentos de comunicação, os armamentos e outros componentes não devem passar de 31.

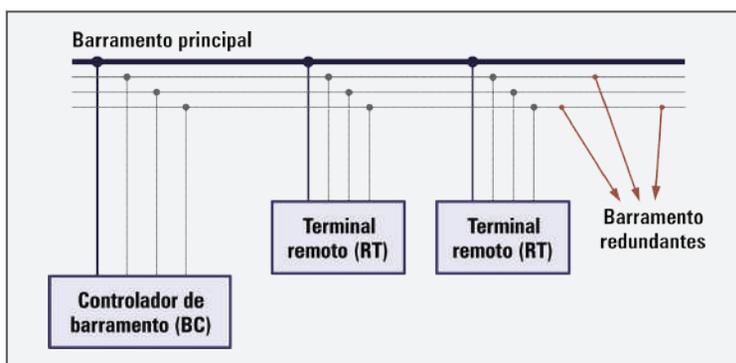


Figura 8 - Barramentos redundantes do MIL-STD-1553B

Outra importante característica do MIL-STD-1553 é a possibilidade de trabalhar com barramentos redundantes, cabos extras, fundamentais nas aplicações militares, conforme pode ser observado na Figura 8. Caso ocorram problemas de transmissão com os cabos principais, os redundantes passam a funcionar no lugar. Com isso, o piloto não corre o risco de ficar sem o serviço de um equipamento fundamental no avião.

As mensagens no 1553B são formadas por palavras de 20 *bits*, dos quais 16 são utilizados para dados, 3 para sincronização e 1 para paridade.

A paridade usada no MIL-STD-1553B é ímpar. A Tabela 1 mostra o padrão da palavra empregada no 1553B.

Tabela 1 - Formato da palavra no sistema MIL-STD-1553B

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3			16																1
Sincronismo			Bits que formam a palavra de comando, de estado ou de dados																P

Fonte: Elaboração do autor.

Os três *bits* indicados como sincronismo na Tabela 1 são usados para viabilizar o sincronismo entre as transmissões. A letra (P) na tabela anterior significa paridade, que, no 1553B, utiliza a paridade ímpar. Os *bits* que formam as palavras de transmissão do 1553B usam uma codificação de sinal conforme demonstrado na Figura 9.

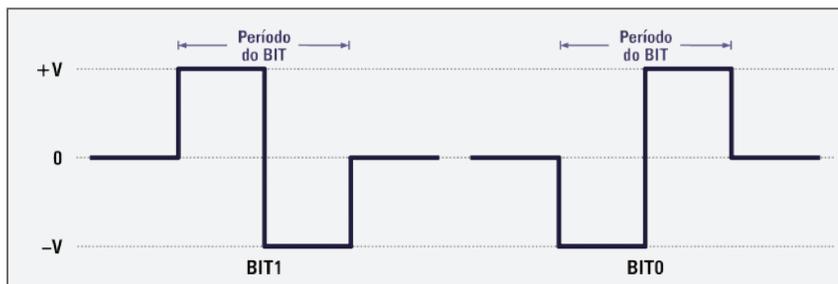


Figura 9 - Forma de onda usada na transmissão do protocolo MIL-STD-1553B

Na Figura 9, o sinal que representa o *bit* 1, à esquerda, é formado pela variação do sinal de positivo (nível alto) por meio período, seguido pela variação do sinal de negativo (nível baixo) por meio período. O oposto ocorre para o *bit* 0, à direita da figura, variação do sinal de negativo (nível baixo) por meio período, seguido pela variação do sinal de positivo (nível alto) por meio período.

Na palavra do protocolo MIL-STD-1553B, existem 16 *bits* destinados a formar a palavra que leva à informação desejada pelo BC. Existem três tipos de palavras no 1553B que podem estar dentro dos 16 *bits* previstos.

- a) Palavra de comando - só é enviada pelo BC para controlar ou requisitar algo a determinado RT. Dentro dos 16 *bits*, existem: o endereço do terminal remoto, indicação de transmissão ou recepção (T/R), um subendereço de RT ou comando de modo e um contador da palavra de dado ou o código do modo. Na Tabela 2, é apresentada a palavra de comando do 1553B.

Tabela 2 - Formato da palavra de comando do MIL-STD-1553B

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3			5					1	5					5					1
Sincronismo			Endereço de terminal remoto					T/R	Subendereço do RT ou Comando de modo					Contador da palavra de dados ou código de modo					P

Fonte: Elaboração do autor.

b) Palavra de estado - é utilizada no 1553B. Necessária à indicação de erro no comando enviado pelo BC por parte do RT. Assim, este último verifica o comando enviado pelo primeiro e retorna uma palavra de estado para ele, indicando se conseguiu interpretar adequadamente a requisição do BC. A Tabela 3 mostra o formato da palavra de estado.

Tabela 3 - Formato da palavra de estado do MIL-STD-1553B

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3			5					1	1	1	3			1	1	1	1	1	1
Sincronismo			Endereço de terminal remoto					EM	I	RS	Reservado			RCB	B	BS	CBD	BT	P

Fonte: Elaboração do autor.

c) Palavra de dados - tem a finalidade de enviar dados entre RTs e BC e vice-versa e também trocar dados entre RTs. Esses dados trocados no 1553B são informações que um equipamento manda para outro. Por exemplo, o BC requisita a temperatura de um equipamento e este envia a resposta para ele.

Tabela 4 - Formato da palavra de dados do MIL-STD-1553B

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3			16																1
Sincronismo			Bits que formam a palavra de comando, de estado ou de dados																P

Fonte: Elaboração do autor.

1.2.3 Protocolo STANAG 3910

O acordo de normalização, em inglês, *standardization agreement* (STANAG 3910), foi utilizado no desenvolvimento de aeronaves de caça, em inglês, *eurofighter typhoon*, pois o MIL-STD-1553 não teria capacidade de transmissão de dados suficiente para atender aos requisitos dos sistemas embarcados dessa nova aeronave. De qualquer forma, o STANAG é fortemente baseado e compatível com o MIL-STD-1553B, possuidor de duas redes de fibra óptica redundantes, podendo operar em até 20 Mbps ao trabalhar na topologia tipo estrela.

O protocolo STANAG 3910 suporta até 31 módulos conectados à rede, havendo a possibilidade de cada qual trabalhar em até duas redes distintas, uma de baixa e outra de alta velocidade. Nas redes de alta velocidade baseadas no STANAG, as mensagens podem ter de 624 a 65.548 bits.

A tecnologia ótica foi selecionada para o barramento do STANAG especialmente por eliminar as interferências eletromagnéticas e por reduzir a sensibilidade às descargas elétricas, à radiação e aos pulsos eletromagnéticos nucleares, em inglês, *nuclear electromagnetic pulse* (NEMP).

1.2.4 Protocolo ARINC 419

O protocolo ARINC 419 determinou padronizações de transmissão de dados em aeronaves anteriores ao protocolo ARINC 429. A palavra no ARINC 419 é formada por 32 bits. Assim como no ARINC 429, dependendo da aeronave, é possível usar seis fios para a transmissão, como também dois fios de par trançado com blindagem ou cabo coaxial.



Sistema embarcado: sistema microprocessado para realizar uma função específica; é aquele localizado em veículos e aeronaves.

Topologia: modo como computadores ou equipamentos de comunicação de dados estão interligados fisicamente ou não via rede de dados.

NEMP: do inglês *nuclear electromagnetic pulse*; é um pulso eletromagnético de grande amplitude gerado por explosão nuclear.

A forma de onda do sinal do ARINC 419 varia entre dois níveis lógicos, alto/baixo, ou entre três estados lógicos, alto/baixo/nulo. O sinal que representa os níveis lógicos do ARINC 419 varia entre dois níveis de tensão, assim como o ARINC 429. Além disso, a taxa de transferência de dados no barramento chega até 12 Kbps.

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que o barramento de dados presente nas aeronaves modernas possibilita o funcionamento dos diversos equipamentos eletrônicos que hoje fazem parte dos sistemas de bordo. Para serem efetivos na transmissão dos dados, os barramentos seguem os conceitos básicos de transmissão e recepção de sinais como sincronismo, modo como o dado trafega no barramento, entre outros conceitos, sempre seguindo as normas de telecomunicação para padronização de funcionamento internacional.

Ademais, foi apresentado como os protocolos, com suas características, viabilizam a troca de dados entre os diversos equipamentos que formam os sistemas embarcados das aeronaves. Protocolos importantes como o MIL-STD-1553B, ARINC 429 e STANAG 3910 são utilizados pelos fabricantes de sistemas embarcados de aviões.

Capítulo 2

Computador

O sistema aviônico de uma aeronave é composto de vários equipamentos que se comunicam entre si. Essa comunicação é realizada por intermédio de barramentos e protocolos específicos gerenciados e controlados por computadores.

Como as informações fornecidas pelos equipamentos são de extrema importância para o piloto executar os procedimentos de voo com segurança, o sistema aviônico possui dois computadores disponíveis, trabalhando em **redundância**. Eles são configurados como principal e reserva. Além disso, autotestes são realizados com o objetivo de verificar qual deles possui melhor desempenho para assumir a posição principal.



Redundância: duplicação de um meio de transmissão, independente se para isso está sendo utilizado um meio físico ou um sistema rádio.

2.1 Estrutura básica

Os computadores são responsáveis, dentre outros, por:

- gerenciar os rádios e as interfaces;
- gerar imagens e vídeos;
- informar o desempenho do motor;
- controlar armamentos;
- calcular a navegação;
- gerenciar o combustível.

Por esses motivos, eles são considerados o coração do sistema, visto que são essenciais para as aeronaves cada vez mais modernizadas. A Figura 10 mostra o sistema aviônico de uma aeronave controlado por computadores.

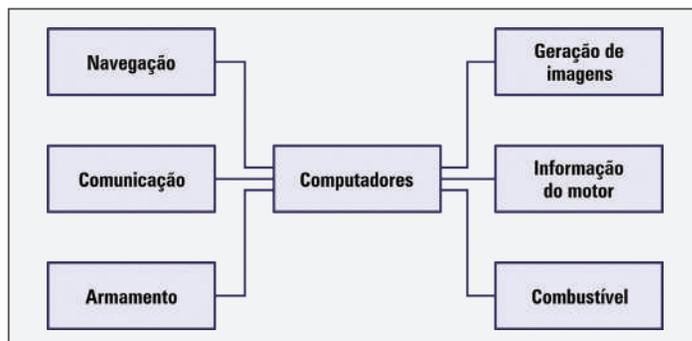


Figura 10 - Sistema aviônico

O sistema de processamento de informações recebe diferentes nomes, de acordo com o tipo da aeronave. Por essa razão, neste estudo não será adotado nenhum nome específico para os dois computadores que processam as informações dos aviões.

O controle de todo o sistema é efetuado mediante barramentos redundantes, e a comunicação entre computadores e equipamentos é realizada por meio de diversos protocolos, como: 1553B, ARINC 429, RS 422 e Ethernet. Toda informação processada pelos computadores é apresentada em *displays* de cristal líquido, em inglês, *liquid crystal display* (LCD), localizados na cabine do piloto (*cockpit*). Este recebe o nome de *display* multifuncional em cores, em inglês, *color multifunction display* (CMFD), conforme mostrado na Figura 11.



Display: tela ou mostrador; componente eletrônico responsável por mostrar imagens, números e qualquer outra informação de modo visual.

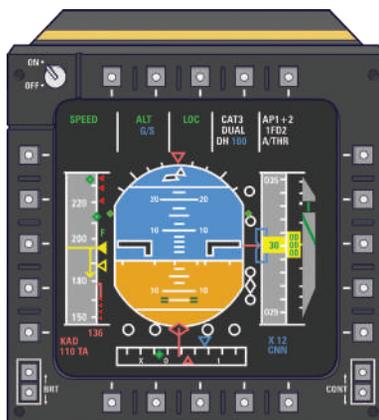


Figura 11 - CMFD

A presença de CMFDs e outros equipamentos atualizados nas cabines das aeronaves cooperaram muito para o aumento da segurança do voo. O piloto, antes preocupado em controlar todas as informações dos antigos *displays* analógicos, agora foca sua atenção nos procedimentos referentes ao voo. Isso porque o sistema possui alertas virtuais e sonoros para situações de risco e de falhas de equipamentos. A Figura 12 mostra a cabine de uma aeronave que não foi modernizada.



Figura 12 - Cabine não modernizada
Fonte: Agência Força Aérea / © Sgt Rezende



As aeronaves renovadas, por sua vez, possuem as cabines com a substituição dos equipamentos analógicos por digitais, conforme a Figura 13. Esse tipo de cabine é comumente chamado de *glass cockpit*.

Glass cockpit: cabine de aeronave que possui instrumentos eletrônicos de voo com *displays* digitais de visualização.



Figura 13 - Cabine modernizada ou *glass cockpit*
Fonte: Agência Força Aérea / © Sgt Johnson

A linguagem adotada para os equipamentos aviônicos e manuais na aviação é, frequentemente, utilizada em língua inglesa. Assim, é comum alguns termos não possuírem uma tradução literal em português, por isso, são substituídos por uma frase ou uma expressão. Todo equipamento de uma aeronave recebe o nome de unidade substituível na pista, em inglês, *line replaceable unit* (LRU).

Já as partes integrantes de uma LRU recebem o nome de unidade substituível em oficina, em inglês, *shop replaceable unit* (SRU). O computador da aeronave é uma LRU que possui uma arquitetura modular, isto é, sua estrutura é dividida em módulos. Cada um desses módulos é considerado uma SRU e possui função específica. Para alterar ou acrescentar as funções do computador, é necessário acrescentar ou alterar os módulos que ele possui.

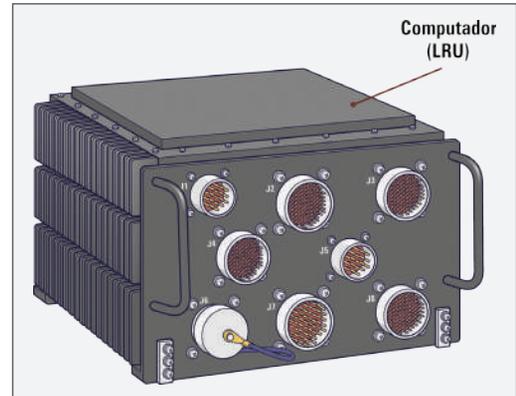


Figura 14 - LRU

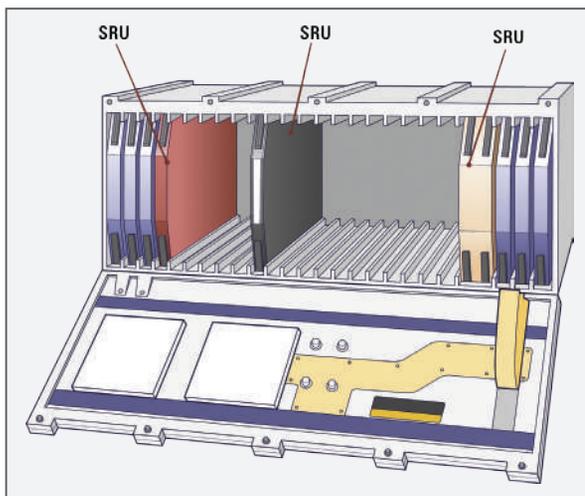


Figura 15 - Módulos do computador do avião (SRU)

Cada SRU do computador possui um processador próprio, o que a torna independente e autônoma. Por esse motivo, cada unidade é responsável por realizar o seu autoteste, além de possuir uma função específica, o processamento de imagens e cálculos.

2.1.1 Autotestes

Existem três tipos de autotestes nos computadores do avião. Esse procedimento também recebe o nome de *bit*, em inglês, *built-in test*. São eles:

- autoteste de inicialização, em inglês, *power-up built-in test* (PBIT) - é executado automaticamente toda vez que o computador é ligado e verifica se o equipamento apresenta condições mínimas de operação;
- autoteste contínuo, em inglês, *continuous built-in test* (CBIT) - é realizado automática e continuamente. Ao verificar que o computador principal apresenta mais falhas que o reserva, a **comutação** é feita imediatamente trocando-se as posições dos computadores. O CBIT mantém sempre o computador com melhor desempenho como o principal;
- autoteste iniciado por sistema ou operador, em inglês, *self built-in test* (SBIT) - é um tipo de autoteste ativado por meio do sistema ou pelo próprio operador, caso ele perceba a necessidade.



Built-in test: autoteste realizado pelo próprio equipamento para verificar se os circuitos internos estão operando adequadamente.

Comutação: troca ou permuta do equipamento em si. O avião possui dois computadores que são comutados automaticamente, mantendo sempre o de melhor desempenho.

2.1.2 Redundância

Todas as aeronaves modernizadas têm dois computadores, um principal e um reserva, para garantir que suas informações tenham um alto nível de confiabilidade e sejam fornecidas ao piloto de forma adequada. O sistema de redundância garante que um computador opere de modo eficaz mesmo estando sozinho, caso todas as saídas do outro sejam desconectadas do sistema.

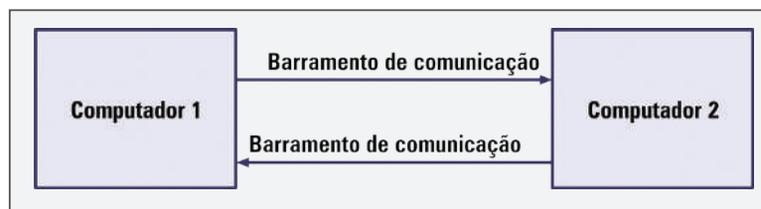


Figura 16 - Redundância de computadores

Além do processo automático de definição sobre qual computador será o principal, o piloto da aeronave também pode tomar essa decisão.

Quando o computador principal é desligado, automaticamente o reserva assume a posição principal. Feito isso, o computador que estava desligado é ligado novamente, assumindo a posição de reserva. Esse procedimento é útil quando os dois computadores apresentam falhas distintas e a decisão fica a critério do piloto.

Quando o computador opera como principal, ele controla e processa todas as informações e funções do sistema, enquanto o outro permanece como reserva. Além disso, ele é responsável por executar autotestes e determinar qual será o principal e qual será o reserva.

O computador reserva não executa nenhuma função do sistema. Ele recebe informações do computador principal e se mantém atualizado caso exista a necessidade de comutação entre eles. Dessa forma, o reserva se comunica apenas com o computador principal. Ele também executa seu próprio CBIT e informa as falhas ao principal.

2.2 Linguagem de programação

A linguagem de programação de alto nível em sistemas embarcados é muito comum atualmente devido à simplicidade na escrita das instruções do programa. De outro modo, as linguagens de baixo nível exigem um grande número de procedimentos para executar uma simples tarefa. Ao receber as instruções, o compilador do programa faz a conversão de cada instrução em código de máquina para ser executada.



Figura 17 - Conversão da linguagem de alto nível para linguagem de máquina

As linguagens de alto nível, a seguir, são muito comuns nos equipamentos eletrônicos. Cada uma tem um objetivo específico.

a) Fortran

Criada na década de 1950, foi uma das primeiras linguagens de alto nível a ser desenvolvida. É utilizada até hoje nas versões atualizadas, principalmente em análise numérica. Seu nome provém do **acrônimo** de *formula translator*.



Acrônimo: sigla formada pelas letras iniciais das palavras.

Tabela 5 - Programa escrito em Fortran para verificar se um número é ímpar

```
* Testar se 'n' é número primo
*
  program ehprimo
  implicit none
*
  integer*8 n, candidato, max
  logical restozero, naomaiscandidatos

  write( 0, * ) 'N eh primo? '
  read ( *, * ) n

  if( n .eq. 1 ) then
    write( 0, * ) '1 nao eh primo '
    stop
  end if

* Limite de busca
  max = int(sqrt(real(n)))
  candidato = 2
  restozero = .false.
  naomaiscandidatos = .false.
C
C Construção da repetição: Enquanto ainda não satisfizer condição de parada
C do while( .not. condição_de_parada )
C
  do while ( .not. (restozero .or. naomaiscandidatos) )
    restozero = mod( n, candidato ) .eq. 0
    naomaiscandidatos = candidato .gt. max
    if( .not. restozero ) candidato = candidato+1
  end do

  write( 0, * ) 'Primo: ', .not.restozero
  if( restozero ) write(*,*) "Divisível por ", candidato

  end program ehprimo
```

Fonte: UFES, 2016a, p. 1.

b) Pascal

Foi muito utilizada no ensino de linguagens de alto nível e apresentava o inconveniente de ser uma linguagem difícil. Mais tarde, foi substituída pela linguagem *object* Pascal.

A Tabela 6 demonstra um programa escrito em Pascal para registrar seis temperaturas diferentes ocorridas durante o dia e calcular a média.

Tabela 6 - Programa escrito em Pascal

```
PROGRAM TEMP_MEDIA ;

VAR
i: integer;
soma, media: real;
temp: array [1..6] of real;

BEGIN
writeln ('Introduza os valores das 6 temperaturas');
FOR i := 1 TO 6 DO
readln (temp[i])
soma := 0; {Cálculo da média}
FOR i := 1 TO 6 DO
soma := soma + temp[i];
media := soma / 6;
FOR i := 1 TO 6 DO {Valores acima da média}
BEGIN
IF temp[i] > media THEN
writeln ('Temperatura acima da média: ', temp[i]);
END;
Readln
END.
```

Fonte: ISLA, 2016, p. 1.

c) Linguagem (C)

É muito aplicada na escrita de *softwares* otimizados para processadores. É considerada uma linguagem mais fácil, empregada em diversos programas.

A Tabela 7 apresenta um programa escrito em (C) para calcular a média de duas notas de um aluno, informando se ele precisa realizar o exame final ou não. A nota para aprovação é sete.

Tabela 7 - Programa escrito em (C)

```
/* Primeiro exemplo
   Calcula média de duas notas e verifica aprovação
*/
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
int main() {
    float nota1, nota2, media;
    nota1 = 5.5;
    nota2 = 8.5;
    media = (nota1 + nota2)/2;
    printf("Média = %f", media);
    if(media >= 7.0)
        printf(" - Aprovado");
    else // se a média é menor ou igual a 7.0
        printf(" - Prova final");

    printf("\n\n"); // salta 2 linhas em branco
    system("pause"); // não permite que a janela do prompt feche
    return 0;
}
```

Fonte: UFES, 2016b, p. 1.

d) Linguagem (C++)

A linguagem (C++) é uma evolução da linguagem (C) que mantém os mesmos recursos. Apresenta mais facilidade de implementação nos seus programas devido ao uso de ambientes de desenvolvimento integrado (IDE).

e) Visual basic

É considerada uma linguagem simples por sua parte visual. Possui um ambiente de desenvolvimento integrado, em inglês, *integrated development environment* (IDE), voltado para a interface gráfica. É muito utilizada pelos programadores.

2.3 Software

Software é o programa, ou conjunto de instruções, que controla todo o funcionamento de um computador e é responsável pelo suporte lógico do equipamento. Juntamente com o *software*, tem-se o *hardware*, a estrutura física do computador. A integração do ser humano com o computador é possível por meio de diversos *softwares* disponíveis no mercado, permitindo uma sociedade cada vez mais interligada, proporcionando um acesso fácil e rápido a informações, e diminuindo as barreiras das distâncias físicas do nosso planeta.

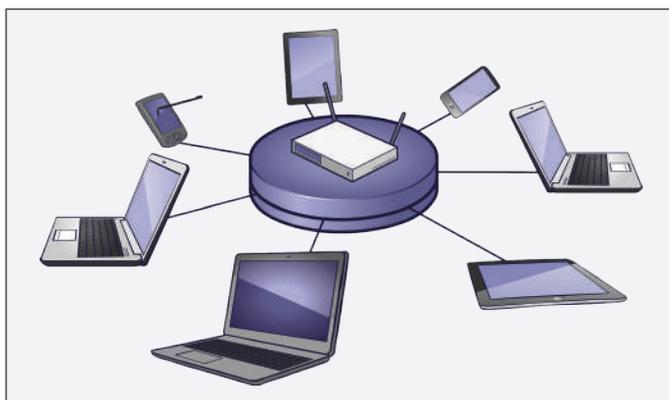


Figura 18 - Integração entre ser humano e computador

O *software* utilizado no computador de um avião é responsável pela integração de todos os equipamentos do seu sistema aviônico. Por intermédio dele, é possível configurar equipamentos e *displays* para o modo de funcionamento que se deseja, melhorando a *performance* do sistema e diminuindo as obrigações do piloto durante o voo. Ademais, ele permite indicações visuais e sonoras de situações de risco, como falta de combustível, condições extremas de funcionamento do motor e de outros equipamentos.

Alguns equipamentos da aeronave, além de serem gerenciados pelo *software* do computador principal, possuem programas específicos para execução de suas funções dentro do sistema. Esses programas recebem o nome de *firmware*. Um exemplo da utilização de *firmwares* está nas SRUs do computador. Cada uma delas trabalha com um programa específico de acordo com a função que desempenha no sistema, sendo atualizadas sem a necessidade de remoção do equipamento da aeronave.

Além do importante papel dentro do sistema aviônico, os *softwares* permitem que o usuário do transporte aéreo possa interagir, durante o voo, com filmes, jogos e músicas disponíveis nas telas localizadas nos assentos do avião, tornando o voo mais agradável.

Resumindo

Neste capítulo, estudou-se o computador das aeronaves, responsável por fazer o controle de todo o sistema aviônico. Foi visto que os aviões modernizados possuem dois computadores trabalhando em redundância, realizando autotestes o tempo todo para verificar qual deles apresenta melhor desempenho e assume a posição de principal. Todas as informações transmitidas e recebidas pelo computador principal são repassadas ao reserva, para que, em caso de comutação, ele tenha condições de assumir o sistema sem nenhuma perda.

Também foram estudadas as linguagens de programação de alto nível utilizadas pelos computadores, facilitando o trabalho dos programadores e permitindo a criação de programas direcionados a problemas específicos de um equipamento ou de uma empresa. À medida que as linguagens foram se desenvolvendo, as falhas foram sendo corrigidas e os programas aperfeiçoados, alcançando cada vez mais os objetivos específicos.

Capítulo 3

Microprocessador

A evolução da vida moderna está muito relacionada com o desenvolvimento tecnológico da humanidade, um dos motivos para isso é o surgimento do computador. A agilidade no processamento de dados e a capacidade de armazenamento de informações mudou profundamente o trabalho do homem.

Com o tempo, o computador foi evoluindo, mas seu progresso está associado ao grande desenvolvimento do microprocessador, elemento central no funcionamento dos computadores. Formado por unidades específicas, unidas em um único circuito integrado, esse componente é responsável por orquestrar todo o funcionamento das partes que compõem um sistema computacional.

O microprocessador tem a função de executar determinadas tarefas do computador, tais como processamento de imagens e cálculos do sistema. É o componente mais importante, programável para atender às necessidades exigidas.

3.1 Operação básica do microprocessador

A operação básica de qualquer microprocessador para executar uma instrução segue três etapas: busca, decodificação e execução. As instruções e os dados ficam armazenados na memória do computador, dessa maneira, o processador precisa buscar a informação na memória para decodificá-la e, depois, executá-la.

Como exemplo, está um microprocessador básico bastante utilizado, que tem duas unidades para executar as tarefas citadas, sendo elas:

- unidade de execução, em inglês, *execution unit* (EU) - responsável por executar as instruções do computador. Ela é composta da unidade lógica e aritmética, em inglês, *arithmetic logic unit* (ALU), dos registradores gerais e do registrador sinalizador;
- unidade de interface de barramento, em inglês, *bus interface unit* (BIU) - responsável pela interface com os barramentos do sistema para buscar as instruções e executá-las. É composta da fila de instruções, dos registradores de segmento, do registrador ponteiro de instrução e do bloco somador de endereços.

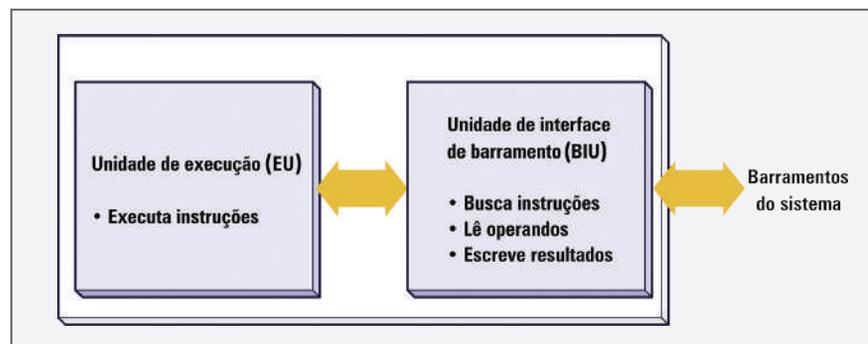


Figura 19 - Arquitetura interna de um microprocessador básico

A execução de uma instrução é possível quando a EU possui a informação do que deve ser feito. Para isso, é necessário que a BIU busque as instruções que serão executadas e, em seguida, realize as transferências de dados para o local adequado. Como um programa é composto de uma sequência de instruções, a BIU busca a segunda instrução, enquanto a EU está executando a primeira, e assim por diante. O ato de buscar antecipadamente a instrução seguinte recebe o nome de pré-busca, em inglês, *prefetching*, e tem como principal objetivo evitar que o processador fique em inatividade durante esse tempo de procura. O local em que as instruções previamente rastreadas ficam armazenadas recebe o nome de fila de instruções e difere de tamanho a cada processador.

3.2 Arquitetura interna

A Figura 20 mostra a organização interna de um microprocessador básico. O barramento de endereço possui 20 *bits*, podendo endereçar 1 MB de memória ($2^{20}=1\text{MB}$); o de dados, 16 *bits*; e o barramento interno de dados, 16 *bits*.

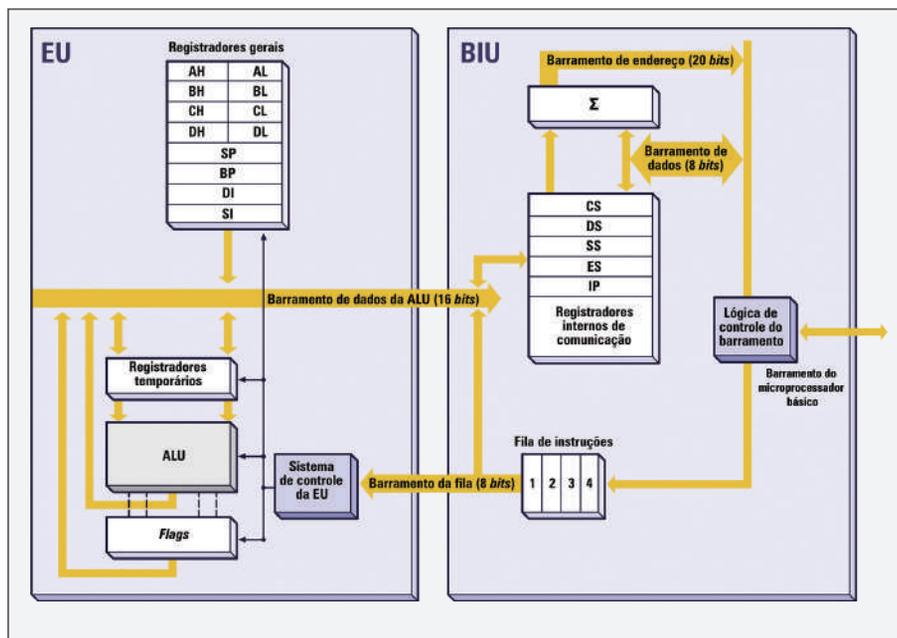


Figura 20 - Arquitetura interna de um microprocessador básico

Os 20 *bits* do barramento de endereço são representados por hexadecimais, em que, a cada quatro dígitos, haverá a substituição por um hexadecimal equivalente. Assim, a faixa de endereços desse processador vai de 00000_{H} a FFFFFF_{H} . O barramento de dados possui 16 *bits*, que equivalem a dois *bytes*. A informação no barramento de dados é comumente dividida em *byte* mais significativo (os 8 *bits* mais significativos) e *byte* menos significativo (os 8 *bits* menos significativos).

3.2.1 Registradores internos

O processador apresentado na Figura 20 é composto de 14 registradores internos de 16 *bits*. Cada um possui função específica dentro do processador, conforme a divisão a seguir.

a) Registradores de propósito geral

Esse tipo de registrador é utilizado para diversas funções, como, por exemplo, as operações lógicas e aritméticas. Possuem 16 *bits* e são muito versáteis para o processador. Quando o registrador está escrito com a letra (X), como em (AX), significa que o registrador (A) está usando os 16 *bits*. Ele, também, é escrito com as letras (AH) e (AL). A letra (H) significa alto, em inglês, *high*, e (L) significa baixo, em inglês, *low*. Assim, (AH) possui os oito *bits* mais altos ou significativos, enquanto (AL) possui os mais baixos ou menos significativos. As letras (H) e (L) são aplicadas a todos os registradores de 16 *bits* do processador, que têm quatro registradores de propósito geral. São eles:

- (AX) - chamado de acumulador, concentra os resultados das operações lógicas e aritméticas do computador. É dividido em dois registradores de 8 *bits*: (AH) e (AL). (AH) possui os 8 *bits* mais significativos de (AX), enquanto (AL) possui os 8 *bits* menos significativos;
- (BX) - chamado de base ou índice de base, geralmente, é usado para gerar um endereço de memória para acessar dados. É dividido em dois registradores de 8 *bits*: (BH) e (BL);
- (CX) - chamado de contador, contém o número de vezes que se deseja repetir uma instrução *string*. É dividido em dois registradores de 8 *bits*: (CH) e (CL);
- (DX) - chamado de registrador de dados, é utilizado para apontar o endereço de um periférico em instruções de entrada e de saída de dados. Também é dividido em dois registradores de 8 *bits*: (DH) e (DL).

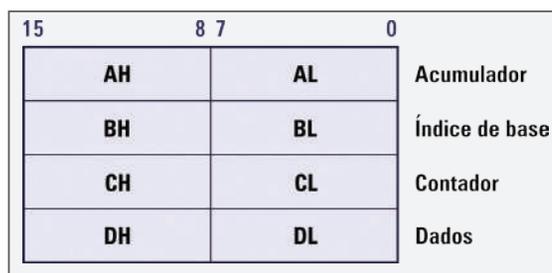


Figura 21 - Registradores de propósito geral

A divisão dos registradores em dois de 8 *bits* possibilita ao processador realizar operações tanto em 8 quanto em 16 *bits*, permitindo funcionar programas de versões anteriores ao processador mostrado na Figura 20.

b) Registradores ponteiros e de índice

São empregados para armazenar endereços em que determinados dados deverão ser acessados. Em geral, eles são utilizados como referências para manter alguma informação no programa. O modelo de processador apresentado possui quatro registradores desse tipo: (BP), (SP), (SI) e (DI). O par de registradores (SP) e (BP) trabalha dentro de uma área da memória chamada pilha, em inglês, *stack*. Da mesma forma, o (SI) e o (DI) podem ser aproveitados para referenciar dados em outra área da memória.

c) Registrador de segmento e ponteiro de instrução

Os registradores de segmentos permitem que o processador gere endereços de 20 bits, a partir dos seus 16 bits, recebendo o nome de endereço físico. Esse método é chamado segmento *offset*, e fica a critério do programador escolher se o computador o utilizará ou não. Caso não seja escolhido, o profissional trabalha somente com sua capacidade de 16 bits.

São eles:

- segmento de código, em inglês, *code segment* (CS);
- segmento de dado, em inglês, *data segment* (DS);
- segmento de pilha, em inglês, *stack segment* (SS);
- segmento extra, em inglês, *extra segment* (ES).

A formação do endereço físico de 20 bits é realizada por meio da junção de um registrador de segmento com o registrador ponteiro de instrução, em inglês, *instruction pointer* (IP). O IP possui um endereço que recebe o nome de endereço de *offset*. O processo de formação do endereço físico é realizado da seguinte forma:

- os 16 bits do registrador (CS) são utilizados como os mais significativos;
- 4 bits com níveis lógicos 0 são preenchidos à direita dos bits de (CS), resultando em um total de 20 bits;
- o resultado é somado aos 16 bits do endereço de *offset*, acarretando o endereço físico de 20 bits, conforme a Figura 23.

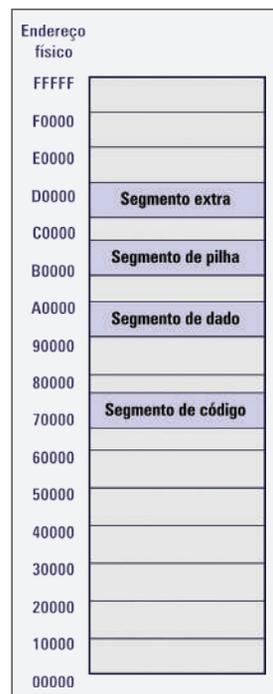


Figura 22 - Registradores de segmento

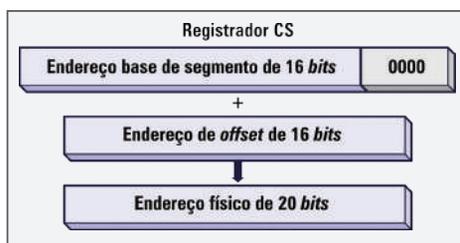


Figura 23 - Formação do endereço físico de 20 bits

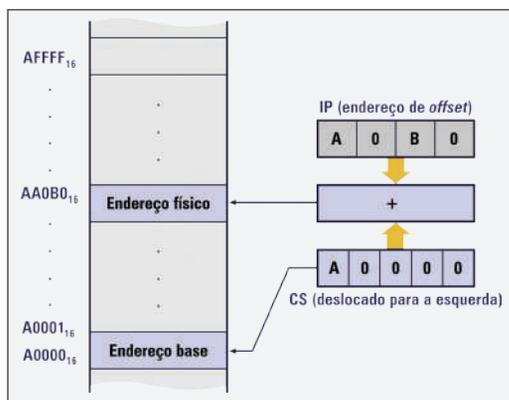


Figura 24 - Exemplo de endereço de 20 bits

A Figura 24 mostra um exemplo do endereço de 20 bits. O registrador (CS) está no endereço $A000_{16}$. A esse endereço são acrescentados quatro zeros (0000) ou mais um bit hexadecimal ($A0000_{16}$) e, depois, somado ao endereço A0B0 que está no IP. O endereço $AA0B0_{16}$ é o endereço físico da próxima instrução do programa do computador.

No entanto, o IP aponta para o endereço da memória em que está a próxima instrução a ser executada pelo processador, caso esta seja de 16 *bits*. Dessa forma, o computador sabe o local correto para realizar a busca da instrução a ser decodificada e executada.

d) Registrador sinalizador

Também conhecido como registrador de *flags*, possui nove *bits* de controle e *status* de todas as operações do computador. As *flags* de *status* indicam resultados obtidos após a realização de operações aritméticas ou lógicas pela ALU. Enquanto as *flags* de controle são utilizadas para definir o comportamento do processador em determinadas situações. A Figura 25 mostra o registrador sinalizador com as respectivas *flags*.

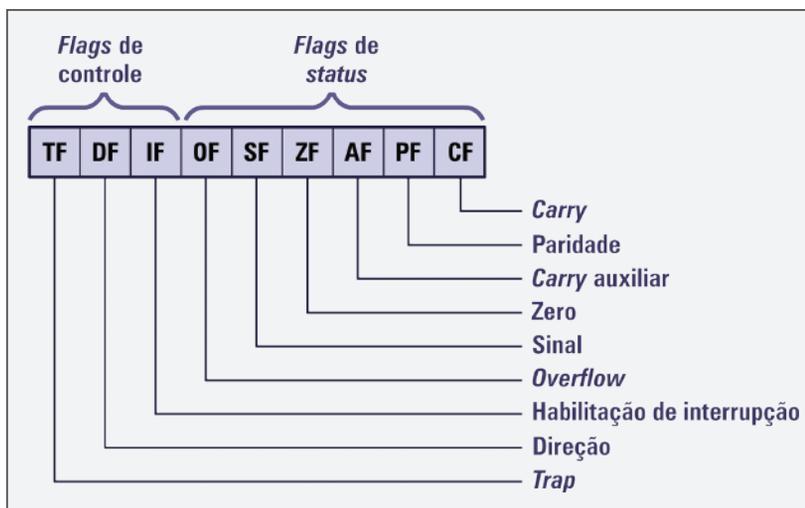


Figura 25 - Registrador sinalizador

- Indicação de transporte, em inglês, *carry flag* (CF) - indica se ocorreu o transporte do *bit* mais significativo após uma operação aritmética.
- Indicação de paridade, em inglês, *parity flag* (PF) - aponta a paridade (número de 1 na palavra) dos oito *bits* menos significativos de um resultado após uma operação lógica ou aritmética. Nível lógico 1 para número par de 1, e nível 0 para número ímpar de 1 na palavra.
- Indicação de transporte intermediário, em inglês, *auxiliary flag* (AF) - indica se ocorreu o transporte do *bit* 3 em um dado de oito *bits* após uma operação aritmética.
- Indicação de zero, em inglês, *zero flag* (ZF) - sinaliza o resultado de uma operação aritmética ou comparação. Nível lógico 0 significa que o resultado da operação é diferente de zero, e nível 1 indica que o resultado da operação aritmética é igual a 0 e igual para a comparação.
- Indicação de sinal, em inglês, *sign flag* (SF) - contém o sinal do resultado de uma operação aritmética com números sinalizados. Nível 0 indica que o resultado é positivo, e 1 aponta que é negativo.
- Indicação de transbordamento, em inglês, *overflow flag* (OF) - indica se o resultado de uma operação aritmética é maior que o suportável pelo processador. Também é utilizado para apontar se houve mudança de sinal do resultado após operações aritméticas.
- Habilitação de interrupção, em inglês, *interruption flag* (IF) - sinaliza se as interrupções estão habilitadas ou não. Nível lógico 1 aponta que elas estão habilitadas e, se necessário, serão atendidas. Nível 0 indica que não estão habilitadas.

- Indicação de direção, em inglês, *direction flag* (DF) - dependendo do nível lógico desse *bit*, os registradores de índice serão incrementados ou decrementados automaticamente após determinadas instruções.
- Indicação de forma de funcionamento do programa, em inglês, *trap flag* (TF) - é utilizado para que um programa funcione no modo passo a passo, ou seja, as instruções sejam executadas uma por uma até o fim do programa.

Para compreender melhor o registrador sinalizador, a soma dos valores 73_{16} com 52_{16} é analisada. Na representação de números sinalizados, 73_{16} e 52_{16} equivalem a números positivos, pois possuem os *bits* mais significativos iguais a zero. Isso é importante para o *bit* de *overflow* (OF) e o de sinal (SF).

$$\begin{array}{r}
 (73_{16}) \rightarrow 01110011 + \\
 (52_{16}) \rightarrow 01010010 \\
 \hline
 (C5_{16}) \rightarrow 11000101
 \end{array}$$

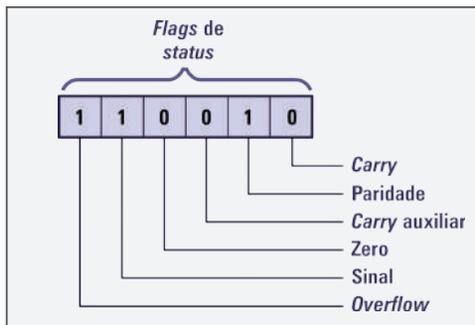


Figura 26 - Registrador sinalizador após operação aritmética

A Figura 26 mostra o conteúdo do registrador sinalizador após a operação aritmética.

Nesse caso, só foram mostradas as *flags* de *status* por serem afetadas diretamente pelas operações lógicas e aritméticas. A análise das *flags* é realizada da seguinte maneira.

- *Carry* = 0 - não houve transporte do *bit* mais significativo.
- Paridade = 1 - o resultado da soma ($C5_{16}$) possui número par de 1.
- *Carry* auxiliar = 0 - não houve transporte do *bit* 3.
- Zero = 0 - o resultado não é nulo, ou seja, é diferente de zero.
- Sinal = 1 - o resultado é negativo. O número ($C5_{16}$) possui o *bit* mais significativo igual a 1.
- *Overflow* = 1 - ocorreu mudança de sinal do resultado. A soma de dois números positivos (73_{16} e 52_{16}) resultou em um número negativo ($C5_{16}$).

3.3 Operações internas

Após conhecer a estrutura interna de um processador, como o da Figura 20, serão apresentadas as operações internas, utilizando as instruções da linguagem *assembly*, juntamente com seu modo de funcionamento.

3.3.1 Programando em *assembly*

A programação, seja ela em qualquer linguagem, é realizada por intermédio de um grupo de instruções que permitem ao computador executar diversas tarefas. Cada instrução é dividida em duas partes: o código de operação e o operando.



O código de operação, em inglês, *op code*, diz ao processador o que precisa ser feito, como, por exemplo, uma subtração ou uma adição, sendo sempre a primeira informação de uma instrução. O operando contém o dado ou o endereço do dado a ser utilizado pelo código de instrução, e seu tamanho depende do modo de endereçamento utilizado na instrução.

A linguagem *assembly* utiliza **mnemônicos** (normalmente, grupo de três letras) para representar seus códigos de instrução, em vez de números binários como é feito na linguagem de máquina. As instruções são divididas em algumas categorias.

- a) Transferência de dados - realiza a transmissão de dados entre os blocos do computador. É possível ser efetuada entre endereços de memória, registradores e periféricos. A instrução mover (**MOV**) é o exemplo mais comum nos programas. Algumas instruções de transferência de dados são específicas para um determinado registrador, como *push* (copia dados para a pilha) e **POP** (copia dados da pilha).
- b) Lógicas e aritméticas - realizam as operações lógicas e aritméticas como adição (**ADD**), subtração (**SUB**), multiplicação (**MUL**), divisão (**DIV**), lógica (**NOT**), lógica (**AND**) e lógica (**XOR**). Além dessas, outras instruções são comuns aos programadores: **INC** (incremento – somar 1), **DEC** (decremento – subtrair 1), **CMP** (comparação – saber se o número é igual, menor ou maior que o outro), **ROL** (rotação à esquerda) e **ROR** (rotação à direita).
- c) Saltos e *loops* - alteram a sequência normal das instruções de um programa, como **JMP** (salto incondicional), **JO** (salto em caso de *overflow*) e **LOOP** (decrementa o registrador **CX** e repete se não for zero).
- d) Sub-rotina - é utilizada quando existe a necessidade de o programa parar a sequência normal das instruções para fazer uma tarefa separada do programa principal. Depois de realizada, o programa continua do ponto em que havia parado. As instruções **CALL** (inicia a sub-rotina) e **RET** (retorna ao programa principal) são utilizadas para a execução de uma sub-rotina.
- e) Interrupções - o processador faz uso das interrupções para atender a eventos externos. Dependendo do tipo, elas devem ser imediatamente atendidas. Também há a possibilidade de outras serem programadas no momento de atendimento por parte do processador. As interrupções se diferem das sub-rotinas pelo fato de serem eventos externos e pela existência de uma rotina de atendimento voltada à interrupção envolvendo diversos procedimentos do processador. Depois de atendida a interrupção, o computador continua o programa do ponto em que havia parado.
- f) Instruções de controle - permitem o controle direto de tarefas do processador, além de alterar as *flags* de controle, como a instrução **STC** (*setar o flag de carry*).

Mnemônico: em linguagem de programação, mnemônico é um grupo de três letras que representam o código de uma instrução, substituindo os números binários, como é feito na linguagem de máquina. Sua utilização facilita bastante a programação.

Setar: significa colocar nível lógico 1; é muito empregado nas diversas instruções de um programa.

3.3.2 Formato da instrução

As instruções do computador assumem diversos formatos. Para as instruções lógicas e aritméticas, segue o padrão:

INSTRUÇÃO destino, fonte

Exemplo: a instrução subsequente soma o dado (número 8) com o conteúdo do registrador acumulador AL e armazena o resultado.

ADD AL, 8

A seguir, são apresentados outros formatos da instrução (**ADD**).

- **ADD 6, 8** - somar o dado (6) com outro dado (8), (dado com dado).
- **ADD AH, 22** - somar o dado (22) com o registrador (**AH**), (dado com registrador).
- **ADD [258], 33** - somar o dado (33) com o endereço 258, (dado com memória).
- **ADD BL, DH** - somar o conteúdo de (**DH**) com o de (**BL**), (registrador com registrador).

Como explicitado nos exemplos das instruções, todas realizaram a operação da adição, porém de formas diferentes. No primeiro exemplo, foram somados dois dados (6 e 8) diretamente. No segundo, o dado (22) foi somado ao conteúdo do registrador (**AH**), ou seja, um dado com um registrador. No terceiro, foi somado um dado (33) com o conteúdo do endereço de memória 258. E, no quarto exemplo, foram somados os conteúdos dos registradores (**DH**) com (**BL**).

Em todos os casos, foi utilizado o mesmo código de instrução da adição (**ADD**). Porém, em cada um dos exemplos, foi utilizado um operando diferente. Em programação, para cada tipo de operando, existe um modo de endereçamento específico, podendo ser utilizados diversos tipos em um mesmo programa.

3.3.3 Modos de endereçamento

Conforme mostrado, uma mesma instrução é escrita de diversas formas. No exemplo supracitado, a mesma operação da adição foi realizada de forma diferente, utilizando o mesmo código de operação (**ADD**) com distintos operandos (6, 8 / **AH**, 22 / [258], 33 / **BL**, **DH**). São apresentados, a seguir, alguns modos de endereçamentos comuns na linguagem *assembly*.

a) Modo imediato

No modo de endereçamento imediato, o operando está presente logo após o código de instrução. A informação é indicada de forma imediata na própria instrução.

ADD AX, 300

Essa instrução soma o dado 300 ao conteúdo do acumulador e o armazena no próprio (**AX**).

b) Modo direto

Esse modo de endereçamento consiste em somar o operando ao registrador (**DS**) para gerar um novo endereço de 20 *bits*. Supondo que (**DS**) contém 1000_{16} .

MOV DX, [5000]

Essa instrução carrega o conteúdo do endereço de memória 15000_{16} em (**DX**). Nesse caso, o operando foi um endereço e não um dado, conforme o modo de endereçamento imediato.

c) Modo implícito

Esse modo de endereçamento utiliza os registradores (**SI**) ou (**DI**) como referência do operando, além de utilizar outro registrador.

MOV AL, [SI]

Resumindo

Neste capítulo, foi abordada a arquitetura interna de um microprocessador básico, que serve de base para todos os processadores posteriores criados, permitindo a interface de programas entre todas as gerações. Além disso, foram vistos os registradores e suas diversas aplicações, auxiliando o processador na execução das tarefas.

Outro assunto abordado foi a programação na linguagem *assembly*, muito utilizada pelos programadores. Os diversos tipos de instruções que compõem um programa e seus modos de endereçamento fazem com que ela seja uma linguagem versátil e com um contato direto com a máquina, permitindo a programação de atendimento a interrupções e tipo de paridade a ser adotada pelo equipamento.

Capítulo 4

Sistemas aviônicos

Os sistemas aviônicos são formados por todos os equipamentos necessários para garantir um voo seguro. Eles fornecem condições para a tripulação realizar os procedimentos previstos de decolagem e de navegação garantindo, também, um pouso seguro, mesmo em condições de visibilidade zero.

Os equipamentos dos sistemas aviônicos são empregados desde os primórdios da aviação, porém as necessidades da aviação moderna e a evolução eletrônica exigiram a mudança dos antigos aviônicos para equipamentos mais eficientes e adequados às novas exigências do transporte aéreo.

4.1 Sistema eletrônico de instrumento de voo (EFIS)

A maioria das aeronaves modernas possui em suas cabines o sistema eletrônico de instrumento de voo, em inglês, *electronic flight instrument system* (EFIS). Ele consiste em um *display* responsável por mostrar ao piloto diversas informações importantes e faz parte do que pode ser chamado de *glass cockpit*, conforme demonstrado na Figura 27.



Figura 27 - Sistema EFIS na cabine de um avião comercial de passageiros

Esses sistemas são *displays* de grande qualidade, pois possuem alta resolução mesmo na presença de muita luminosidade, situação comum dentro das cabines de voo. Os *displays* que formam o sistema da cabine podem ser acionados e configurados de modo independente por piloto e copiloto. A capacidade de concentrar diversas informações em um único visor permite à tripulação uma leitura rápida dos dados mais importantes da aeronave.

Uma desvantagem na utilização do EFIS é o aumento da interferência eletromagnética, em inglês, *electromagnetic interference* (EMI). A EMI causada pelo EFIS interfere em outros instrumentos e é contornada com a utilização de uma fiação correta e de equipamentos que possuam isolamento de EMI.

EMI: interferências causadas em equipamentos eletrônicos por ondas de rádio, que afetam o funcionamento do circuito.



O EFIS recebe informações de vários outros sistemas presentes no avião. Estão listados, a seguir, alguns dos sistemas que alimentam o EFIS:

- localizador de direção automática, em inglês, *automatic direction finder* (ADF), um sistema que recebe as informações transmitidas pela antena do radiofarol não direcional, em inglês, *non-directional beacon* (NDB). O NDB também é conhecido como radiofarol;
- dados do radar meteorológico;
- informações do sistema de navegação vertical, em inglês, *vertical navigation system* (VNAV);
- informações do sistema de navegação por área, em inglês, *area navigation system* (RNAV);
- sistema que fornece a medida da distância da aeronave para o aeroporto de destino, em inglês, *distance measuring equipment* (DME);
- radar altímetro;
- informações do sistema de giroscópio da aeronave, as quais determinam a sua situação no espaço com relação ao norte magnético;
- sistemas que proporcionam o voo por rotas aéreas e o pouso por instrumento nos aeroportos, frequência muito alta de faixa omnidirecional/sistema de pouso por instrumento, em inglês, *very high frequency omnidirectional range/instrument landing system* (VOR/ILS).



Sistema de navegação vertical: sistema que controla as movimentações verticais da aeronave proporcionadas pelo piloto automático.

Atitude: posicionamento do eixo longitudinal da aeronave em relação ao horizonte.

A tecnologia dos primeiros EFIS era analógica e, com a evolução da eletrônica, passaram para a digital. Os sistemas do EFIS recebem os sinais de diversos equipamentos de navegação e a **atitude** da aeronave.

O piloto e copiloto podem controlar, mediante um controlador de exibição independente para cada um, os modos e as características de exibição de suas telas. Esse controlador recebe dados do gerador de símbolos, um para o piloto e outro para o copiloto. De modo a haver total segurança, existe, ainda, um terceiro gerador de símbolos capaz de assumir o controle com vistas a gerar a exibição necessária para que o piloto e o copiloto não fiquem com suas telas sem informações. A Figura 28 mostra o diagrama-bloco de um sistema EFIS básico.

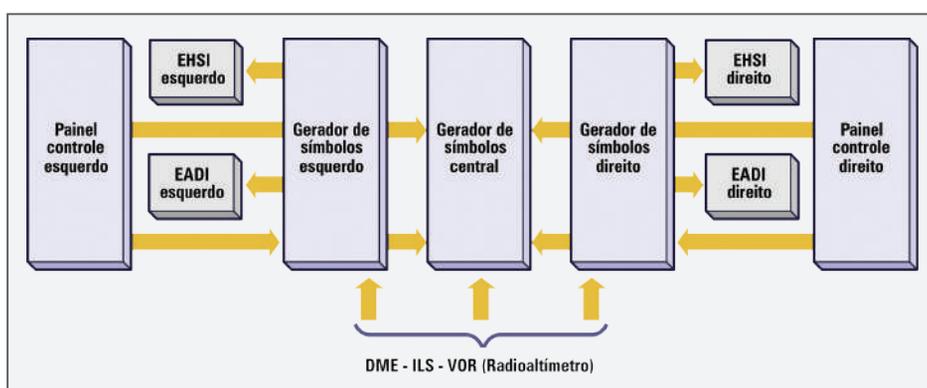


Figura 28 - Diagrama-bloco de um EFIS básico

O equipamento indicador eletrônico de atitude e direção, em inglês, *electronic attitude and directional indicator* (EADI), implementa o antigo equipamento, que deixou de ser analógico e se tornou digital. Além das indicações já citadas, ele também mostra parâmetros da situação do voo, como instrumentos de aproximação e barras de comando do diretor de voo.



Giroscópio: dispositivo formado por um rotor suspenso internamente a círculos articulados, usado para identificar a atitude e os movimentos da aeronave.

A principal finalidade do EADI é apresentar, de maneira clara e conjunta, as principais informações da situação de voo para o piloto e o copiloto, que podem alterá-las conforme seja necessário. Os instrumentos essenciais ao pouso não são os mesmos utilizados quando o avião está em voo nivelado e no piloto automático. Além disso, há a possibilidade de os fabricantes mudarem essas informações apresentadas pelo sistema, mas a maioria as apresenta de maneira idêntica.

Em alguns casos, ele pode ser montado em um único equipamento ou, caso o avião possua estrutura eletrônica adequada, pode fazer parte de um sistema de indicação eletrônica, como o EFIS.

As aeronaves equipadas com EFIS concentram diversas informações na tela, e o EADI é um dos sistemas que o alimenta com dados. A Figura 29 mostra a tela típica de um EADI.

O indicador eletrônico de situação horizontal, em inglês, *electronic horizontal situation indicator* (EHSI), é responsável por ofertar as informações que, em sistemas mais antigos, eram geradas por um **giroscópio**. Atualmente, as informações de horizonte são produzidas por elementos eletrônicos mais modernos que substituem os giroscópios analógicos.

Um EHSI consegue indicar na própria tela as informações providas de VOR/ILS, plano de voo (PLAN) e mapa de fundo (MAP). Para esse indicador designar as informações citadas, são necessários um sistema computadorizado para gerenciamento e um *display* (tela) controlador. A Figura 30 mostra a tela de um EHSI com as indicações características usadas na navegação do voo.



Figura 29 - Tela do indicador EADI



Figura 30 - Tela do indicador EHS

Quando o EHSI está na opção PLAN, ele mostra o mapa fixo da entrada do plano de voo. Na opção MAP, um mapa móvel com muitos detalhes é evidenciado como plano de fundo. Além disso, as informações vindas de radares meteorológicos são mostradas, bastando o usuário selecionar essa opção.

O EHSI apresenta vários outros dados, como direção e velocidade do vento, identificador de aeroporto, distância e tempo para a chegada em um ponto da rota de voo, etc. Assim, são diversas as informações possíveis de serem exibidas na tela do EHSI, bastando o piloto e o copiloto selecionarem o dado que desejam visualizar.

Quando o EHSI está selecionado para exibir a visão de VOR, ele pode mostrar a aparência tradicional de um VOR com as indicações do desvio lateral, da rosa dos ventos (pontos cardeais), das informações de distância e da localização (de onde vem e para onde vai, em inglês, *to/from*).

Sistema típico de EFIS



TRC: tubo gerador de imagens de padrão analógico; usa feixes de elétrons internos para desenhar a imagem na tela.

Glide slope: sistema utilizado para fornecer o correto ângulo de pouso da aeronave, sendo esse ângulo indicado no painel de instrumentos do piloto.

Um sistema típico de EFIS é composto das seguintes partes:

- tela primária de voo, em inglês, *primary flight display* (PFD);
- tela de navegação, em inglês, *navigation display* (ND);
- painel seletor de tela, em inglês, *display selection panel* (DSP);
- tela do radar meteorológico, em inglês, *weather radar panel*;
- tela multifunção, em inglês, *multifunction display* (MFD).

O PFD é formado por um tubo de raios catódicos (TRC) ou uma tela de cristal líquido de matriz ativa, em inglês, *active-matrix liquid-crystal display* (AMLCD). O PFD mostra a atitude da aeronave, o sistema de controle de voo que inclui as indicações do sistema de VOR, o localizador e o *glide slope*, entre outras informações. A Figura 31 mostra a tela típica de um PFD.

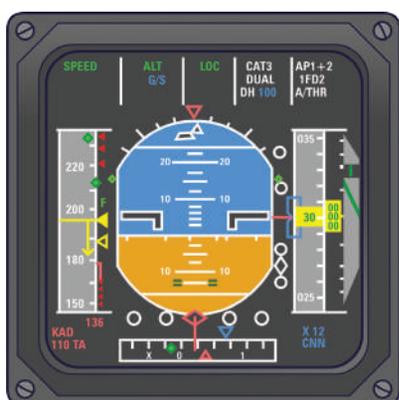


Figura 31 - Tela do PFD utilizada em algumas aeronaves comerciais

Várias notificações são indicadas pelo PFD, como:

- sistema de controle de voo;
- acoplamento de piloto automático;
- fonte de atitude da aeronave;
- *marker beacon* de aproximação;
- radar altímetro;
- altura de decisão;
- desvio ILS excessivo.

O EFIS pode possuir, também, o ND, responsável por fornecer uma visualização da situação de navegação horizontal do avião. Ele mostra, ainda, diversos dados vindos de vários sistemas, entre eles:

- indicações do VOR, ILS, RNAV (navegação por área);
- *to/from*;
- distância e direção;
- tempo transcorrido;
- tempo para a chegada;
- dados do radar meteorológico.

O ND, conforme mostra a Figura 32, é formatado para pouso ou voo em rota, bastando, para isso, selecionar as informações e o arranjo desejado. É utilizado pelo piloto ou pelo copiloto.

No painel do avião, é normal existirem telas PFD e ND para o piloto e o copiloto. As informações que precisam ser vistas nelas são selecionadas por meio do DSP. Por exemplo, caso o profissional necessite visualizar o ILS ou a velocidade da aeronave, é por intermédio do DSP que se seleciona a função desejada.



Figura 32 - Tela do ND utilizada em algumas aeronaves comerciais

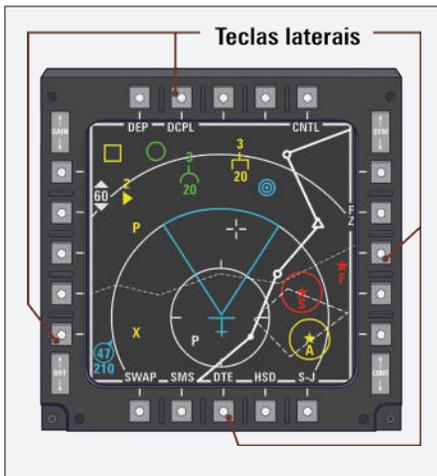


Figura 33 - Tela do MFD de um caça-bombardeiro

Algumas aeronaves possuem o MFD, tela do tipo TRC ou AMLCD. Esse tipo de equipamento possui muitas teclas laterais configuráveis que acessam diversas informações do sistema, conforme a Figura 33. As informações no MFD vêm, por exemplo, do radar meteorológico, da atitude da aeronave, entre outras informações de outros sistemas, acessados mediante o acionamento das teclas laterais do MFD.

Mensagens de falha dos sistemas também são demonstradas na tela do MFD. Quando um MFD apresenta falha, a aeronave possui outro equipamento que mostra a mesma informação, assim o piloto não fica sem a indicação necessária.

4.2 Sistema de comunicação aeronáutica dirigida e sistema de relatório (ACARS)

O sistema de comunicação aeronáutica dirigida e sistema de relatório, em inglês, *aircraft communication addressing and reporting system* (ACARS), é o responsável pela troca de informações por intermédio de mensagens curtas entre aeronaves e estações de terra. Ele utiliza a radiotransmissão na faixa de frequências muito altas, em inglês, *very high frequency* (VHF), com frequências de transmissão que variam entre 129 e 137 MHz. A Figura 34 mostra o aspecto físico de um ACARS.

Com o sistema ACARS, os operadores das aeronaves trocam mensagens com os aviões sem o auxílio de humanos. Ademais, ele proporciona meios de comunicação entre a companhia aérea e os aviões de sua frota do mesmo modo como são trocadas informações por redes de dados terrestres, facilitando a comunicação de dados. Ele usa um identificador único para cada aeronave, além de sua estrutura possuir características parecidas com as utilizadas nos sistemas comuns de mensagens eletrônicas.

Na aeronave, são usados protocolos de comunicação. Assim, sua estrutura é preparada, originalmente, para o protocolo padrão ARINC 597. Atualmente, já existem sistemas ACARS funcionando com o ARINC 724B.

Uma característica muito importante é a possibilidade de fornecer dados em tempo real relativos ao desempenho da aeronave. Com base nesses dados, a manutenção fica mais eficiente, pois as partes nos sistemas são mais bem identificadas.

A comunicação no sistema ACARS é realizada por muita alta frequência, em inglês, *very high frequency* (VHF), por alta frequência, em inglês, *high frequency* (HF), ou por satélite, dependendo de qual localidade a aeronave está sobrevoando, o importante é a realização da comunicação, mesmo que o avião esteja no meio de um oceano.



Figura 34 - Tela ACARS empregada em algumas aeronaves comerciais

Certamente, é diminuída a necessidade de comunicação de voz pelo sistema VHF ou HF devido à grande malha de estações de terra, que garante o envio e o recebimento das mensagens em qualquer lugar que a aeronave esteja, existe um processamento das mensagens em alguns centros de gerenciamento, nos quais elas podem ser guardadas e monitoradas.

Vários tipos de mensagens são enviados pelo ACARS para fornecer informações diversificadas, como, por exemplo, carga dos passageiros, relatórios de partidas e chegadas aos aeroportos, situação do combustível, informações do desempenho do motor, entre vários outros dados.

As informações dadas como exemplo são fornecidas à medida que a empresa solicita para a aeronave, assim, existe uma troca entre avião e estação terra. Antes de existir o ACARS, a troca das informações era feita por meio da voz do piloto ou do copiloto.

Existe uma grande quantidade de equipamentos e *softwares* que formam o sistema de comunicação, incluindo os equipamentos de bordo do avião e os presentes no solo. Na aeronave, existe um elemento chamado unidade de gerenciamento, responsável por receber as mensagens, transmitindo-as por meio de VHF. Uma unidade de controle é responsável por fornecer a interface com o usuário.

A rede terrestre ACARS é formada por estações de recepção e transmissão, compostas de redes de computadores capazes de gerenciar todo o tráfego de mensagens do sistema. Existem, ainda, estações em terra de comando, controle e gerenciamento dos subsistemas formados por centros de controle de operações aéreas e manutenção.

Existem dois tipos de mensagens:

- mensagens originadas a partir das estações em terra e enviadas ao avião, chamadas transmissões de subida, em inglês, *uplinks*;
- mensagens originadas a partir do avião e enviadas às estações em terra, chamadas transmissões de descida, em inglês, *downlinks*.

No sistema ACARS, a taxa de transmissão e a velocidade das mensagens são baixas, havendo a necessidade de enviar caracteres alfanuméricos simples. Levando-se em conta que as frequências de transmissão mudam de um país para outro, para cada país sobrevoado pelo avião, é importante conhecer a frequência do canal do ACARS.

4.3 Sistema de gerenciamento de voo (FMS)

O sistema de gerenciamento de voo, em inglês, *flight management system* (FMS), é um sistema de planejamento de voo e de navegação utilizado em aeronaves modernas. Por intermédio de equipamentos aviônicos, como o sistema de posicionamento global, em inglês, *global positioning system* (GPS), VOR/DME, o referencial inercial e outros, o FMS proporciona uma navegação de aproximação.

Adicionalmente, mediante a inserção das informações do voo, feita pelo piloto no FMS, a aeronave é controlada para chegar até o ponto de destino. Em suma, de posse dos dados fornecidos pelos diversos equipamentos de navegação, tal sistema pode controlar o voo corrigindo os desvios ocorridos, fazendo o avião seguir o plano de voo previsto.

As informações fornecidas pelo sistema não são visualizadas nas telas do ND ou do PFD, pois as informações de voo são passadas para o sistema EFIS.

Decerto, o uso do FMS fornece para a aeronave vários aprimoramentos, entre eles:

- melhor execução do plano de voo previsto para a aeronave;
- integração dos sistemas relacionados à navegação e ao seu monitoramento;
- controle do sistema radar e integração com o sistema EFIS;
- obediência aos padrões de rotas para chegada em terminais aeroportuários;
- controle do combustível em função das previsões fornecidas por meio de dados do planejamento de voo;
- guiamento utilizando os sistema de navegação vertical, em inglês, *vertical navigation* (VNAV), e navegação lateral, em inglês, *lateral navigation* (LNAV), navegações usadas pelo sistema de piloto automático;
- integração com o sistema de piloto automático;
- sistema de mapa para exibição de dados na tela dos *displays* do EFIS;
- monitoramento e controle de dados dos diversos sensores da aeronave;
- navegação automática utilizando diversos sensores do avião.

Para o funcionamento eficaz do FMS, são necessários alguns subsistemas:

- um computador de gerenciamento de voo, em inglês, *flight management computer* (FMC);
- um sistema de telas para apresentar os dados do FMS, normalmente, o EFIS;
- um sistema de armazenamento de banco de dados;
- uma unidade de controle de tela com teclas para acesso às funções do FMS.

A Figura 35 evidencia um FMS empregado comumente em aeronaves comerciais.

O FMS, assim como a maioria dos sistemas de bordo das aeronaves, trabalha em sistema dual (redundância). Ambos ficam incumbidos de calcular a posição da aeronave, por intermédio da verificação trocada entre os dois sistemas (dual) do FMS, fornecendo dados precisos para o voo e, por consequência, garantindo uma navegação mais segura.

Antes da decolagem, são inseridos os dados do voo para o traçado da rota e, por meio da unidade de controle de tela, parâmetros como peso do avião e capacidade de combustível.

Ele trabalha com um banco de dados interno, que possui informações de aeroportos e diversos outros dados importantes para o seu funcionamento. Por esse motivo, necessita ser atualizado constantemente. A periodicidade de atualização do banco de dados do FMC precisa ser a cada 28 dias, o que gera em torno de 13 atualizações por ano. As atualizações são distribuídas em disco compacto – memória somente de leitura, em inglês, *compact disc read-only memory* (CD-ROM)–, mas o método de atualização da aeronave vai variar entre modelos e fabricantes.

Com base nos dados inseridos e nas suas tomadas de dados dos sensores presentes na aeronave, os



VNAV: do inglês *vertical navigation*; é um sistema de navegação por piloto automático que controla os movimentos verticais da aeronave.



Figura 35 - Tela do FMS usada em aeronaves comerciais

quais fornecem, por exemplo, velocidade do vento e consumo de combustível, o FMS consegue estimar o tempo previsto para chegada.

Por meio dele, o sistema de piloto automático e o VNAV mantêm o avião voando dentro dos limites previstos. Com a observação do monitoramento da velocidade e da altitude de voo estabelecido pelo plano previamente programado, os limites de navegação são mantidos. O voo pode ser, praticamente, todo automático, da decolagem até o pouso mediante todos esses sistemas automáticos e o monitoramento.

Sistema EICAS

O indicador de motor e sistema de alerta de tripulação, em inglês, *engine indicating and crew alerting system* (EICAS), tem a finalidade de fornecer indicações de alerta e de funcionamento dos motores do avião em tempo real. Algumas aeronaves comerciais de passageiros e carga têm o sistema EICAS conhecido como monitorização eletrônica central da aeronave, em inglês, *electronic centralized aircraft monitoring* (ECAM), o qual provê funções equivalentes.

O EICAS/ECAM sinaliza diversas informações para piloto e copiloto, tais como:

- temperatura e pressão do óleo;
- fluxo de combustível;
- pressão alta e baixa do gerador de gás;
- temperatura da turbina;
- torque do motor;
- situação do interestágio.

A tela de exibição mostra várias representações gráficas, como, por exemplo, parte elétrica do avião, sistema hidráulico, degelo de superfícies e posicionamento de superfícies. Todas as mensagens na aeronave relativas aos sistemas citados também são demonstradas na tela do EICAS, centralizando as informações.

Ele ainda melhora a confiabilidade do sistema por meio de uma indicação mais simplista, centralizada e completa dos indicadores da cabine, pois diminui o número de instrumentos independentes. Em resumo, por simplificar a visualização das informações, fornecendo-as de maneira mais rápida e fácil, melhora o trabalho na cabine para o piloto e o copiloto.

A Figura 36 mostra a tela de EICAS utilizada em alguns tipos de aviões.

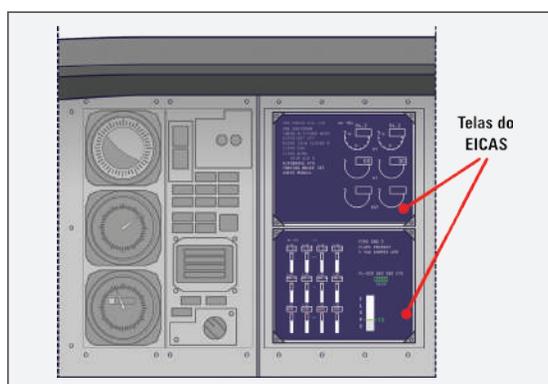


Figura 36 - Telas do EICAS empregadas em algumas aeronaves comerciais

O EICAS é formado, normalmente, por telas (*displays*) de alta resolução, coloridas, associadas aos seus painéis de controle, mais duas ou três unidades centralizadoras de dados, em inglês, *data concentrator units* (DCU), dependendo da aeronave, e unidade de controle de iluminação, em inglês, *lamp drive unit* (LDU).

Ele possui dois *displays*, um primário e outro secundário.

- No *display* primário são demonstradas as indicações primárias dos motores e os alarmes importantes para a tripulação acompanhar. O modo como as informações são apresentadas no *display* é fixo e os dados do motor a serem mostrados são sua temperatura, rotação (RPM), quantidade de combustível e fluxo, vibração característica do motor e mensagens de alerta, com cores diferentes para facilitar a identificação da urgência e a relevância dos alarmes.
- O *display* secundário possui uma grande variedade de visualizações que podem ser selecionadas pela tripulação de acordo com a necessidade, apresentando dados importantes para a eles. Ele, também, funciona como tela de cópia, em inglês, *backup* do *display* primário, caso este apresente alguma pane. Por intermédio de controles, é possível acessar as informações organizadas por páginas. As que podem ser apresentadas para a tripulação são: posicionamento de *flaps*, unidade auxiliar de potência, sistema de degelo, pressurização interna da aeronave, posicionamento de voo da aeronave, posicionamento das portas, sistemas de combustível e hidráulico.

O piloto e o copiloto selecionam qualquer um dos *displays*, primário e secundário, pois os dados do sistema EICAS são levados para ambos. Os dados trocados entre eles, as unidades centralizadoras de dados e outros elementos do sistema são executados pelos barramentos de dados, em inglês, *data bus*.

Os dados de entrada do sistema EICAS trafegam pelo *data bus* por meio de protocolo, que varia em função da aeronave. O *data bus* recebe informações de diversos sensores, com variadas formas de sinais e, como consequência, a DCU processa todos esses dados, distribuindo-os para o sistema.

As saídas do DCU para os *displays* incluem alertas para a tripulação relativos a:

- sistemas monitorados;
- dados dos motores;
- rotinas de diagnósticos para as unidades;
- dados para serem gravados no gravador de dados de voo, em inglês, *flight data recorder* (FDR).

A LDU do sistema possui dois canais de controle e aciona até 120 lâmpadas indicadoras. Os seus canais 1 e 2 recebem dados da DCU e acionam as lâmpadas por meio de comandos específicos. Ambos os canais são idênticos e os barramentos trabalham por lógica (OU), em inglês, (OR).



Data bus: termo atribuído ao barramento, fisicamente formado por vários fios, por onde passam os sinais referentes aos dados.

Assim, caso um dos canais falhe, o outro supre as necessidades, mantendo as informações para piloto e copiloto. A Figura 37 exibe o diagrama-bloco de um sistema EICAS simplificado.

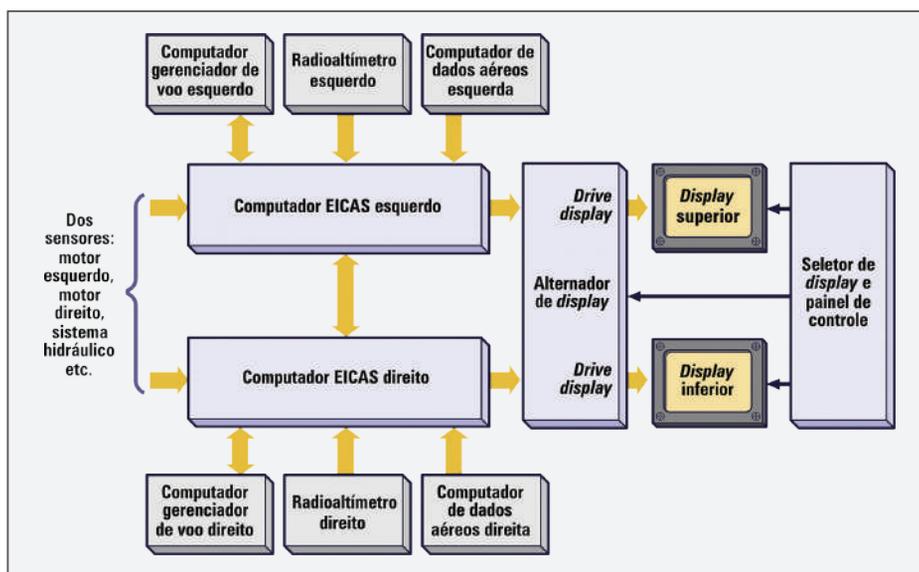


Figura 37 - Diagrama-bloco de um sistema EICAS simplificado

A Figura 37 demonstra um diagrama-bloco de um sistema EICAS simplificado, pois, dependendo da aeronave, alguns detalhes serão diferentes. Em contrapartida, a estrutura básica é sempre a mesma.

O referido sistema facilita para piloto e copiloto a operação da cabine, pois concentra diversas informações elétricas e mecânicas em um único instrumento. Nesse sentido, o trabalho na cabine diminui e a segurança do voo aumenta. O constante monitoramento garante o aviso à tripulação pelos sinais de alarme no *display* do EICAS quanto a:

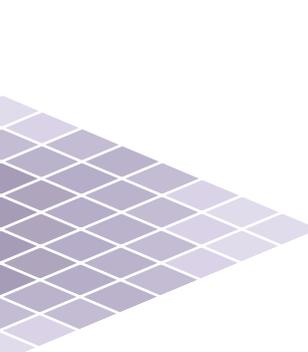
- segurança;
- verificação dos parâmetros dentro das tolerâncias necessárias;
- comunicados das anomalias e dos valores fora da faixa.

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que o EFIS facilita a visualização e ajuda no gerenciamento de cabine, melhorando o trabalho para o piloto e o copiloto da aeronave. Diversas informações são visualizadas na tela do EFIS, tais como ADF, DME, VNAV, RNAV, radar, VOR/ILS, EADI e EHSI.

O sistema ACARS, por sua vez, facilita a troca de mensagens curtas entre aeronaves e centros de controle e operações em terra. Por intermédio de uma rede de transmissão, que utiliza sinais em VHF, HF ou satélite, é permitida a transmissão das mensagens independentemente da localização do avião.

Além disso, foi abordado o sistema FMS que gerencia o voo da aeronave de modo preciso, melhorando a sua navegabilidade. Mediante vários sinais, é possível controlar o voo de maneira muito confiável. O EICAS auxilia a tripulação, também, na verificação das condições mecânicas da aeronave.



Unidade 5

Instrumentos

Durante a operação com máquinas simples e pequenas, ou com grandes e complexas, na maioria das vezes, são utilizados instrumentos para orientar o operador sobre o estado de funcionamento dos componentes e da máquina, bem como para executar a própria operação do equipamento. Nas aeronaves, essa necessidade é elevada a nível vital. Não há como imaginar, por mais simples que seja o avião, a operação de uma aeronave sem os instrumentos de voo e de monitoramento dos motores, por exemplo.

As funções desempenhadas pelos instrumentos em uma aeronave são muito variadas. Eles são utilizados para indicar a proa, a atitude e a inclinação. São também responsáveis por apontar o estado de funcionamento do motor, apresentando os parâmetros de temperatura, de pressão, de fluxo, de quantidade, entre outras informações relevantes, as quais permitem avaliar se há algum problema no motor que necessite de determinado tipo de conduta da tripulação. Dessa forma, os instrumentos também têm a função de alertar ao piloto quando há alguma condição que requeira ação ou atenção. Nesse cenário, a informação, além de confiável, tem de ser apresentada de forma clara e precisa, para diminuir o tempo de resposta do piloto em relação ao problema, prevenindo, assim, acidentes.

À medida que os instrumentos e os sistemas evoluíram, com a utilização de componentes eletrônicos e recursos de computação, aumentou consideravelmente a quantidade de funções desempenhadas pelos equipamentos da cabine, aliviando na mesma proporção a carga de trabalho da tripulação. Nesse processo, os instrumentos continuam a desempenhar o importante papel de fornecer informações valiosas à tripulação e/ou aos computadores para a realização segura dos voos dos mais variados tipos de aeronaves.

Capítulo 1

Instrumentos de aeronaves

Nas primeiras aventuras com aeronaves mais pesadas que o ar, os pioneiros sentiram a necessidade de obter informações sobre ela e a operação do motor para tornar o voo mais seguro. Essa necessidade se manteve ao longo da evolução tecnológica dessas máquinas. Nessa jornada, foi incorporada uma série de equipamentos capazes de fornecer informações sobre os vários sistemas, que propiciam ao piloto uma condição de percepção situacional da aeronave mais apurada, bem como uma gama de informações cada vez maior sobre ela.

Nesse contexto, a cabine das aeronaves foi progressivamente se enchendo dos mais variados instrumentos e controles. Na Figura 1, é possível constatar que os instrumentos disponíveis na aeronave Bleriot XI, de 1909, se resumiam a um tubo de vidro para monitorar o nível de óleo no motor e um tacômetro para informar a velocidade do motor. Como se percebe, não havia qualquer informação sobre a altitude, velocidade e atitude da aeronave. Logo, a aviação tinha muito que evoluir.

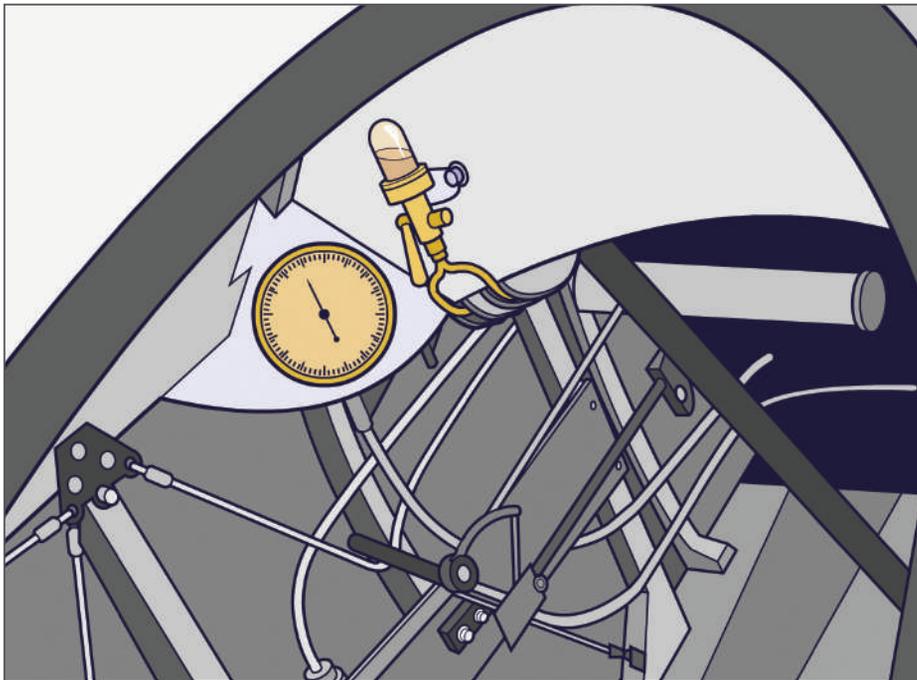


Figura 1 - Manômetro e tubo de vidro com nível de óleo do motor da aeronave francesa Bleriot XI, fabricada em 1909

O sistema de instrumentos de aeronaves sofreu grande desenvolvimento com a incorporação de componentes eletrônicos, os quais aumentaram a confiabilidade nos instrumentos e diminuíram as dimensões e o peso dos equipamentos. Posteriormente, outro avanço extraordinário foi percebido em função da incorporação de recursos de computação, que propiciaram controle e monitoramento dos sistemas nunca antes vistos.

Com os recursos de informática, a quantidade enorme de informações das grandes aeronaves passou a ser trabalhada automaticamente pelos seus próprios programas de controle, o que representou uma diminuição na demanda de ações por parte da tripulação. Essa realidade levou à integração de sistemas e à condensação de diversas informações em um mesmo equipamento, ocasionando o esvaziamento de indicadores na cabine. Na verdade, a quantidade de informação aumentou consideravelmente nas aeronaves modernas, o que diminuiu foi a quantidade de indicadores fixos na cabine, que deram lugar às telas digitais nos monitores.

Se a apresentação das informações mudou radicalmente, as técnicas para a obtenção das informações não modificaram tanto, pois os sensores continuam a operar segundo os mesmos princípios utilizados nos instrumentos analógicos, salvo algumas exceções. Portanto, é fundamental para o profissional de manutenção aeronáutica compreender o funcionamento do sistema de instrumentos, desde os sensores até o indicador na cabine, seja na forma analógica, seja na digital.

A produção de instrumentos para aeronaves apresenta algumas particularidades que representaram desafios a serem vencidos pelos fabricantes. Não basta ao piloto obter a informação de que se necessita, ela tem de ser apresentada de maneira clara, sem riscos de confusão ou dúvidas. Assim, uma das preocupações dos fabricantes é a apresentação precisa da informação, com a utilização de recursos visuais que diferenciem claramente as condições normais das anormais, facilitando a interpretação e diminuindo o tempo de reação do piloto. Logicamente que os fabricantes também têm como premissa básica a manutenção da exatidão da informação nas mais variadas condições ambientais, inclusive nas mais extremas situações de calor, de frio e de pressão, às quais as aeronaves são submetidas.

À medida que se constroem aeronaves maiores e com mais recursos, a gama de informações desejadas na cabine cresce proporcionalmente. Isso é possível nos dias atuais, porque a forma de se apresentar as informações não aumenta a carga de trabalho da tripulação, diferente do período em que as aeronaves complexas tinham os painéis completamente ocupados por instrumentos.

Pilotar era um exercício árduo de concentração e tensão. Porém, atualmente, os recursos de computação absorvem grande parte das tarefas, liberando a tripulação para se concentrar na pilotagem. Como resultado desse processo, o antigo painel plano em frente da cabine de voo com vários instrumentos individuais instalados evoluiu para uma sofisticada interface digital controlada por computadores, com monitor de tela plana, telas e mensagens priorizadas, que deu origem ao termo cabine de vidro, em inglês, *glass cockpit*. A comparação visual entre uma cabine convencional e uma digital deixa claro esse processo de otimização e de organização das informações na cabine.

Nesse cenário, não há como deixar de abordar a comparação entre os modelos de instrumentos analógicos e digitais, o que se verificará ao longo dos capítulos, quando pertinente. Ao observar as Figuras 2 e 3, é possível notar a diferença visual das cabines de vidro em relação às equipadas com instrumentos analógicos.



Figura 2 - Cabine com instrumentos analógicos
Fonte: Agência Força Aérea Brasileira / © Sgt. Bruno Batista



Figura 3 - Cabine de vidro
Fonte: Agência Força Aérea Brasileira / © Sgt. Simo

1.1 Generalidades

De maneira geral, o sistema de instrumentos apresenta duas etapas para fornecer a informação requerida à cabine de pilotos. A primeira consiste na detecção da situação, enquanto a segunda apresenta essa situação de forma clara e concisa na cabine. No caso dos instrumentos analógicos, essas etapas, em boa parte das situações, ocorrem em um mesmo instrumento, ou unidade, por isso são chamados de instrumentos de sensoriamento direto ou de leitura direta. Cabe esclarecer que a expressão sensoriamento quer dizer a obtenção da informação requerida. Por exemplo, nos indicadores de temperatura do óleo do motor, a obtenção da informação de temperatura desse fluido é realizada por meio de sensores em contato com o óleo do motor.

Com efeito, a partir do momento em que o sensor capta a informação, é iniciado o processo de transmissão dessa informação aos instrumentos para apresentação à tripulação. Essa transmissão pode ocorrer de forma direta, por meio de transmissão direta do sensor ao instrumento, ou de forma indireta, em que se utiliza o método de indicação remota, segundo o qual a informação deve ser detectada e, em seguida, enviada a uma unidade de exibição separada, localizada na cabine do avião. Portanto, no sistema de instrumentos de leitura direta (Figura 4), a captura da informação e a apresentação desta na cabine ocorrem em um mesmo instrumento. No sistema de indicação remota (Figura 5), a captação da informação se dá por uma unidade, enquanto a apresentação é realizada por outra na cabine da aeronave. Os instrumentos analógicos e digitais fazem uso desse método.



Figura 4 - Sistema de instrumentos de leitura direta

Fonte: Elaboração do autor /
©Nilton Gasparelli Esteves.



Figura 5 - Sistema de instrumentos de indicação remota

Fonte: Elaboração do autor / ©Nilton Gasparelli Esteves.

A transmissão da informação para o indicador é feita de várias maneiras. A eletricidade é usada frequentemente por intermédio de fios que transportam as informações do sensor até a cabine. Algumas vezes são usadas linhas pneumáticas para esse fim. Em aeronaves antigas, equipadas com complexo sistema de instrumentos, uma enorme quantidade de tubulações e de fiações chegava ao painel da cabine de comando. Boa parte dessa quantidade se deve às linhas de transmissão de informação aos instrumentos, as quais convergem de diversas partes da aeronave, onde estão instalados os sensores e os instrumentos individuais colocados na cabine. Acrescenta-se que vários instrumentos são redundantes, com um instrumento instalado no painel do piloto e outro no painel do copiloto.

Nas aeronaves modernas, a transmissão de informações ocorre mediante os barramentos de dados, considerados os meios de transferência de informação mais eficientes e confiáveis. Basicamente, esses barramentos funcionam como fios elétricos que compartilham o transporte de mensagens para muitos instrumentos, por meio de sinais digitalmente codificados para cada um deles. Isso reduz o número de fios e o peso necessários para transferir as informações de sensoriamento remoto para os indicadores do painel da cabine. As telas dos computadores, utilizadas para apresentar diversas informações ao piloto, podem ser controladas para mostrar apenas o dado desejado. Esses dispositivos são mais leves que os inúmeros medidores individuais que seriam necessários para exibir as mesmas informações simultaneamente. Uma vantagem adicional é o aumento da confiabilidade inerente a esses **componentes de estado sólido**.



Componente de estado sólido: circuitos ou dispositivos construídos inteiramente a partir de materiais sólidos, nos quais os elétrons estão confinados inteiramente dentro do material sólido; o termo é frequentemente usado para contrastar com as tecnologias anteriores.

1.2 Classificação dos instrumentos

Com a finalidade de facilitar a abordagem de temas ligados ao sistema de instrumentos de aeronaves, grande parte destes foi separada em grupos, com base no critério de pertinência da função que executam. Tal divisão se mostra didática, uma vez que vai ao encontro da distribuição dos instrumentos na cabine, a qual privilegia os instrumentos por afinidade de operação. Por exemplo, caso a tripulação queira obter a informação sobre o motor, ela consultará o grupo de instrumentos do motor, que estão agrupados para facilitar a consulta. É fácil imaginar o caos que haveria na cabine se cada instrumento fosse instalado sem uma disposição lógica no painel.

Existem três grupos básicos de instrumentos classificados pela função que executam. Esses grupos são divididos em instrumentos de voo, do motor e de navegação. Há outros tantos medidores e indicadores que fornecem informações, os quais não se enquadram nessas classificações, especialmente nas aeronaves equipadas com complexos sistemas de instrumentos.

Partindo do entendimento de que todo equipamento que registra habitualmente a posição de determinado componente móvel na aeronave, ou a condição de vários componentes ou sistemas de aeronaves, pode ser considerado como instrumento de indicação de posição ou de condição de um item ou sistema, quanto mais equipamentos e recursos possuírem as aeronaves, mais instrumentos de controle e de indicação serão, portanto, necessários.

Dessa forma, a quantidade de instrumentos não classificáveis nos três grupos apresentados aumenta consideravelmente nas aeronaves equipadas com mais sistemas e recursos para desempenhar funções específicas. A título de exemplo, citam-se os seguintes instrumentos que não se enquadram nos três grupos apresentados: os indicadores dos sistemas ambientais de cabine, de energia elétrica e de unidades de alimentação auxiliares, além dos indicadores de fadiga, de posição da rampa de carga, entre outros. Portanto, a divisão apresentada não tem o escopo de abranger todos os instrumentos, apenas visa a criar grupos que facilitam a abordagem dos instrumentos, uma vez que há grande quantidade de equipamentos nas aeronaves mais complexas.

A divisão dos instrumentos apresentada facilita a localização deles no painel e, por conseguinte, a utilização durante as ações na cabine. Entretanto, para se conhecer o funcionamento de cada instrumento, tal divisão não se mostra didática, pois os instrumentos apresentam princípios de



Giroscópio: dispositivo dotado de rotor suspenso por um suporte formado por dois círculos articulados, com juntas cardã; seu funcionamento baseia-se no princípio da inércia.

Instrumento anemométrico: instrumento usado para medir a velocidade de um fluido, que pode ser o ar (vento) ou a água.

Voo por instrumentos: regras de voo por instrumentos, em inglês, *instrument flight rules* (IFR), que definem o conjunto de regras, das quais o piloto se utiliza para conduzir uma aeronave, orientando-se apenas pelos instrumentos de bordo, em vez de se orientar por referências visuais externas.

funcionamento diferentes. Logo, a divisão mais adequada para o aprendizado é a baseada no princípio segundo o qual eles operam. Isso porque alguns utilizam métodos mecânicos para medir a pressão e a temperatura. Outros usam o magnetismo e a eletricidade para detectar e exibir um parâmetro, enquanto alguns instrumentos dependem da utilização de **giroscópios** como princípio de funcionamento. Há, ainda, o grupo de instrumentos que emprega sensores de estado sólido e computadores para processar e mostrar informações importantes.

Isso posto, os capítulos desta unidade abordarão vários instrumentos, de acordo com o princípio de funcionamento, tais como os **instrumentos anemométricos**, giroscópicos, de indicação direcional, indicadores de temperatura, etc. Os instrumentos que não se enquadrarem nos grupos formados pelos princípios de funcionamento serão abordados em um tópico intitulado outros instrumentos.

1.2.1 Instrumentos de voo

Ao se imaginar um voo, logo se deduz que algumas informações básicas sobre ele são necessárias à tripulação. Ela deve saber a altitude e a velocidade em que a aeronave se encontra e se a direção está de acordo com a rota pretendida. Também é fundamental saber a atitude e a inclinação da aeronave durante as manobras. Os instrumentos de voo fornecem ao piloto informações sobre a situação do voo, tais como altitude, velocidade e direção. Eles melhoram a segurança ao permitir que o piloto mantenha o avião em voo nivelado e realize curvas sem uma referência externa da aeronave, tal como o horizonte natural.

Para o voo em condição visual, em inglês, *visual flight rules* (VFR), são exigidos, no mínimo, um indicador de velocidade do ar, um altímetro, uma bússola e um indicador de direção magnética adequado. Enquanto sob as regras de **voo por instrumentos**, em inglês, *instrument flight rules* (IFR), há a necessidade de se adicionarem instrumentos que forneçam um horizonte artificial, indiquem a direção da aeronave, a razão da curva e da inclinação; um indicador de derrapagem; um altímetro ajustável; e um relógio. O voo em condições meteorológicas de instrumentos, em inglês, *instrument meteorological conditions* (IMC), requer instrumentos de navegação de rádio para decolagens e pousos precisos.

Há seis instrumentos de voo tradicionais na maioria das cabines de aeronaves, muitos dos quais assumiram uma aparência mais moderna ao longo do tempo. Alguns deles são considerados básicos, tais como o altímetro – que informa a altitude da aeronave; o indicador de velocidade (ou velocímetro); e o indicador de direção magnética – uma espécie de bússola. Além disso, o horizonte artificial, o coordenador de curvas e o indicador de razão de subida são instrumentos de voo presentes na maioria das aeronaves. Em virtude de sua importância para o voo, eles tradicionalmente são instalados em posição de destaque no painel da cabine. Na maioria dos casos, o indicador de velocidade, o horizonte artificial, o altímetro e o girodirecional são posicionados em forma de **(T)** (Figura 6), de maneira que a posição central superior fique diretamente na frente do piloto e do copiloto. Nessa posição, fica o horizonte artificial, mesmo em painéis digitais.

A Figura 7, por sua vez, apresenta os instrumentos primários de voo na tela dos instrumentos de voo, conhecida como *primary flight display* (PFD).

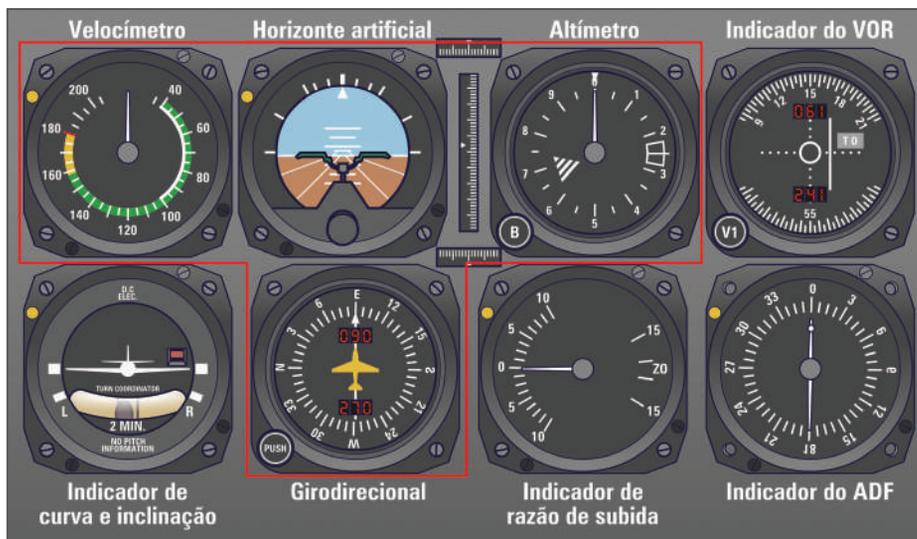


Figura 6 - Posições em (T) no painel ocupadas pelos instrumentos primários de voo

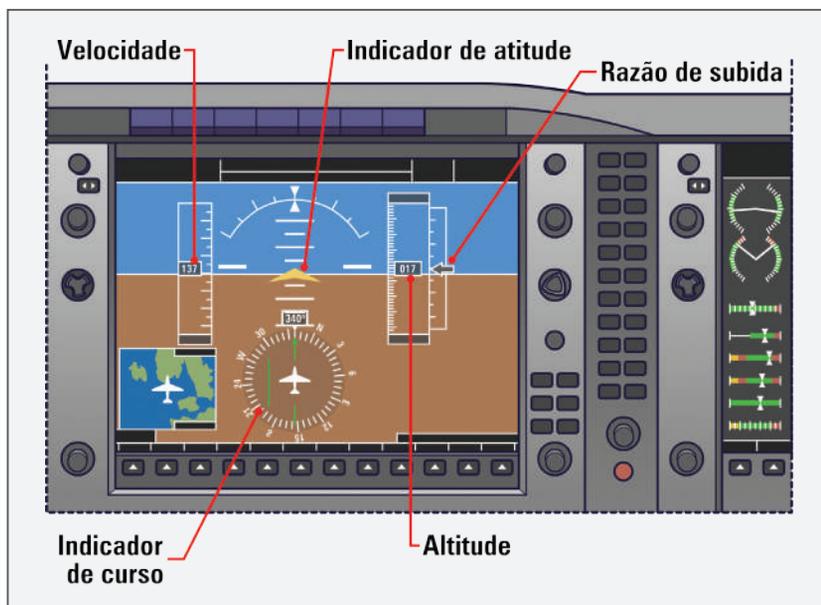


Figura 7 - Instrumentos primários de voo no PFD

São seis os instrumentos primários de voo:

- a) indicador de velocidade - também chamado de velocímetro, é o instrumento responsável por apresentar a velocidade de deslocamento da aeronave. A velocidade é determinada pela diferença de pressão entre um sensor estático, que não está na corrente de ar, e um sensor (tubo *pitot*) submetido ao fluxo de ar. O movimento da aeronave através do ar causa uma pressão diferente entre o tubo estático e o tubo *pitot*. Quanto mais rápido for o deslocamento, maior será a pressão diferencial. Qualquer diferença de pressão faz com que o ponteiro no indicador de velocidade se mova proporcionalmente. Em geral, a velocidade é indicada em nós (knots – kt.) ou milhas por hora (mph).

O funcionamento desse instrumento será explicado no capítulo dedicado aos instrumentos anemométricos. Dois indicadores foram, antecipadamente, apresentados, o indicador de velocidade analógico, na Figura 6, e o em um PFD, na Figura 7;

- b) horizonte artificial - este instrumento, denominado indicador de atitude, em inglês, *attitude indicator* (AI), informa a tripulação da posição da aeronave em relação ao horizonte. Ele apresenta dois movimentos, um que mostra a inclinação (*bank*) da aeronave no seu eixo de rolamento e outro que indica a inclinação em relação ao seu eixo longitudinal (*pitch*). O primeiro é alterado quando são acionados os *ailerons*, enquanto o segundo varia mediante o acionamento dos profundos e/ou dos compensadores.



Compensador: superfície de comando auxiliar, similar a um aerofólio, presa a uma superfície de comando e destinada a reduzir a força de controle ou auxiliar no equilíbrio do avião.

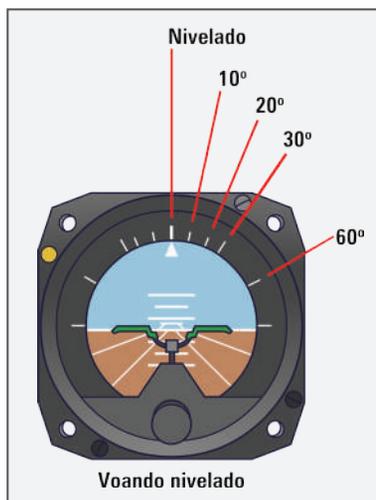


Figura 8 - Horizonte artificial

Na parte superior do instrumento, há oito marcações radiais, indicando a inclinação angular da aeronave (Figura 8). Seis delas estão relativamente próximas do topo, enquanto as duas restantes ficam mais afastadas. Cada marcação indica dez graus de inclinação. As duas marcações mais afastadas sinalizam a inclinação de 60 graus.

A Figura 9 aponta uma curva de 20° à direita no horizonte artificial;



Figura 9 - Horizonte artificial com inclinação de 20° para a direita

- c) altímetro - é um instrumento barométrico que se baseia na medição da pressão atmosférica para indicar a altitude da aeronave em pés (*feet - ft.*). A altitude é denominada nível médio do mar (NMM), uma vez que ela é a referência média do nível da maioria dos oceanos. A medição da altitude adota como base a tabela de atmosfera padrão, que não representa a realidade em função de diversos fatores que exercem influência na determinação da pressão atmosférica. Dessa forma, há a necessidade de compensar esses fatores para que a indicação seja correta. O altímetro, apresentado na Figura 6, é constituído de uma cápsula aneroide com vácuo parcial interno, para medida da pressão ambiente, instalada em uma câmara blindada. O funcionamento do altímetro será explicado no capítulo dedicado aos instrumentos anemométricos;

d) girodirecional - também chamado de indicador de proa, em inglês, *heading indicator* (HI) ou *direction indicator* (DI). Apesar de pertencer ao grupo dos instrumentos primários de voo, ele possui relação estreita com os instrumentos de navegação, pois é utilizado em conjunto com a bússola magnética. É um instrumento que fornece informação direcional ao piloto de forma semelhante à bússola magnética. Ele não é orientado pelo norte magnético, mas pode descrever uma proa exata quando alinhado a uma bússola magnética. Ele é um instrumento giroscópico, acionado por vácuo ou eletricamente.

Quando o avião vira à esquerda ou à direita, o indicador muda de posição para descrever uma nova proa entre zero e 359 graus, em uma rosa dos ventos. No centro do indicador, há uma aeronave em miniatura, a qual acompanha a mudança de direção, enquanto o giroscópio gira a rosa dos ventos no instrumento. Em uma curva à esquerda, o avião em miniatura parece virar à esquerda, enquanto a rosa dos ventos vira para a direita. O girodirecional (Figura 10) é usado porque ele não é afetado por perturbações magnéticas e não apresenta erros de curva inerentes à bússola. Entretanto, é suscetível a erros de **precessão giroscópica**, provocados pelo atrito mecânico imposto ao rotor do giroscópio.



Figura 10 - Instrumento do girodirecional

O funcionamento dos giroscópios será apresentado mais à frente, incluindo os fenômenos da precessão e da rigidez, que são as características principais do giroscópio;

- e) indicador de razão de subida - também chamado de indicador de velocidade vertical, em inglês, *vertical speed indicator* (VSI), de *climb*, ou, ainda, de variômetro, é um instrumento do sistema anemométrico que informa ao piloto a razão em que a aeronave está subindo ou descendo ou se ela está em voo nivelado. A taxa de subida ou descida é indicada em pés por minuto, em inglês, *feet per minute* (FPM), sendo, logicamente, zero em voo nivelado. Ele também será abordado mais à frente, no capítulo dedicado aos instrumentos anemométricos;
- f) coordenador de curva - este equipamento é, na realidade, formado por dois instrumentos. Um deles funciona a partir de um giroscópio, indicando a razão de curva da aeronave, ou seja, a rapidez com que ela está modificando a direção. Quando se realiza uma curva, o efeito da precessão no giroscópio faz com que o avião em miniatura na face do instrumento incline para a esquerda ou para a direita. Quanto mais rápida a curva, maior a inclinação lateral do avião em miniatura.

Quando as asas do avião em miniatura ficam niveladas em relação às linhas pequenas que aparecem próximas às marcas (L) e (R), significa que a aeronave está fazendo uma curva



Precessão giroscópica: fenômeno físico verificado nos giroscópios, consiste na mudança do eixo de rotação do rotor ao sofrer a ação de uma força defletiva. A reação a essa força não ocorre no ponto em que foi empregada, mas, sim, em um localizado a 90 graus em relação ao plano rotacional.

de razão padrão. Por exemplo, uma aeronave com uma razão de curva padrão de quatro graus por segundo completará uma curva de 360 graus em 90 segundos ($360/4=90$).

O outro instrumento utiliza uma esfera dentro de um tubo com líquido, no qual ela fica livre para se deslocar lateralmente. Esse instrumento é chamado de indicador de escorregamento ou de derrapagem. Ele indica a qualidade da curva realizada. Quando a esfera no indicador fica entre as duas linhas de referência vertical significa que as forças atuando na esfera estão equilibradas e que o avião está em voo coordenado. Se ela se deslocar para dentro da curva, o avião está escorregando. Se ela se mover para fora da curva, o avião está derrapando.



Figura 11 - Coordenador de curva

Os aviões mais antigos, geralmente, são equipados com um instrumento similar, chamado de indicador de curva e escorregamento, em inglês, *turn and bank*, que utiliza uma apresentação diferente para exibir as mesmas informações. O coordenador de curva (Figura 11) é comum nas aeronaves leves modernas.

Muitos dos instrumentos de voo analógicos possuem a característica importante de não necessitar de energia elétrica para seu funcionamento, haja vista que são alimentados por fontes de pressão de ar e de vácuo. No caso de perda do sistema elétrico da aeronave, os instrumentos continuam a funcionar. Entretanto, em virtude do desenvolvimento dos sensores e da melhoria das técnicas de indicação da informação, aliados aos **sistemas elétricos redundantes**, avançados e confiáveis de aeronaves, possíveis sistemas de instrumentos primários e secundários tornaram-se seguros e operados eletricamente. Isso não quer dizer que esse desenvolvimento eliminou a presença do altímetro pneumático, do horizonte artificial equipado com giroscópio e do indicador de direção magnética dos painéis de instrumentos, pois, em favor da redundância de instrumentos, eles são frequentemente mantidos nos sistemas de instrumentos de várias aeronaves, conforme se percebe no painel destacado pela Figura 12.



Sistema elétrico redundante: sistema que possui um segundo dispositivo acessível para uso imediato quando ocorre uma falha no dispositivo primário do sistema.



Figura 12 - Painel com monitores e três instrumentos analógicos de reserva

Fonte: Agência Força Aérea Brasileira / © Sgt. Johnson

Em 25 de janeiro 2008, a tripulação do voo 731 de uma empresa de aviação comercial experimentou uma sensação de tensão quando a aeronave sob seu comando teve um apagão no painel digital da cabine, perdendo metade da tela do monitor eletrônico centralizado da aeronave (equipamento eletrônico que monitora as funções de vários sistemas da aeronave e transmite as informações para os pilotos), bem como todos os rádios, *transponders*, sistema anticollisão de tráfego e indicadores de atitude. Devido à boa condição do tempo e da luz do dia, os pilotos foram capazes de pousar com sucesso no aeroporto de Newark sem contato de rádio. O episódio chamou a atenção acerca da dependência de alimentação de energia elétrica pelos instrumentos de voo. Nesse caso específico, a fabricante da aeronave exigiu que todos os operadores cumprissem o boletim de serviço A320-24-1120, com o fim de equipar a aeronave com um sistema de reconfiguração automático do barramento essencial de alimentação de corrente alternada, além de uma fonte de energia de reserva para o indicador de atitude, com autonomia de, no mínimo, 30 minutos. Como se vê, a fabricante não optou pela incorporação de instrumentos analógicos para conferir maior segurança ao sistema de instrumentos. Portanto, a incorporação de instrumentos analógicos de reserva para casos de pane elétrica no sistema principal não é uma unanimidade nas aeronaves.

1.2.2 Instrumentos do motor

Como se sabe, o motor é um componente essencial ao voo. Saber se ele ou eles operam normalmente é uma informação muito importante para o piloto, o que pode ser vital, dependendo do número de motores, fase de voo e condições específicas que a falha em um ou mais motores pode acarretar, caso certos procedimentos não sejam executados pelo piloto em tempo hábil. Os instrumentos do motor monitoram parâmetros de pressão, de temperatura, de rotação, de torque, de consumo, entre outras informações sobre a operação do motor da aeronave, as quais permitem à tripulação ficar ciente do momento em que se faz necessária alguma ação, em caso de pane no motor.

Os principais instrumentos dos **motores convencionais**, utilizados em aeronaves, são:

- indicador de pressão do óleo lubrificante;
- indicador de temperatura do óleo lubrificante;
- indicador de temperatura da cabeça do cilindro,
- indicador de temperatura do ar de admissão;
- indicador de temperatura de admissão de ar do carburador;
- indicador de pressão de combustível;
- indicador de quantidade de combustível;
- indicador de torque do motor.

Enquanto nas aeronaves equipadas com motores a turbina são comuns os seguintes instrumentos:

- indicador de pressão do óleo lubrificante;
- indicador de pressão do combustível,
- indicador do fluxo de combustível;
- indicador de quantidade de combustível;



Motor convencional: motor alternativo.



Torque: torque do motor, ou binário motor; medida de força rotacional exercida sobre um eixo, mede-se em Newton metro (Nm). Ele reflete a potência disponibilizada pelo motor para girar o eixo de manivela nos motores alternativos, ou eixo de potência nos motores a turbina.

- indicador da razão de pressão dos gases de escapamento;
- indicador de temperatura dos gases entre turbinas;
- indicador de temperatura dos gases de escapamento;
- indicador de velocidade do(s) compressor(es) – tacômetro;
- indicador de torque do motor – torquímetro;
- indicador de pressão do ar de admissão;
- indicador de temperatura do ar de admissão.

Cabe destacar que as listas apresentadas são ilustrativas, de maneira que podem ocorrer configurações diferentes de instrumentos do motor, com mais ou menos instrumentos.

A Figura 13 apresenta alguns instrumentos analógicos utilizados, em geral, em motores convencionais, enquanto a Figura 14 destaca uma tela do sistema de instrumentos do motor empregada em aeronaves mais modernas.

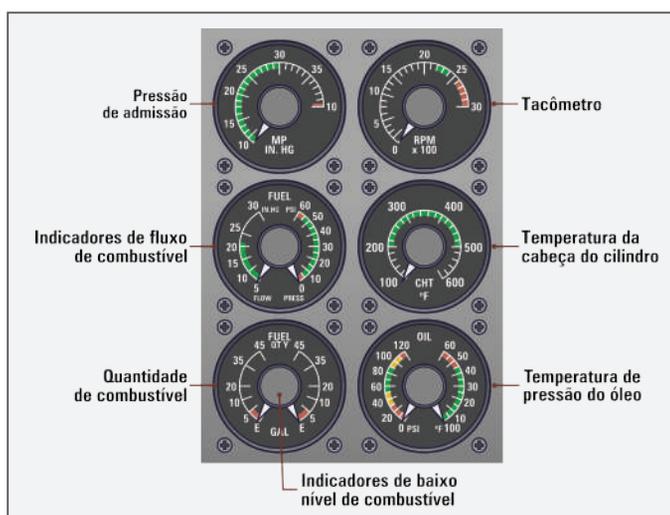


Figura 13 - Instrumentos analógicos usados em aeronave equipada com motor convencional

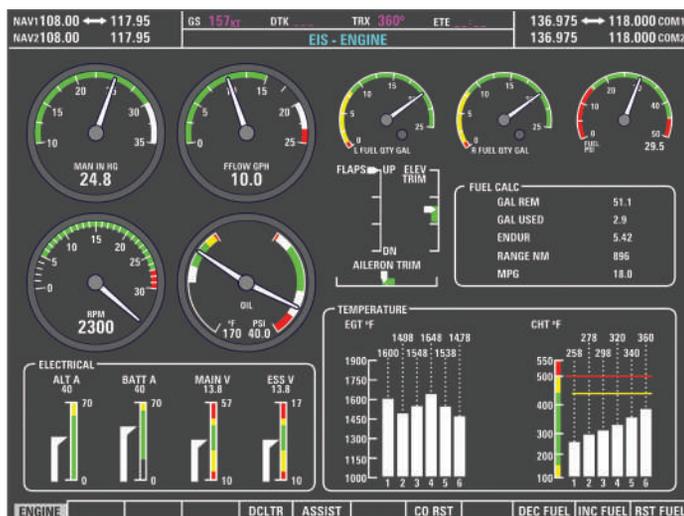


Figura 14 - Instrumentos do motor em tela digital

Tais instrumentos são instalados um próximo ao outro, formando o grupo dos instrumentos do motor no painel da cabine. Por uma questão de economia de espaço, os instrumentos do motor são colocados na área central do painel, para permitir a visualização tanto do piloto quanto do copiloto. Em aeronaves leves, que exigem somente um piloto, não há necessidade dessa disposição no painel. Em aeronaves multimotoras, costuma-se usar um único instrumento para um determinado parâmetro do motor, entretanto com indicação de todos os motores, por meio da utilização de vários ponteiros no mesmo indicador, conforme se percebe na Figura 15.

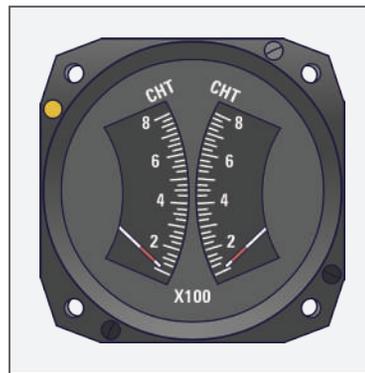


Figura 15 - Indicador de temperatura da cabeça do cilindro com dupla indicação

1.2.3 Instrumentos de navegação

Quando se usa o termo navegação aérea, é preciso ter em mente o conjunto de técnicas e meios para conduzir uma aeronave de um lugar a outro em segurança. Esse tipo de navegação exige uma orientação constante, seja por conhecimento da região ou por meio de equipamentos e de instrumentos para esse fim. Os instrumentos de navegação disponibilizam informações que possibilitam ao piloto conduzir a aeronave em um curso definido rumo ao destino desejado. Tais instrumentos se utilizam de referências, que podem ser naturais, como o norte magnético da Terra, ou de sinais emitidos por estações instaladas em locais estratégicos.

O grupo de instrumentos de navegação inclui compassos de vários tipos, alguns dos quais incorporam o uso de sinais de rádio para definir um curso específico, enquanto a aeronave segue a rota de um ponto para outro. Há também instrumentos de navegação que são projetados especificamente para auxiliar a ação do piloto durante o pouso em uma pista de aeroporto. Esses recursos são fundamentais para a aterragem em condições críticas de visibilidade. A Figura 16 apresenta um painel de aeronave equipado com instrumentos analógicos. Nela, é possível perceber a localização dos instrumentos de navegação. Cabe destacar que a bússola magnética não fica no painel, normalmente, é instalada acima do para-brisa frontal da cabine.



Figura 16 - Painel com instrumentos analógicos de navegação em destaque

Nos primórdios da aviação, a bússola e o relógio forneciam informações que, associadas às de velocidade da aeronave e do vento, permitiam o cálculo para o desenvolvimento da navegação. Esse tipo de navegação requer a ação periódica da tripulação para calcular a posição da aeronave na rota desejada. Posteriormente, foram utilizadas ondas de rádio para se obterem referências de localização. Nesse sistema, rádios e equipamentos de navegação aérea enviam sinais de localização, poupando a tripulação da tarefa de calcular a posição da aeronave ao longo da rota.

A navegação aérea, realizada por meio de ondas de rádio, é chamada de radiogonômica (Figura 17). É uma forma de orientação em que são utilizadas estações fixas que emitem sinais de referência para as aeronaves que, por meio de um receptor a bordo, medem a diferença de fase entre os sinais emitidos e recebidos e os convertem em graus magnéticos chamados radiais, os quais indicam ao piloto a localização da aeronave. Os instrumentos baseados no sistema radiofarol omnidirecional VHF, em inglês, *very high frequency omnidirectional range* (VOR), e no radiofarol não direcional, em inglês, *non-directional beacon* (NDB), são exemplos de instrumentos de navegação radiogonômica.

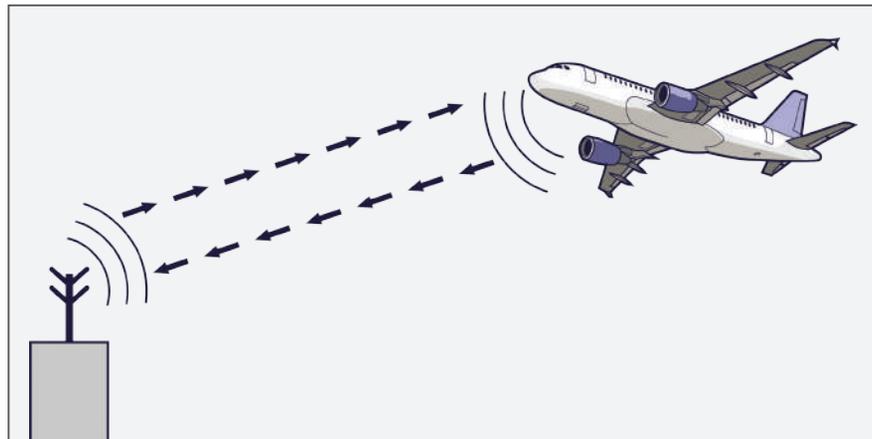


Figura 17 - Sistema de navegação radiogonômica

Atualmente, as aeronaves são equipadas com dispositivos que recebem os sinais de localização do sistema de posicionamento global, em inglês, *global positioning system* (GPS), o qual utiliza um conjunto de satélites para identificar a localização da aeronave via triangulação geométrica. Essa tecnologia é adotada em alguns grupos de instrumentos para fins de navegação. Os instrumentos básicos de navegação são:

- a) bússola magnética - ela indica a posição da aeronave em relação ao norte magnético da Terra. Na operação desse instrumento, são previstos erros, como a variação ou a diferença entre a direção magnética e a verdadeira, assim como o desvio da indicação causado pela interferência de fontes de energia elétrica da aeronave, o que requer um cartão de correção da bússola. Por essa razão, ela não é instalada no painel de instrumentos, sendo comum sua localização na parte superior do para-brisa, ou alocada remotamente no estabilizador vertical da aeronave.

A bússola magnética (Figura 18) é confiável em voo nivelado, porém ela pode apresentar indicações confusas quando a aeronave executa manobras para virar, subir, descer ou acelerar, em virtude da inclinação do campo magnético da Terra e de sua construção.

Por essa razão, o girodirecional é usado em conjunto com a bússola para a operação da aeronave;

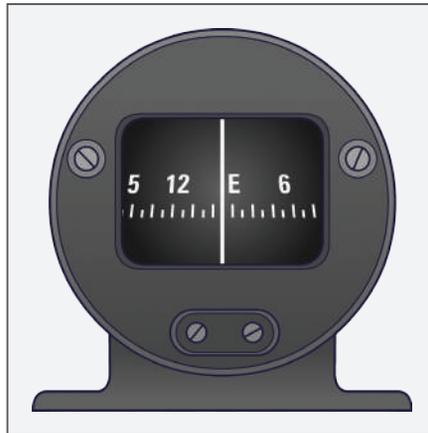


Figura 18 - Bússola magnética usada em aeronaves

b) indicador de curso - comumente chamado indicador de situação horizontal, em inglês, *horizon situation indicator* (HSI), é um instrumento de navegação montado abaixo do horizonte artificial, no lugar do girodirecional convencional. Ele combina um indicador de curso (Figura 19) com a exibição VOR/ILS, reduzindo a carga de trabalho dos pilotos e diminuindo o número de elementos no painel principal de instrumentos. No centro do instrumento, há uma representação esquemática de um avião, na qual são apresentadas as referências de VOR e ILS. Assim, o instrumento exibe uma representação plana da posição geográfica do avião do rumo escolhido em relação a uma estação de VOR ou de ILS.

O indicador de direção é, geralmente, acoplado a uma bússola giromagnética remota e é, frequentemente, interligado com um piloto automático capaz de executar uma aproximação seguindo o localizador ILS e o *glide slope*;

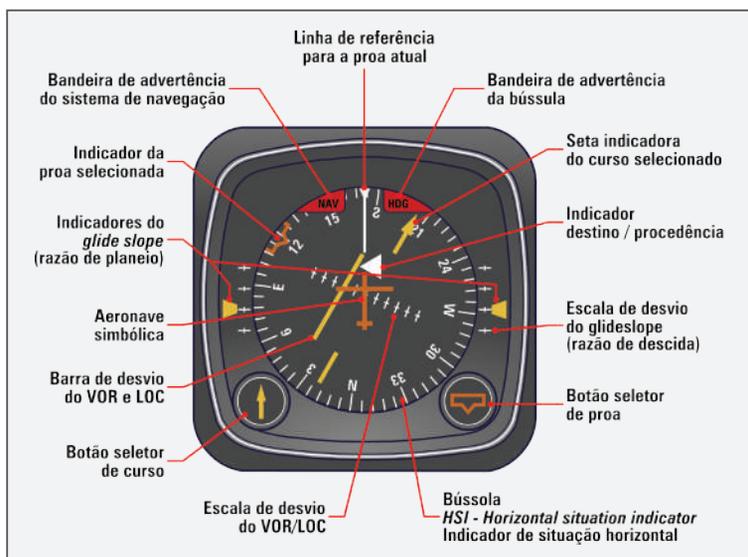


Figura 19 - Indicador de curso



VOR: o radiofarol omnidirecional VHF, em inglês, *very high frequency omnidirectional range*, é um equipamento eletrônico usado na navegação aérea.

ILS: sinais de frequência emitidos por antenas localizadas próximas à cabeceira oposta da pista, na qual se executa a aproximação; os sinais têm a finalidade de fornecer referências para o piloto ou piloto automático, a fim de alinhar a aeronave ao eixo da pista.

Glide slope: sinais de frequência emitidos por antenas, localizadas próximas à cabeceira da pista, cuja finalidade é fornecer o ângulo de planeio correto (rampa de pouso) durante a aproximação de uma aeronave.

- c) radiogoniômetro automático - mais conhecido, em inglês, *automatic direction finder* (ADF), é considerado o mais simples instrumento de navegação aérea e foi o precursor do auxílio de radiofrequência para os voos IFR. Esse sistema foi implantado por volta de 1923 e é utilizado até hoje em muitas localidades, onde é inviável a instalação de sistemas de navegação mais avançados, como VOR, DME e/ou ILS, pelo motivo de que esses sistemas demandam um custo de implantação relativamente superior. O funcionamento do radiogoniômetro automático é baseado na referência de sinais de frequência AM emitidos por estações transmissoras chamadas de radiofarol circular, em inglês, *non-directional beacon* (NDB), e por emissoras de rádio AM comuns. O sistema consiste em uma unidade receptora e em um indicador com ponteiro que gira sobre um mostrador dividido em 360 graus. A parte superior do instrumento representa 0° (Figura 20). Se o ponteiro apontar para essa direção, a antena de NDB estará na direção à frente da aeronave. Caso aponte para o nº 3, significa que a antena de NDB está a 30° à direita. E, se indicar o número 30, significa que a antena estará a 300° a partir da linha central, ou seja, a 60° à esquerda da aeronave;



Figura 20 - Indicador de ADF e seu receptor

- d) rádio omnidirecional de altíssima frequência - comumente conhecido por *omnidirectional range* (VOR/VHF), é um auxílio à navegação que opera em VHF, nas frequências de 108.00 a 117.95 MHz. Ele é o meio de navegação mais utilizado mundialmente, embora esteja sendo substituído pelo sistema GPS, gradativamente implantado como meio de navegação primário para a aviação. A indicação de VOR, no receptor do avião, é representada pela abreviatura NAV.

Como o sistema VOR utiliza sinais de rádio com frequência VHF, o seu alcance fica limitado, pois, ao contrário dos sinais do NDB, os do VOR não conseguem acompanhar a curvatura da Terra. Por isso, seu alcance é limitado por obstáculos do terreno.

A operação do VOR, resumidamente, consiste na seleção de uma frequência determinada para ser utilizada como referência. No indicador analógico, constam duas bandeiras para indicar o sentido do deslocamento da aeronave de modo a atingir o destino. As bandeiras são *TO* (em português, ir para), que aponta o sentido de deslocamento ao encontro do ponto de referência, e *FROM* (em português, vir de), que indica o sentido de afastamento do ponto de referência. A título de exemplo, caso o curso seja 090, a

aeronave deve ser conduzida com proa 090 para ir ao encontro do VOR. A Figura 21 apresenta uma ilustração dos instrumentos nessa situação. Destaca-se a bandeira TO indicando o sentido do deslocamento em direção à referência de VOR.



Figura 21 - Indicador de ADF e de VOR

Há outros instrumentos de navegação que utilizam as referências de estações fixas, as quais emitem sinais que ensejam a localização da aeronave ou da pista de pouso. Também existem as referências globais fornecidas por satélites e apresentadas no instrumento do GPS. Todos esses indicadores serão estudados no tópico específico de navegação e comunicação.

1.3 Localização dos instrumentos na cabine

A distribuição dos instrumentos no painel não é aleatória, ela segue uma lógica de destaque para acesso aos equipamentos mais importantes ao voo e à tomada de decisão do piloto, além de agrupar as informações por sistema ao longo do painel. Essa organização é compreensível e necessária, porque a tripulação deve ter conhecimento instintivo quanto à posição das fontes de informações, de forma lógica, agrupada, e com certa padronização entre a distribuição dos instrumentos nos painéis das aeronaves.

A organização dos instrumentos no painel é feita de modo que o piloto e o copiloto consigam visualizar sem esforço as informações mais vitais e críticas para o voo, tais como velocidade da aeronave, altitude, atitude de voo e razão de subida. Essas informações são apresentadas ao piloto logo abaixo do para-brisa, no painel principal de instrumentos. A disposição dos instrumentos objetiva proporcionar à tripulação o mínimo esforço para compreender a informação essencial fornecida pelo instrumento, de modo que, em momentos críticos ou em uma emergência durante o voo, ela possa agir com consciência da situação no menor tempo possível. Esse tempo de percepção das informações é muito relevante para o piloto de aeronaves de alto desempenho, como os jatos militares.

Seis instrumentos são considerados os mais importantes para o voo e são empregados em todas as fases deste, quais sejam:

- a) indicador de velocidade;
- b) altímetro;

- c) indicador de atitude, podendo ser um dos seguintes instrumentos:
 - horizonte artificial ou giro-horizonte;
 - indicador de atitude ou diretor de voo;
 - indicador de atitude eletrônico;
- d) indicador de direção, que pode ser um dos seguintes instrumentos:
 - bússola de leitura direta;
 - indicador de situação horizontal ou indicador de curso;
 - indicador eletrônico de situação horizontal.
- e) indicador de razão de subida;
- f) indicador de curva e inclinação ou coordenador de curva.

Na Figura 22, é apresentada a posição dos instrumentos analógicos básicos de voo e de navegação no painel da cabine. Na Figura 23, são mostradas as indicações dos instrumentos primários de voo na tela de um PFD.



Figura 22 - Seis instrumentos analógicos básicos de voo (vermelho) e de navegação (verde)



Figura 23 - Instrumentos primários de voo em tela digital

A localização considerada mais importante no painel de instrumentos fica na posição logo abaixo do para-brisa, é chamada de painel principal de instrumentos. Nessa posição, há duplicidade de instrumentos no lado esquerdo (piloto) e no lado direito (copiloto). Existem, ainda, os painéis laterais, os painéis superiores e o pedestal central (localizado entre o piloto e o copiloto).

Conforme foi mencionado, os instrumentos do motor localizam-se na porção central do painel (Figura 24), de modo que possibilita a visualização tanto pelo piloto quanto pelo copiloto.



Figura 24 - Posição dos instrumentos analógicos do motor no painel

1.4 Conceito de aviônicos

O termo aviônicos é formado pela aglutinação das palavras aviação e eletrônicos, e é usado para identificar os equipamentos eletrônicos que equipam as aeronaves modernas. Esse termo passou a ser utilizado a partir dos anos de 1970. O sistema de aviônicos inclui elementos de comunicação, de navegação, de indicação das informações e de gerenciamento de múltiplos sistemas, incluindo aqueles que são instalados em aviões para executar funções específicas muito simples ou extremamente complexas.

Em aeronaves modernas, são encontrados equipamentos que refletem o estado da arte da instrumentação, da navegação aérea, da comunicação e do sistema de alarmes, que diminuem a carga de trabalho da tripulação e contribuem sobremaneira para a diminuição do erro humano, evitando acidentes e tornando mais segura a aviação.

Como se vê, o termo aviônicos representa muito mais que a incorporação de componentes eletrônicos nos equipamentos aeronáuticos, ele evidencia uma revolução que modificou de forma indelével a maneira de se voar em uma aeronave. A tendência é a atribuição cada vez maior de tarefas aos computadores, cabendo à tripulação o gerenciamento do voo e os procedimentos de emergência.

1.4.1 Aviônicos na manutenção aeronáutica

O alto grau de integração dos sistemas permite a concentração de informações em computadores de gerenciamento e controle de voo e de sistemas. Entre as inúmeras informações apresentadas nos monitores das cabines modernas, estão as relativas ao sistema de manutenção e de diagnóstico da aeronave, que se referem à manutenção e à inspeção de componentes dos sistemas motopropulsor e de célula. Dessa forma, é necessário que os técnicos de manutenção aeronáutica estejam familiarizados com o funcionamento de vários equipamentos aviônicos que impactam em suas áreas de atuação, haja vista que a manutenção desses tipos de equipamento exerce influência direta ou indireta em todos os sistemas da aeronave.

A manutenção dos dispositivos aviônicos é, na maioria das vezes, reservada aos fabricantes desses equipamentos ou à empresa de reparo certificada. No entanto, a instalação e o funcionamento adequado desses dispositivos e sistemas são responsabilidades dos técnicos de manutenção. A própria manutenção na cabine sofreu grande mudança nas últimas décadas, pois se passou a ter o apoio de sensores e de computadores que identificam determinados problemas e os informam ao técnico, precisando o caminho para a solução da pane. Muito diferente das longas pesquisas de pane que os técnicos realizavam nas aeronaves mais antigas.

A Figura 25 apresenta o módulo de um PFD com as placas internas expostas. Essas placas somente são submetidas à manutenção pelo fabricante ou pela oficina homologada por este. A Figura 26, por seu turno, ilustra o compartimento de aviônicos localizado no nariz da aeronave.

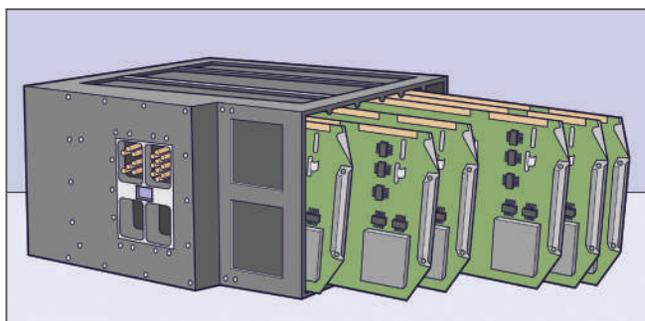


Figura 25 - Módulo de um PFD com as placas internas expostas

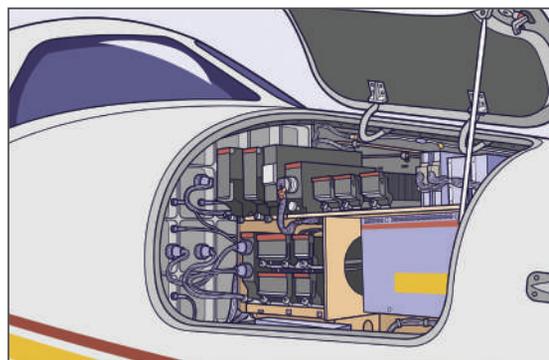


Figura 26 - Compartimento de aviônicos na parte dianteira da fuselagem

1.4.2 História dos aviônicos

A incorporação de equipamentos eletrônicos às aeronaves foi um processo natural que se valeu do notável desenvolvimento verificado na área de eletrônica. Esse progresso permitiu a produção crescente de equipamentos aeronáuticos para atender às necessidades da aviação civil e militar, em busca de voos mais seguros e eficientes.

Esse fenômeno teve impulso a partir de década de 1920, quando as aeronaves começaram a ser utilizadas em fins comerciais. Sentia-se, então, a necessidade de novos meios de comunicação e de navegação que tornassem mais segura a pilotagem, dependendo menos das boas condições climáticas para o desenvolvimento do voo.

Na década de 1930, o primeiro pouso cego foi realizado por meio de controle via rádio, ao mesmo tempo em que a radionavegação baseada em estações de rádio começou a se expandir. No final dessa década, começaram a ser usadas as ondas de rádio de alta frequência, incluindo a introdução dos radares de alta frequência.

Na década de 1940, em virtude da 2ª Guerra Mundial, houve um grande avanço na aviação, o que incluiu os sistemas de navegação e de comunicação. Nesse período, foi introduzida a comunicação entre as aeronaves e entre essas e o solo. Ademais, incorporaram-se os sistemas de comunicação em alta frequência e o de navegação VOR. Ainda nessa década, foi criado o transistor, matéria-prima para a revolução na aviação iniciada em sequência.

De fato, nas décadas seguintes, vislumbrou-se um processo crescente de incorporação de equipamentos eletrônicos nas aeronaves, atendendo às necessidades do transporte aéreo civil que aumentou consideravelmente no período. O sistema de comunicação e os equipamentos de navegação tornaram-se refinados. E expandiu-se o desenvolvimento de componentes de estado sólido, especialmente na década de 1960, em que foram produzidas grandes quantidades de equipamentos de navegação e de comunicação robustos e com dimensões menores.

Os projetos desenvolvidos no final da década de 1970 já se beneficiavam de alguns novos conceitos, como o *attitude and heading reference systems* (AHRS), o *air data computer* (ADC) e os tradicionais mostradores analógicos, que davam lugar a telas com **tubos de raios catódicos**, em inglês, *cathode ray tube* (CRT). Inicialmente, essa tecnologia permitiu simplificar os processos operacionais, uma vez que parte do serviço passou a ser realizada por computadores, além de aumentar significativamente a consciência situacional do piloto ao exibir dados de forma clara, em especial os de navegação.

Nesse contexto, alguns modelos de aeronaves comerciais receberam as cabines de vidro. No entanto, os sistemas analógicos continuavam presentes, sobretudo diante da falta de confiabilidade nos novos recursos e, ainda mais importante, da inexistência de uma integração entre os diversos computadores e sistemas.

O desenvolvimento dos dispositivos seguiu com a tendência de construção de equipamentos menores, mais leves e com a incorporação de novas tecnologias, como o sistema de referenciamento por satélite. Esse processo evoluiu com a assimilação de sistemas integrados e, principalmente, de modo mais recente, com a incorporação de tecnologias de computação. Durante tal processo, o sistema de instrumentos foi bastante influenciado, em especial no aspecto da integração das informações fornecidas pelos instrumentos a outros sistemas de controle e de gerenciamento de voo.

Esse fluxo de informações confiáveis permitiu a automação dos voos nunca antes vista e a otimização das informações em telas que diminuem a quantidade de instrumentos individuais e propiciam a tomada de decisão com muito mais segurança. Nesse cenário, a cabine de vidro se firmou, de maneira que a presença de telas de cristal líquido, em inglês, *liquid crystal displays* (LCD), e de tubos de raios catódicos, em inglês, *cathode ray tubes* (CRT), tornou-se comum também em aeronaves pequenas e leves.



Tubo de raios catódicos: tipo de válvula termiônica contendo um ou mais canhões de elétrons e um ecrã fluorescente, usado para apresentar imagens.

LCD: o *display* de cristal líquido, em inglês, *liquid crystal display*, consiste em um painel fino usado para exibir informações por via eletrônica, como texto, imagens e vídeos; ele é composto de um líquido polarizador de luz, eletricamente controlado, que se encontra comprimido dentro de celas, entre duas lâminas transparentes polarizadoras.

Com efeito, nas últimas décadas, o desenvolvimento dos aviônicos das aeronaves tem ocorrido a um ritmo mais rápido do que o verificado nos componentes de célula e de motopropulsor. A tendência é a de que esse desenvolvimento continue no futuro próximo, com melhorias na área de eletrônica de estado sólido, sob a forma de micro e nanotecnologias. Tal rumo levará ao emprego de dispositivos mais leves, menores e com notável confiabilidade. A integração de vasta gama de comunicação e auxílios à navegação é uma tendência bem clara de desenvolvimento nas aeronaves modernas.

Diante das considerações apresentadas, não há como estudar o sistema de instrumentos de aeronaves sem conhecer o processo de incorporação de equipamentos eletrônicos que esse sistema sofreu até os dias atuais. Não é didático abordar isoladamente os instrumentos analógicos sem a devida referência ao equipamento aviônico correspondente, visto que ambos têm o seu espaço no mercado aeronáutico e o técnico de manutenção na área de aviônicos precisa conhecê-los muito bem.

1.5 *Glass cockpit* em modernas aeronaves

Modernas aeronaves utilizam a chamada cabine de vidro. Essa designação se refere à predominância de monitores nos painéis da aeronave, semelhantes às telas de cristal líquido empregadas em monitores de computadores pessoais. Tais cabines são fisicamente muito diferentes das equipadas com inúmeros comandos e instrumentos individuais eletromecânicos, nas quais predominavam os instrumentos circulares em formato de relógio.

A aparência da cabine é emblemática para destacar a enorme evolução que representa a cabine de vidro, pois, enquanto esta emprega poucos monitores de computadores para reunir grande quantidade de informações e comandos, a cabine com instrumentos analógicos mostra-se cada vez mais apertada devido à grande quantidade de instrumentos e equipamentos individuais. Esse processo otimizou enormemente a cabine, permitindo que o piloto foque a atenção nas informações mais pertinentes requeridas pela fase de voo.

Por trás dos poucos monitores, há um grande número de equipamentos trabalhando, tais quais computadores, sensores e atuadores, para que o voo se desenvolva dentro do esperado. O desenvolvimento dos sistemas aviônicos inegavelmente aumentou a segurança de voo, elevou a eficiência das aeronaves e ajudou, sobremaneira, a tripulação, reduzindo a carga de trabalho e facilitando a tomada de decisão, além de apresentar as informações de maneira mais fácil de serem entendidas.

Posto isso, vê-se que a diferença entre as cabines analógicas e as denominadas *glass cockpit* está além da simples aparência. No início deste capítulo, as Figuras 2 e 3 permitiram comparar uma cabine com instrumentos analógicos a uma de vidro. Na primeira imagem, a cabine analógica apresenta uma aparência caótica em função do enorme número de indicadores.

Resumindo

Neste capítulo, foram apresentadas várias informações e características do sistema de instrumentos de aeronaves. Em adição, viu-se a importância dos dados apresentados por esse sistema nos painéis de aeronaves antigas ou modernas, muitos dos quais são vitais para o voo e para a tomada de decisão pelo piloto em momentos críticos. Dessa forma, a exposição das informações coletadas pelos sensores dos instrumentos é um fator relevante na construção de indicadores. Elas devem ser claras e obtidas com o menor esforço pela tripulação. De igual modo, a posição dos instrumentos é definida de acordo com a importância deles para o voo, quanto mais relevante, mais próximo do campo de visão do piloto e do copiloto.

Apresentou-se a divisão básica dos instrumentos em três grupos, em concordância com a pertinência das funções executadas. Os instrumentos de voo, usados para indicar a atitude da aeronave; os de navegação, fornecedores de referências de rotas e localização da aeronave durante o deslocamento de um ponto a outro; e, por último, os instrumentos do motor, indicadores de parâmetros do grupo motopropulsor.

Em seguida, explicou-se a transformação verificada no sistema de instrumentos em função da evolução da eletrônica e dos computadores. Esse evento introduziu os aviônicos nas aeronaves e levou ao surgimento das cabines de vidro, em inglês, *glass cockpit*, caracterizadas pela predominância de poucos monitores de computador na cabine, no lugar de instrumentos e comandos individualizados com grande incidência de indicadores em formato de relógios.

Concluindo, foi destacada a integração de sistemas proporcionada pela utilização de computadores que gerenciam e controlam o voo. Da mesma forma, foram abordados o histórico dos aviônicos e a mudança na manutenção com a crescente introdução destes nas aeronaves modernas.

Capítulo 2

Instrumentos para medição de pressão

Para que um voo ocorra com segurança, é preciso o monitoramento de sistemas e de componentes, muitas vezes, essa verificação é feita medindo a pressão do fluido que se encontra no local do qual é necessário obter a informação. Outras vezes, as características da pressão são utilizadas para conseguir os dados acerca da variação de outra grandeza, tais como a temperatura e o torque.

Alguns dos principais instrumentos de voo e de indicação de parâmetros do motor funcionam baseados na medição da pressão. Eles estão entre uns dos instrumentos mais críticos da aeronave, cujas informações são vitais para que o piloto possa manter o voo em condições seguras. Há diversos deles na cabine, sejam de aeronaves antigas ou modernas. São tanto de leitura direta quanto de sensoriamento remoto. Entre esses, há um grupo que utiliza as características da pressão atmosférica e da pressão dinâmica em seu funcionamento, os chamados instrumentos anemométricos, como exemplos são o altímetro, o velocímetro e o indicador de razão de subida, todos serão estudados mais à frente.

Com efeito, são empregadas várias técnicas para indicar com segurança a pressão dos fluidos. A mais comum é a que usa como princípio de funcionamento as propriedades de deflexão de certos materiais, conforme se verifica naqueles utilizados para a indicação de parâmetros de pressão de fluidos dos motores, tais como pressão de óleo, de combustível e de admissão do ar.

Posto isso, é percebido que os instrumentos de medição de pressão são muitos e imprescindíveis à segurança do voo.

2.1 Princípios básicos

De maneira geral, o funcionamento dos instrumentos é dividido em duas etapas:

- medição por meio de algum tipo de mecanismo sensor capaz de perceber a pressão e sua variação de forma consistente;
- apresentação da informação na cabine da aeronave.

Além dessas etapas, há, ainda, a tarefa de calibração para assegurar a veracidade da informação.

Na fase de medição, são empregados determinados mecanismos de sensoriamento considerados mais adequados para o tipo de pressão que se pretende monitorar. Nos sistemas de instrumentos das aeronaves, existem três mecanismos fundamentais para esse fim, quais sejam, tubo de Bourdon (Figura 27), diafragma (Figura 28) e foles, e dispositivo de sensoriamento de estado sólido (Figura 29).

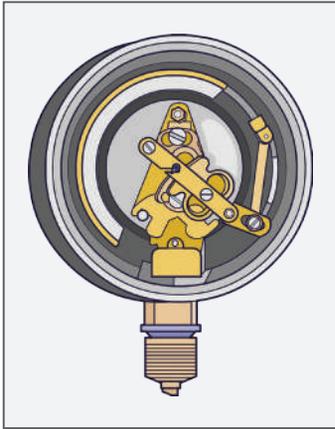


Figura 27 - Mecanismo interno do indicador com tubo Bourdon

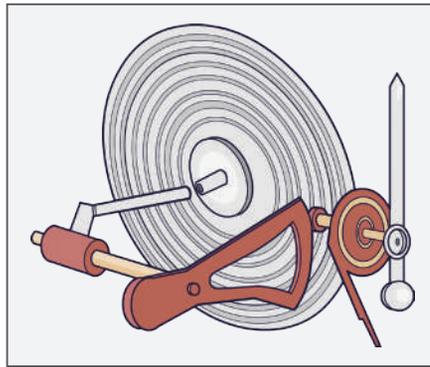


Figura 28 - Mecanismo de diafragma

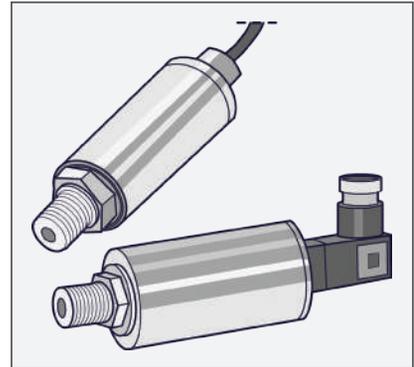


Figura 29 - Transdutor de pressão de estado sólido

Antes de o francês Eugène Bourdon patentear o sensor em 1848, o engenheiro alemão Schinz praticava a mensuração de pressão com um tubo de paredes finas, em 1846. Constituído de um tubo curvo (Figura 30) ou em espiral (Figura 31), cujas paredes são finas e feitas de liga metálica, o mecanismo de Bourdon é fundamentado em proporcionalidade. Quando não há pressão, o tubo permanece em seu formato próprio. Conforme a pressão aumenta, a extremidade fechada, a qual é livre para se movimentar, tende a ficar em linha reta. À vista disso, a pressão do líquido no tubo é proporcional ao seu deslocamento.

Para converter o movimento do tubo em indicação no instrumento, é instalada na extremidade móvel uma ligação mecânica com pequenos eixos e engrenagens, que transmitem o movimento ao ponteiro do indicador, conforme mostram estas figuras:

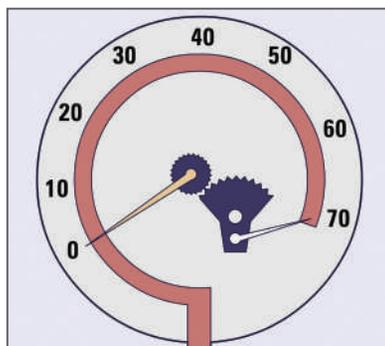


Figura 30 - Funcionamento do tubo de Bourdon em formato de (C)

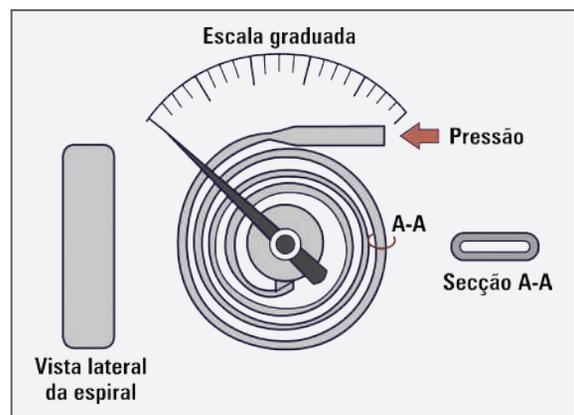


Figura 31 - Funcionamento do tubo de Bourdon em formato espiral

No mostrador do instrumento, há uma escala baseada na calibração do movimento do tubo, de maneira que a posição do ponteiro fica alinhada ao zero dessa escala, quando não há pressão no interior do tubo. À medida que a pressão aumenta, o ponteiro fica alinhado às sucessivas indicações da escala até a pressão máxima de segurança do equipamento. O movimento do ponteiro ao longo da escala informa o aumento ou a diminuição da pressão.

Esse tipo de mecanismo está presente em diversos medidores de pressão usados em aeronaves, sejam eles de alta ou de baixa pressão. Nos de alta, são empregados tubos rígidos, enquanto nos de baixa são utilizados materiais mais flexíveis que se estendem e encolhem mais rapidamente. Como se percebe, os tubos de Bourbon devem ser fabricados com materiais que possuam a característica de se estender e encolher por diversas vezes, mantendo a consistência do movimento. Normalmente, são utilizadas ligas de cobre, de latão e de bronze. Esse sistema de medição é considerado muito confiável, de baixo custo e de boa vida útil. É encontrado nos manômetros do sistema hidráulico, de lubrificação dos motores e do tanque de oxigênio.

Em um sistema fechado, a variação de temperatura do líquido e a de pressão do vapor produzido por fluido ou gás aquecido são proporcionais. Portanto, o tubo de Bourdon é usado, também, para medir a temperatura, aplicação que é encontrada nos medidores de temperatura do óleo.

Em geral, os medidores de pressão equipados com tubo de Bourdon são de leitura direta, de maneira que o fluido é conduzido por uma tubulação até o instrumento no painel da cabine. Essa configuração é especialmente funcional em aeronaves pequenas, monomotoras, nas quais o motor é instalado logo à frente do painel de instrumentos na extremidade anterior da fuselagem. Contudo, é possível que o fluido seja direcionado ao tubo de Bourdon, instalado de forma remota, longe do indicador da cabine. Basta que a informação fornecida pelo tubo seja transmitida ao indicador, por algum outro meio, como, por exemplo, sinais elétricos conduzidos por fios. Essa solução é ideal para aeronaves multimotoras, uma vez que a instalação de longas linhas de fluidos ligando os motores à cabine não é a mais adequada, pois, além de demandar mais peso para a aeronave, aumenta o risco de vazamento de fluidos na cabine, principalmente de combustível.

Nos instrumentos de pressão com sensoriamento remoto, o movimento do tubo de Bourdon é convertido em sinal elétrico e transmitido através de fios ao indicador no painel da cabine. Esse método é mais eficiente e emprega componentes mais leves, além de eliminar a possibilidade de vazamento de fluidos dentro da cabine.

O diafragma e os foles (Figura 32) são dispositivos básicos de sensoriamento de pressão. O primeiro consiste em um disco de metal oco, com paredes finas corrugadas (enrugadas, em forma de sanfona), com apenas uma abertura, pela qual é exercida a pressão nas paredes internas do diafragma. O segundo, na verdade, é a utilização de diafragmas conectados, formando um conjunto de diafragmas.

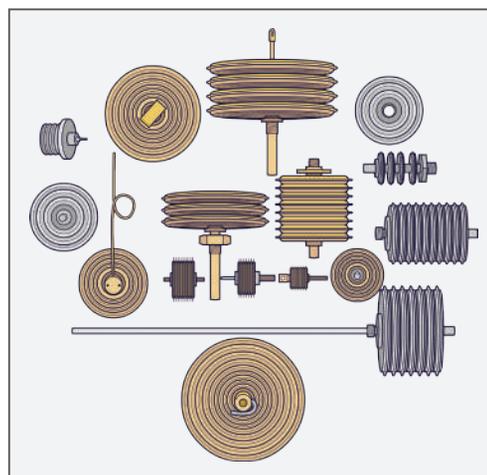


Figura 32 - Diafragmas e foles

No momento em que a pressão é introduzida através da abertura, o diafragma se expande, fazendo com que seu volume aumente. No lado oposto da abertura, é instalado um mecanismo que transmite o movimento de expansão e de contração do diafragma para um indicador, o qual converte o movimento linear dele em movimento rotatório sobre uma escala calibrada na face do instrumento. A Figura 33 ilustra o funcionamento do diafragma.

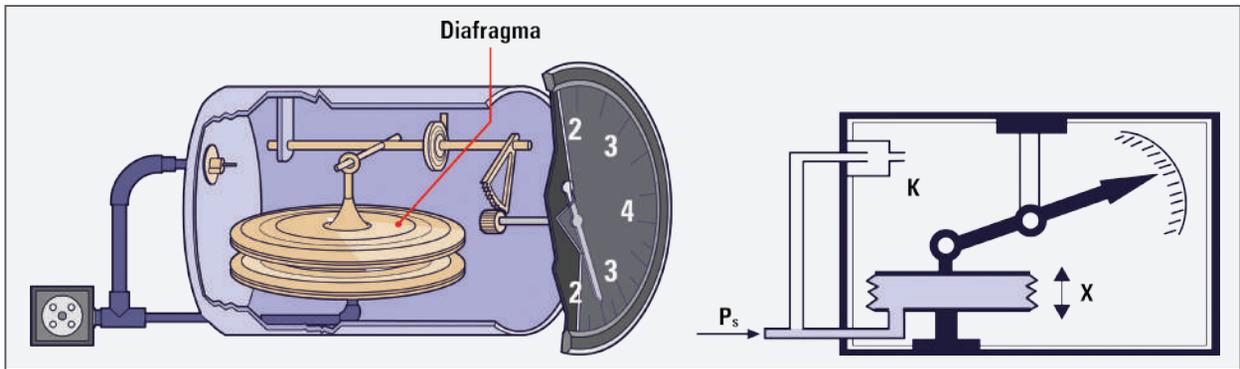


Figura 33 - Funcionamento do instrumento de pressão com diafragma

Nesse contexto, há, também, uma variação do diafragma, denominada cápsula aneroide (Figura 34). Sua construção consiste na retirada de grande parte do ar do interior de um diafragma, deixando-se somente uma pequena quantidade com uma mola dentro para evitar esmagamento, e, em seguida, ele é lacrado. A câmara se comprime quando a pressão externa aumenta e se expande quando a pressão diminui. Esses movimentos são transmitidos ao ponteiro do instrumento que se movimenta à frente de uma escala calibrada (Figura 35). Essa cápsula é usada em muitos instrumentos de voo.

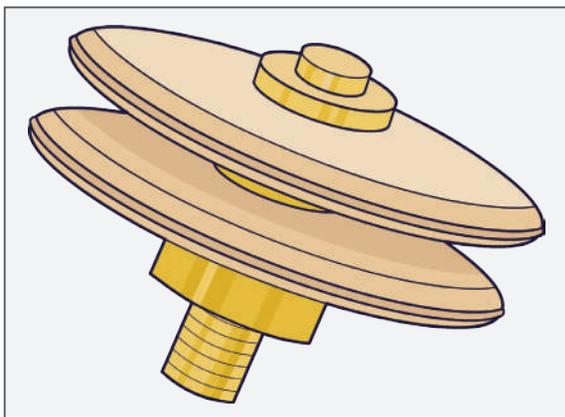


Figura 34 - Cápsula aneroide

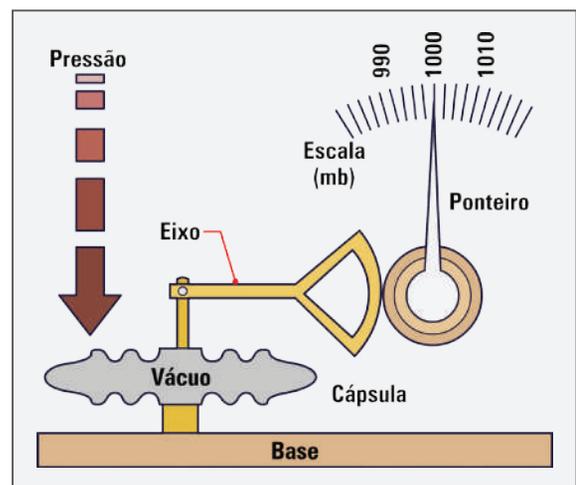


Figura 35 - Funcionamento do instrumento com cápsula aneroide

Outra forma de utilizar um diafragma como sensor de pressão é abastecê-lo com um gás sob pressão atmosférica padrão e, depois, lacrá-lo. O funcionamento é idêntico ao da cápsula aneroide. Quando a pressão externa for maior que a interna, o diafragma se contrai; se a pressão externa for menor, ele se expande.

Cada um desses diafragmas é usado em sistemas de medição para os quais são mais apropriados. O fator comum em todos é que a expansão e a contração da parede lateral do diafragma é o movimento que se correlaciona com aumento ou diminuição da pressão.

Os foles, em virtude de contar com mais de um diafragma, são muito úteis para medir a diferença de pressão entre dois gases, chamada de pressão diferencial. O movimento das paredes laterais do conjunto se relaciona às mudanças de pressão (Figura 36), tal como ocorre no diafragma. Assim, essas paredes são ligadas a um indicador com escala calibrada, para mensurar a pressão.

Os instrumentos de sensoriamento equipados com diafragmas ou foles são de leitura direta, caso em que eles dividem espaço com o indicador em única caixa, instalada no painel de instrumentos. Eles também são utilizados em muitos sistemas de instrumentos de sensoriamento remoto. Nesse caso, o sensoriamento baseado em diafragma ou fole sensível à pressão fica localizado remotamente no motor ou na célula da aeronave, associado a um **transdutor** que converte a pressão em um sinal elétrico. Esse transdutor, ou transmissor, envia um sinal para o medidor localizado na cabine da aeronave, ou para um computador, para que a condição verificada seja processada e exibida. Como exemplos de instrumentos que usam diafragmas ou foles, estão o altímetro, o indicador de razão de subida, o indicador de altitude de cabine e de pressão diferencial - utilizado em aeronaves pressurizadas - e o manômetro de admissão.



Transdutor: dispositivo que transforma um tipo de energia em outro, empregando, para isso, um elemento sensor.

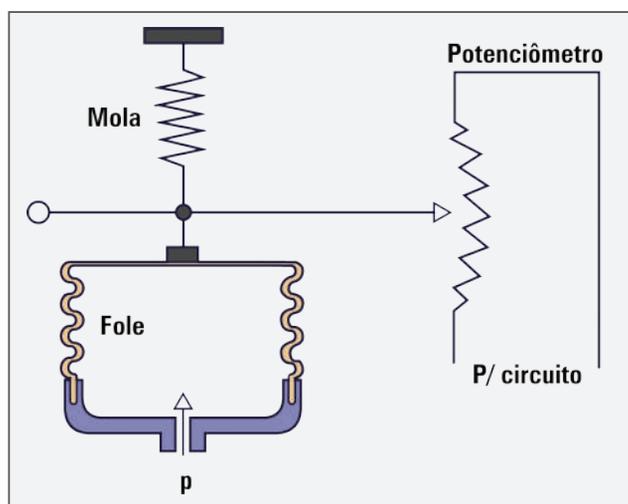


Figura 36 - Funcionamento do transdutor de pressão equipado com fole

Em aeronaves modernas, é comum a utilização de sensores lastreados nas propriedades de componentes semicondutores, chamados de elementos de estado sólido. O princípio de operação é baseado na característica de certos semicondutores de alterar consistentemente suas propriedades, quando submetidos à variação de pressão. Eles são pequenos, leves, muito confiáveis e empregados em sistemas de sensoriamento remoto. Por apresentarem pequenas dimensões, possibilitam ser posicionados em locais na aeronave julgados mais convenientes.

Muitos desses sensores emitem sinais de saída de forma digital, evitando a conversão de sinais elétricos para digitais, antes do processamento da informação em instrumentos eletrônicos de voo computadorizados e em outros computadores de bordo. Entretanto, outra parte dos sensores de estado sólido envia sinais microelétricos que são convertidos em formato digital para uso em computadores.



Cristal piezoelétrico: consiste em um cristal que, ao ser submetido a uma pressão, gera um campo elétrico que pode ser coletado como tensão elétrica.

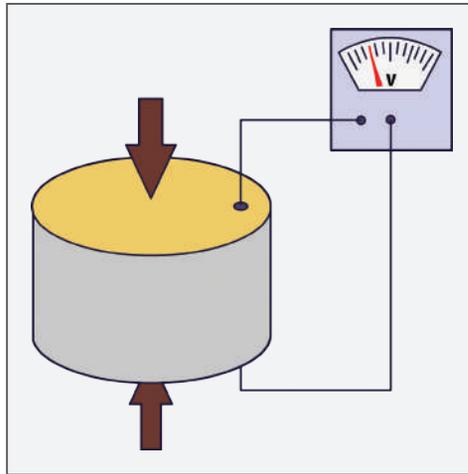


Figura 37 - Disco piezoelétrico sob pressão produzindo tensão

Certos materiais apresentam alterações na sua composição eletrônica quando sofrem os efeitos da pressão, produzindo variação de tensão, de corrente ou de sua resistência. Muitos sensores usam os **cristais piezoelétricos**, os quais possuem a capacidade de funcionar como um transdutor, convertendo a pressão em um sinal elétrico analógico.

Em um sensor típico, fios minúsculos são incrustados no semicondutor ou no cristal sensível à pressão. Quando esta age sobre o cristal (Figura 37), uma pequena quantidade de eletricidade é criada, ou, no caso de um semicondutor e alguns cristais, há uma mudança no valor de sua resistência.

Como as mudanças de resistência e de corrente variam diretamente com a quantidade de deflexão provocada pela variação de pressão nos semicondutores, as saídas são calibradas e usadas para exibir os valores de pressão do sistema.

Os sensores de estado sólido ganharam espaço na aviação pelas qualidades apresentadas e pelo fato de que quase toda a informação de pressão necessária ao motor, à célula e aos instrumentos de voo é fornecida por eles, combinada com sensores de temperatura. Entretanto, o uso contínuo de dispositivos aneroides para comparações envolvendo pressão absoluta ainda é relevante.

2.2 Tipos de pressão

Em geral, aplica-se o termo pressão como a medição da ação de alguma força exercida. Na área de aviónicos, esse termo trata de uma comparação entre duas forças, em que uma delas é a de referência. Desse modo, é possível realizar monitoramento.

É preciso ter em mente que o ar atmosférico exerce pressão em tudo que está dentro da atmosfera, mesmo quando parece não haver pressão alguma. Dessa forma, quando um pneu de automóvel está vazio, na verdade, ele apresenta a pressão atmosférica. Quando se calibra o pneu, está se aplicando uma pressão adicional à pressão já exercida pela atmosfera. Partindo dessa premissa, conclui-se que, para medir a pressão atmosférica, é necessário compará-la à ausência total de pressão, que é o vácuo. Assim, quando a comparação é realizada em relação ao vácuo, tem-se a pressão absoluta (Figura 38). Muitos instrumentos de aeronaves, tais como o altímetro, o indicador de razão de subida e o manômetro de admissão de ar, fazem uso de valores absolutos de pressão.

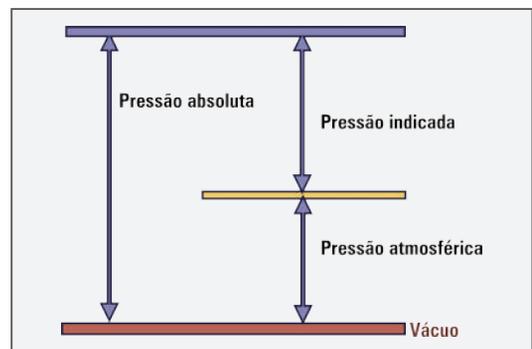
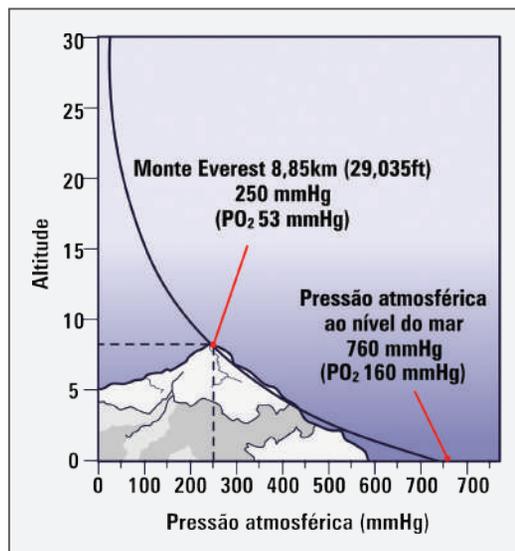


Figura 38 - Diferença entre pressão absoluta e pressão indicada

A medição de pressão mais comum é a feita utilizando-se um manômetro, que indica a pressão acima da atmosférica. Por exemplo, o valor da pressão no interior do pneu vazio mencionado é de zero libra por polegada quadrada (psi) no manômetro. Esse método facilita a medição da pressão, pois não considera o fato de a atmosfera sempre estar exercendo pressão em tudo. Por exemplo, se um pneu apresenta o valor de 30 psi ao nível do mar, esta é a medida da pressão relativa. A pressão de 14,7 psi de ar que está pressionando o lado de fora do pneu é ignorada. Nesse caso, a pressão absoluta do pneu é de 44,7 psi (30 + 14,7). O fato de não se levar em consideração o valor da pressão atmosférica se deve à presença desta nos dois lados do pneu, fazendo com que haja um equilíbrio entre as forças internas e externas deste.

Quando se diz ser menos complicado usar a pressão diferencial em vez da absoluta, é pelo motivo de que a pressão atmosférica não é constante em toda a atmosfera, porque, quanto maior a altitude, menor o seu valor (Gráfico 1). Portanto, se o pneu do exemplo anterior for calibrado com 30 psi a uma altitude de 10.000 pés acima do nível do mar, a pressão externa do pneu será de, aproximadamente, 10 psi, devido à atmosfera ser mais rarefeita. Logo, a pressão interna do pneu, necessária para equilibrar a externa, será de 10 psi, e a pressão absoluta, de 40 psi. Como se observa, o mesmo pneu com a mesma quantidade de ar apresenta diferentes valores de pressão absoluta, dependendo da altitude em que esteja. Destaca-se que, se o pneu anterior, calibrado com 30 psi, for novamente medido ao nível do mar, a leitura do manômetro será de 30 psi, pois é a pressão diferencial que está sendo mensurada. Então, não há alteração, enquanto na absoluta aumenta.

GRÁFICO 1 - Diferença de pressão atmosférica de acordo com a altitude



A utilização da pressão diferencial é eficaz quando é necessário comparar as pressões entre dois eventos diferentes para se chegar a uma informação útil, em favor da operação da aeronave. Nesse caso, a informação é apresentada em um medidor de pressão diferencial. Como exemplo, é citado o velocímetro de uma aeronave, que compara a pressão do ar ambiente com a pressão dinâmica do ar para determinar a rapidez com que a aeronave está se movimentando no espaço.

Outro exemplo é a medida da razão da pressão de um motor a turbina, uma vez que ela compara as pressões de ar da entrada e de saída do motor para indicar o empuxo desenvolvido por ele.

Tendo em vista que a pressão atmosférica varia conforme a altitude e que outras grandezas também são influenciadas por esta, foi criado um conjunto de medidas padrão (Tabela 1) para facilitar as atividades de operação e de desenvolvimento de equipamentos aeronáuticos. Esses padrões são empregados por engenheiros quando estão projetando sistemas de instrumentos e, algumas vezes, por técnicos de manutenção e pilotos em suas atividades. Com efeito, utilizar um valor padrão para pressão atmosférica é mais prático do que usar o valor real.

O valor padrão atribuído à pressão atmosférica é de 29,92 polegadas de mercúrio (Hg), de 1.023,2 hectopascal (hPa), ou de 14,7 psi. Essa medida faz parte de um conjunto de condições, consideradas padrão, que inclui a temperatura de 15 °C ao nível do mar. Também foram estabelecidos valores padrão de densidade do ar, de volume e de viscosidade. Todos esses padrões são valores médios desenvolvidos, tendo em vista que a atmosfera está em constante flutuação.

Tabela 1 - Tabela de pressão e de temperatura padrão

Atmosfera padrão			
Altitude (ft.)	Pressão (Hg)	Temperatura	
		(°C)	(°F)
0	29,92	15,0	59,0
1.000	28,86	13,0	55,4
2.000	27,82	11,0	51,9
3.000	26,82	9,1	48,3
4.000	25,84	7,1	44,7
5.000	24,89	5,1	41,2
6.000	23,98	3,1	37,6
7.000	23,09	1,1	34,0
8.000	22,22	-0,9	30,5
9.000	21,38	-2,8	26,9
10.000	20,57	-4,8	23,3
11.000	19,79	-6,8	19,8
12.000	19,02	-8,8	16,2
13.000	18,29	-10,8	12,6
14.000	17,57	-12,7	9,1
15.000	16,88	-14,7	5,5

2.3 Instrumentos de pressão comuns em aeronaves

Mesmo nas aeronaves monomotoras leves, há uma série de instrumentos no painel que mensuram ou utilizam algum tipo de pressão em seu funcionamento. São citados, como exemplos, o velocímetro, o altímetro, o indicador de razão de subida, o horizonte artificial,

os manômetros de óleo, de combustível e do ar de admissão do motor. Nas aeronaves mais complexas, multimotoras, pressurizadas, e com mais equipamentos, o número de instrumentos sobe acentuadamente.

Em seguida, serão apresentados vários instrumentos comuns a diversos tipos de aeronaves.

2.3.1 Pressão de óleo do motor

É perfeitamente lógica a preocupação do piloto em relação ao correto funcionamento do motor da aeronave que está sob seu comando, principalmente na monomotor. E um dos instrumentos mais importantes para verificar a saúde do motor é o medidor da pressão do óleo do sistema de lubrificação. Isso se deve ao fato de os motores convencionais e os movidos a turbina utilizarem o óleo para lubrificar e refrigerar rolamentos que giram em alta velocidade e superfícies que deslizam umas sobre as outras. Quando se perde a capacidade de lubrificação do motor, a fricção excessiva eleva a temperatura e gera o desgaste dos componentes, levando à falha dele. Portanto, monitorar o óleo lubrificante é um ótimo indicador para saber se o motor está funcionando corretamente.

Nas aeronaves equipadas com instrumentos analógicos (Figura 39), são utilizados manômetros de óleo do tipo tubo de Bourdon com leitura direta. Enquanto nos sistemas de instrumentos digitais são empregados medidores remotos, analógicos ou digitais. Nesse caso, é disponibilizada uma unidade de sensoriamento que envia informações para o computador, e este, por sua vez, exibe a informação na tela, localizada no painel da cabine. Nas telas de monitoramento do motor, a pressão do óleo é exibida em um mostrador circular (Figura 40) ou linear, ou até mesmo incluir um valor numérico na tela. Geralmente, o indicador de pressão do óleo está agrupado com outros mostradores de parâmetros do motor, na parte central do painel analógico, ou na mesma tela ou parte desta dedicada ao monitor, nos sistemas digitais.



Figura 39 - Manômetro analógico de óleo do motor

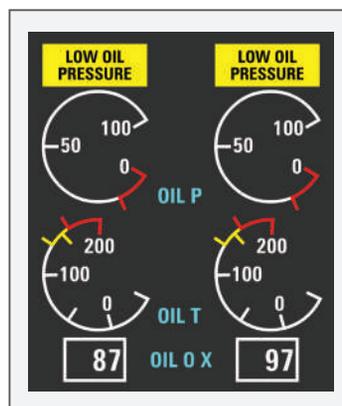


Figura 40 - Tela de monitoramento dos parâmetros do motor

2.3.2 Pressão de admissão do motor

A pressão de admissão de ar é uma importante informação para o piloto de aeronaves equipadas com motores convencionais ou a reação. Nas primeiras, a medida indica a pressão de ar no coletor de admissão do motor. Essa é uma indicação da potência desenvolvida pelo motor. Quanto maior a pressão da mistura do ar com o combustível que entra no motor, mais potência será produzida. Nos **motores aspirados** normais, a indicação máxima fica próxima da pressão atmosférica. Nos **motores turboalimentados** ou superalimentados, nos quais o ar é pressurizado e misturado com o combustível, as indicações ficam acima da pressão atmosférica.

Um medidor analógico de pressão típico funciona a partir de um aneroide com vácuo em seu interior (Figura 41). Dessa forma, no momento em que a linha de ar que vai do coletor de admissão do motor até o medidor de pressão é alimentada pelo funcionamento do motor, o indicador apresenta a pressão absoluta da entrada de ar no coletor. Essa pressão é absoluta, pois é apurada com referência ao vácuo existente no aneroide. Quando somente a pressão atmosférica atua no aneroide dentro do medidor, o ponteiro conectado a ele indica a pressão do ar ambiente.



Motor aspirado: aquele que aspira o ar, ou seja, não tem nenhum tipo de sobrealimentação como turbo ou compressor.

Motor turboalimentado: motores equipados com turboalimentadores, que aumentam a densidade do ar dentro da câmara de combustão do motor; devido a esse aumento de volume e de massa de ar comprimido, mais combustível pode ser injetado para produzir maior potência.

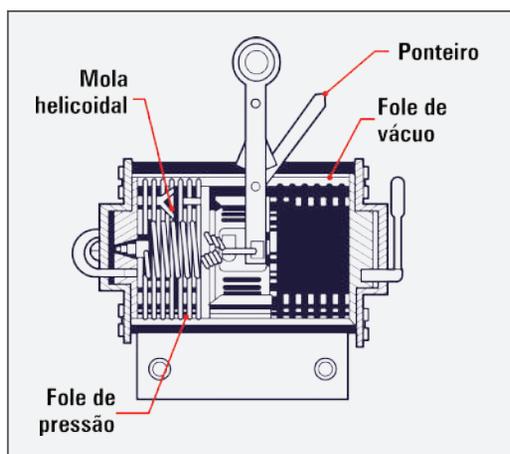


Figura 41 - Funcionamento do aneroide do manômetro de admissão do motor

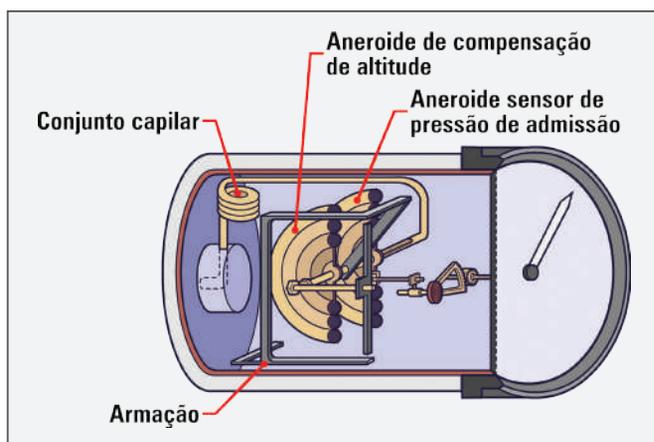


Figura 42 - Manômetro de admissão do motor equipado com aneroide de compensação

Resumidamente, o funcionamento do instrumento ocorre da seguinte maneira: uma cápsula aneroide com vácuo em seu interior é instalada em um recipiente, no qual ela é exposta à pressão atmosférica e à pressão transmitida do coletor de ar do motor. Essa cápsula é calibrada de maneira a expandir seu corpo quando a pressão externa for menor que a atmosférica e contrair quando ela for maior. Uma cápsula aneroide é instalada no mecanismo para compensar o efeito da altitude na pressão do aneroide sensor do instrumento, conforme se verifica na Figura 42.

Como os motores aspirados dificilmente conseguem se alimentar com pressão de ar maior que a atmosférica, o aneroide não sofre alteração. Nos motores superalimentados, a pressão na área externa da cápsula é maior que a atmosférica, fazendo com que ela se contraia, indicando a variação de pressão no recipiente do instrumento.

A maioria dos medidores de pressão de admissão (Figura 43) é calibrada em polegadas de mercúrio, embora os mostradores digitais apresentem a opção de escala diferente.



Figura 43 - Manômetro de admissão de ar do motor

2.3.3 Razão de pressão do motor

As aeronaves equipadas com motores a turbina possuem um instrumento chamado indicador de pressão diferencial do motor, em inglês, *engine pressure ratio* (EPR), que relaciona a pressão de admissão e de escapamento com a potência desenvolvida pelo motor. Portanto, ele apresenta uma indicação do empuxo desenvolvido pelo motor a partir da diferença entre as pressões de ar de admissão e de escapamento. A Figura 44 demonstra o funcionamento de um EPR.

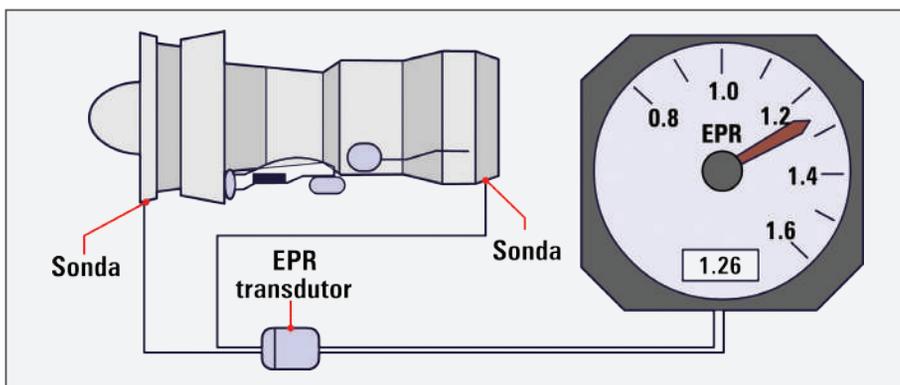


Figura 44 - Funcionamento do EPR utilizado em motor turbojato

O transmissor de razão de pressão contém um arranjo de foles que compara as duas pressões e converte a razão em um sinal elétrico usado pelo indicador (Figura 45). Ele possui uma unidade de sensoriamento remoto que envia a informação a um transmissor de razão de pressão do motor, o qual, por seu turno, a direciona para o indicador no painel.

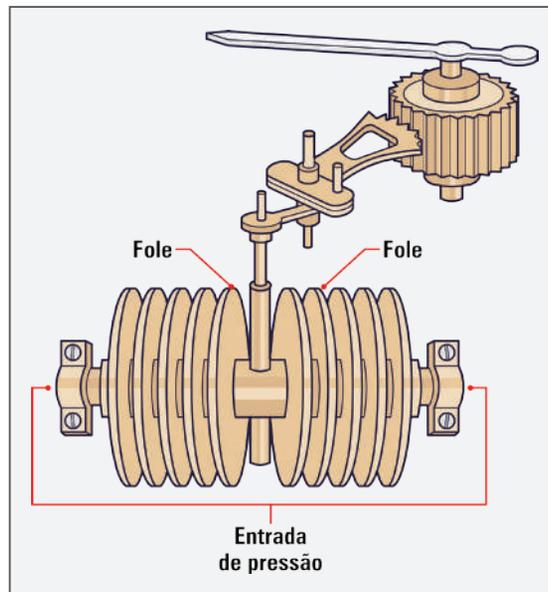


Figura 45 - Componentes internos do indicador de EPR

Em uma configuração digital, os dados do transmissor são enviados a um computador, que, em seguida, conduz a informação processada ao indicador na cabine. Esse instrumento também é equipado com mecanismos de compensação de temperatura, de altitude e de outros fatores.

A Figura 46 apresenta um instrumento de EPR analógico, enquanto a Figura 47 mostra a indicação de EPR no painel de monitoramento dos parâmetros do motor.



Figura 46 - Indicador analógico de pressão diferencial do motor



Figura 47 - Indicação de pressão diferencial do motor em painel digital

2.3.4 Pressão de combustível

A informação sobre o correto funcionamento do sistema de combustível é muito importante para o piloto. Os manômetros de pressão de combustível (Figura 48) disponibilizam-na por meio da indicação da pressão na linha de alimentação de combustível para o motor. Essa pressão é uma ótima referência sobre o funcionamento do sistema, pois o combustível é bombeado dos tanques até o motor, fazendo com que as linhas de alimentação fiquem pressurizadas. Caso as bombas falhem, ou haja falta de combustível nas linhas, a pressão é reduzida, chegando a zero, dependendo do tipo de falha. Portanto, é um indicador eficiente sobre o funcionamento do sistema de alimentação de combustível.



Figura 48 - Indicador analógico de pressão de combustível

No caso de se empregar a configuração típica dos instrumentos de leitura direta, na qual se utilizam tubo de Bourdon, diafragmas e foles, os sensores de pressão do combustível são ligados diretamente ao indicador, o que é uma situação indesejável, uma vez que a presença de linha de combustível dentro da cabine representa um potencial risco de incêndio, em caso de vazamento. Assim, o modelo mais indicado dispõe de um mecanismo de sensoriamento remoto, usado como parte de um dispositivo de transmissão e alimentado por eletricidade para enviar um sinal ao indicador no painel da cabine.

Em alguns casos, o monitoramento do sistema é realizado por meio da indicação da razão do fluxo do combustível, no lugar dos medidores de pressão. Ou, ainda, são utilizados ambos, como se percebem, na Figura 49, as indicações *fuel flow* (fluxo de combustível) e *fuel pressure* (pressão de combustível) na tela de monitoramento de parâmetros do motor.

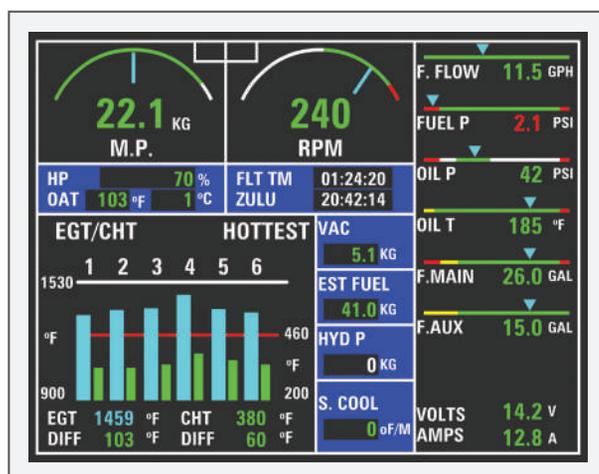


Figura 49 - Tela de monitoramento de parâmetros do motor com indicação de pressão e fluxo de combustível

2.3.5 Pressão hidráulica

Nas aeronaves mais complexas, são encontrados diversos outros dispositivos de monitoramento de pressão, usados para indicar as condições de sistemas que não são encontrados em aeronaves leves e simples. Os sistemas hidráulicos são comumente utilizados para elevar e baixar trens de pouso, operar controles de voo, aplicar os freios, entre outras funções. A pressão necessária e suficiente ao funcionamento do sistema é fornecida por bombas hidráulicas. Dessa forma, os manômetros são ótimas fontes de informação sobre a correta operação dessas bombas. Normalmente, os instalados na cabine são de sensoriamento remoto, enquanto os empregados pela manutenção, localizados fora da cabine, são de leitura direta, do tipo tubo de Bourdon.

A Figura 50 mostra um indicador analógico típico de manômetro hidráulico, enquanto a Figura 51 apresenta a indicação da pressão em uma tela de monitoramento do sistema hidráulico.



Figura 50 - Manômetro analógico do sistema hidráulico

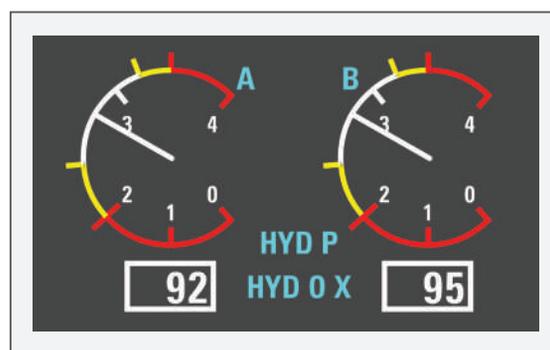


Figura 51 - Indicação de pressão hidráulica na tela de monitoramento de sistemas de célula

No caso dos manômetros com sensoriamento remoto, o sistema é equipado com um transdutor (Figura 52), também chamado de transmissor, localizado entre o sensor e o indicador na cabine. Esse dispositivo recebe a informação da pressão hidráulica do sistema, fornecida pelo sensor, e a converte em sinal elétrico, enviando-o para o indicador na cabine.

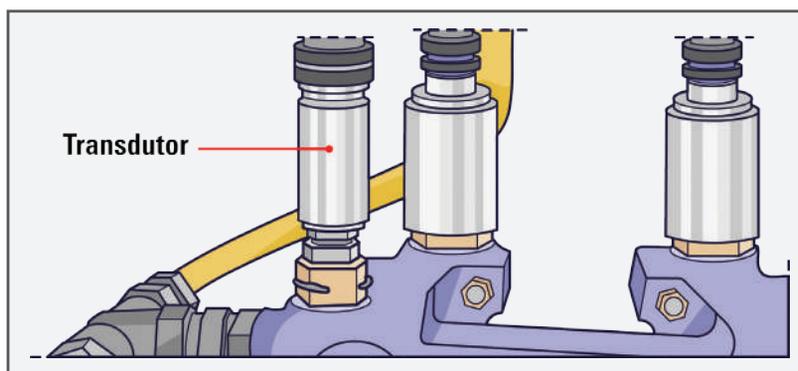


Figura 52 - Transdutor de pressão hidráulica

2.3.6 Pressão de sucção

Ao se bombear ar em um diafragma, há o aumento da pressão e a expansão dele. Caso haja a sucção do ar, a pressão diminui e o diafragma contrai. Portanto, a sucção, ou vácuo, é o processo inverso ao da pressão. E, com esse procedimento, se está produzindo o vácuo, pois a pressão no interior do diafragma é menor que a atmosférica. Portanto, nos sistemas que utilizam o vácuo, o ar é sugado para fora dos componentes sensores.

O manômetro de sucção é extremamente importante em uma aeronave que depende unicamente de instrumentos de voo, com giroscópio operado a vácuo. Nesse sistema, o ar é puxado através dos instrumentos, fazendo com que os rotores dos giroscópios girem. A velocidade de rotação do giroscópio precisa estar dentro de uma determinada faixa para que a operação se realize corretamente. Essa velocidade está diretamente relacionada à intensidade da sucção que é desenvolvida no sistema. Quanto maior a sucção, maior a velocidade do giroscópio. Na Figura 53, é possível perceber que a bomba de vácuo alimenta todos os instrumentos giroscópicos operados por vácuo do sistema anemométrico.

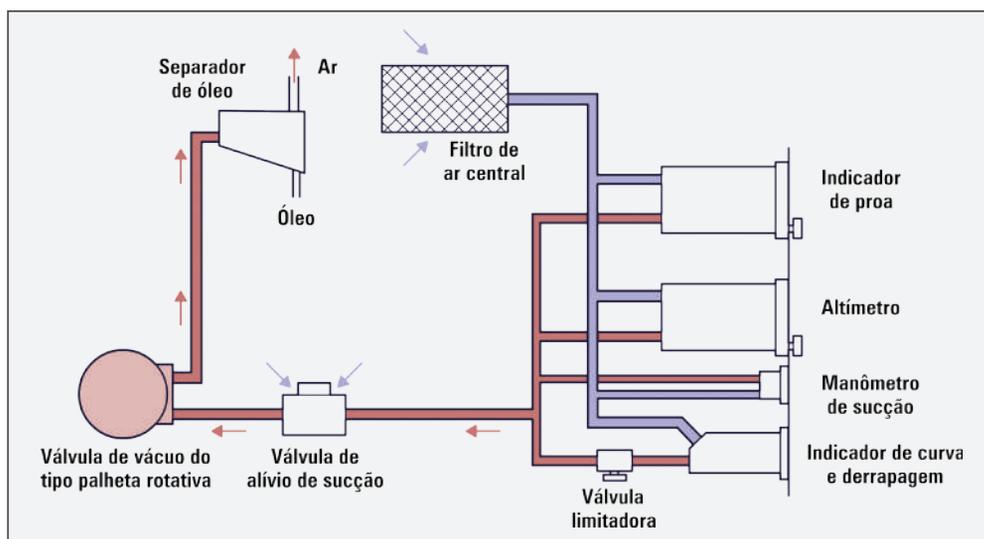


Figura 53 - Sistema de vácuo dos instrumentos de voo



Figura 54 - Manômetro analógico de sucção

O vácuo é uma indicação de pressão diferencial, significando que a pressão a ser medida é comparada com a pressão atmosférica, por meio do uso de um diafragma lacrado ou uma cápsula aneroide. O indicador (Figura 54) é calibrado em polegadas de mercúrio. Ele informa a quantidade de pressão negativa existente no sistema em relação à atmosfera. Salienta-se que, na leitura do instrumento, não consta sinal negativo, pois o termo vácuo já faz subtender que a pressão do sistema é negativa.

2.4 Sistema anemométrico

Este sistema parte, inicialmente, de duas grandes considerações: primeira, o fato de que, quando a aeronave ganha altitude, a pressão ao seu redor diminui e vice-versa; segunda, para se saber o valor da velocidade segundo a qual ela se desloca no espaço, é preciso ter uma referência confiável para determinar a velocidade real. Nesses aspectos, estão envolvidas variações de pressão que são mensuradas e usadas como informações confiáveis de voo. A reunião e a distribuição de diversas pressões do ar para instrumentação de voo são as funções do sistema anemométrico ou de *pitot*-estático. Três dos mais importantes instrumentos de voo são conectados ao sistema anemométrico: o indicador de velocidade, o altímetro e o indicador de razão de subida.

Nesse sistema, a pressão atmosférica é captada por um tubo de *pitot* (Figura 55), dispositivo mecânico utilizado para medição da velocidade de fluidos, o qual consiste, basicamente, em um tubo para medir fluxo de fluido.

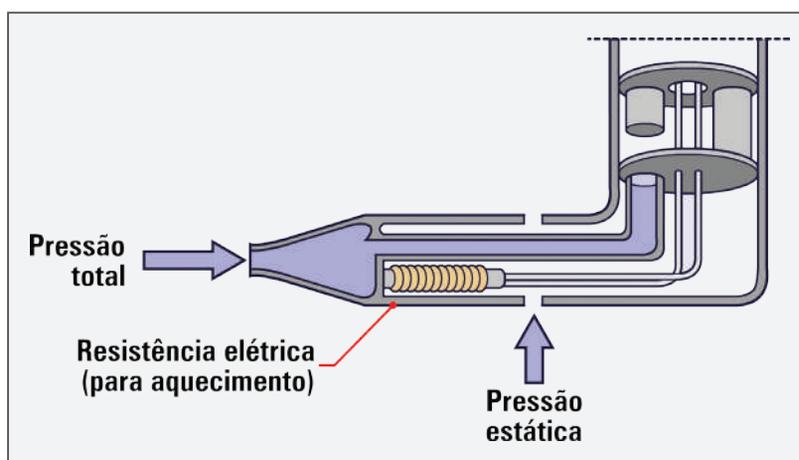


Figura 55 - Tubo de *pitot* com abertura para pressão estática

Pela equação de Bernoulli, tem-se que a pressão total é igual à pressão estática somada à pressão dinâmica. Portanto, há a comparação entre a pressão estática e a dinâmica.

A pressão estática não depende do movimento. Ela é detectada por piezômetros, ou obtida mediante o uso de um **tubo de Prandtl** envolvendo o tubo de *pitot*. A pressão dinâmica do ar é a pressão atmosférica gerada quando o ar externo entra no tubo *pitot*. Nas aeronaves, os instrumentos anemométricos estão conectados ao tubo de *pitot*, que ficam expostos ao vento relativo na parte externa da aeronave. Durante subida ou descida, a pressão do ar varia, e os instrumentos conseguem interpretar essa variação e indicá-la no instrumento.

Existem dois tipos de configuração para alimentar, com eficiência, os instrumentos anemométricos: o tubo *pitot* com tomada estática acoplada e o com tomada estática separada.



Tubo de Prandtl: variante do tubo de *pitot*, em que as tomadas de pressão estática são realizadas diretamente no aparelho, e não em outra tomada de pressão na tubulação.

2.4.1 Tubo de *pitot* e tomada de pressão estática

Em aeronaves simples, o sistema é constituído de um tubo de *pitot* com aberturas de pressão estática e de ar de impacto, além de tubos de livre vazão que conectam os pontos de captação de pressão do ar até aos indicadores na cabine. O altímetro, o velocímetro e o indicador de razão de subida são os três instrumentos mais comuns de *pitot*-estático, conforme explicitado na Figura 56.

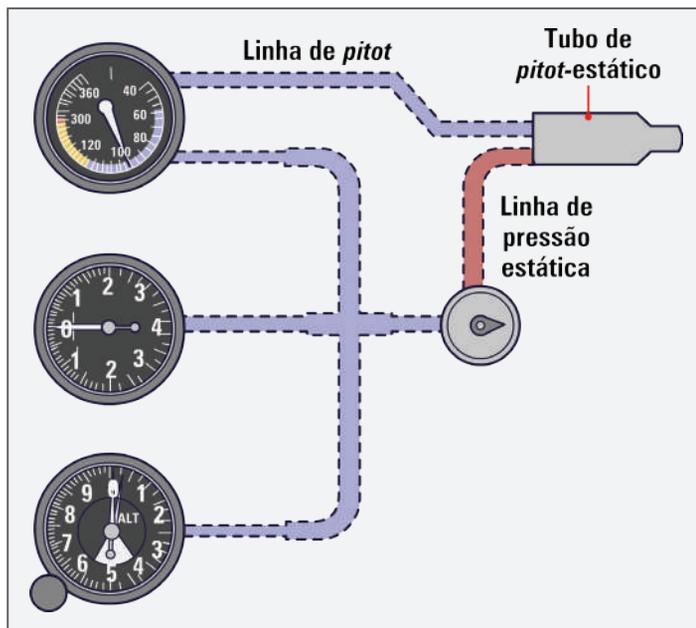


Figura 56 - Sistema de *pitot*-estático

O tubo de *pitot* possui uma abertura que recebe o impacto do vento relativo enquanto a aeronave se movimenta para frente. Esse ar passa através de uma placa defletora projetada para proteger o sistema contra umidade e sujeiras que podem entrar no tubo. Abaixo do defletor existe um dreno, o qual permite o escape da umidade contida no ar. Este, é direcionado à parte traseira de uma câmara – em alguns modelos, esta seção está localizada em uma estrutura chamada de conjunto de barbatana de tubarão. Um tubo vertical, ou tubo de subida, leva esse ar pressurizado para fora do conjunto do *pitot* ao indicador do instrumento. A Figura 57 demonstra um tubo *pitot* em formato de barbatana de tubarão. Nela, é possível identificar os principais componentes da peça e o caminho percorrido pelo ar nas linhas de pressão dinâmica e de estática até a tubulação que leva as pressões aos indicadores na cabine.

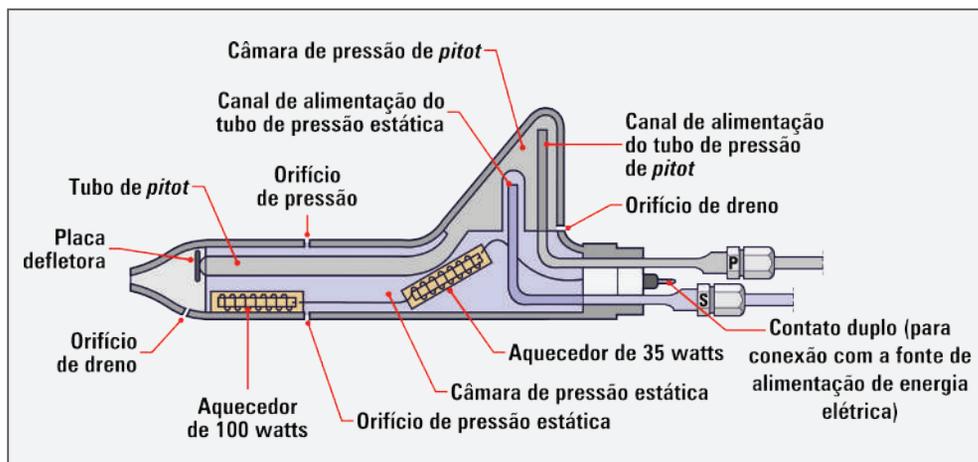


Figura 57 - Tubo *pitot*-estático em formato de barbatana de tubarão

A seção posterior do tubo *pitot* apresenta pequenos furos nas faces superior e inferior com vistas a coletar a pressão do ar atmosférico em uma condição estática. A seção estática também contém um tubo elevador que sai do conjunto *pitot* e é conectado ao altímetro, ao indicador de velocidade e ao indicador de razão de subida.

A Figura 58 mostra a conexão das linhas de pressão estática e dinâmica com a caixa de instrumento e com o diafragma, respectivamente.

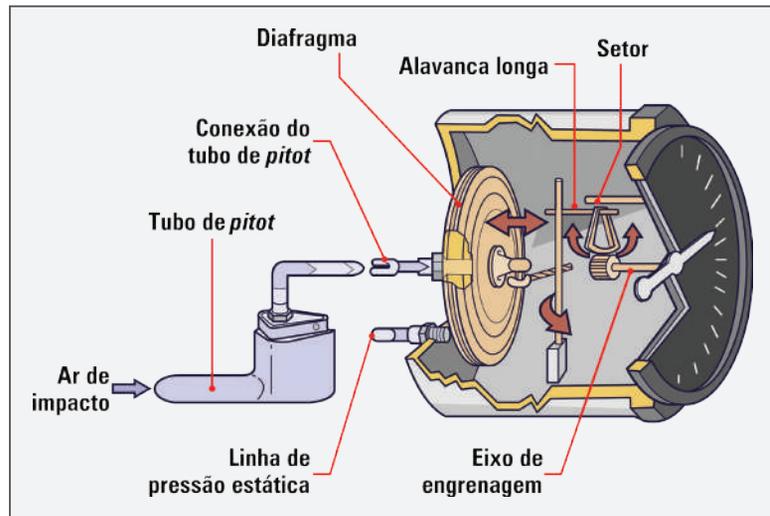


Figura 58 - Conexões das linhas estática e dinâmica ao instrumento

Muitos conjuntos de tubo *pitot*-estático são equipados com aquecedores para evitar congelamento da entrada de ar durante o voo. O piloto envia corrente elétrica ao elemento, por meio de um interruptor na cabine, quando percebe a existência de condições para a formação de gelo. Esse interruptor é ligado ao de ignição, para que, no momento em que a aeronave estiver desligada, o aquecedor do tubo *pitot* não fique ligado. Assim, evita-se que ele consuma corrente da bateria durante o período no qual a aeronave estiver inoperante, mesmo se estiver ligado.

Ao se movimentar nas áreas próximas da aeronave, é necessário ter cuidado com o tubo *pitot*, porque os elementos de aquecimento fazem com que ele fique quente demais, causando queimaduras.

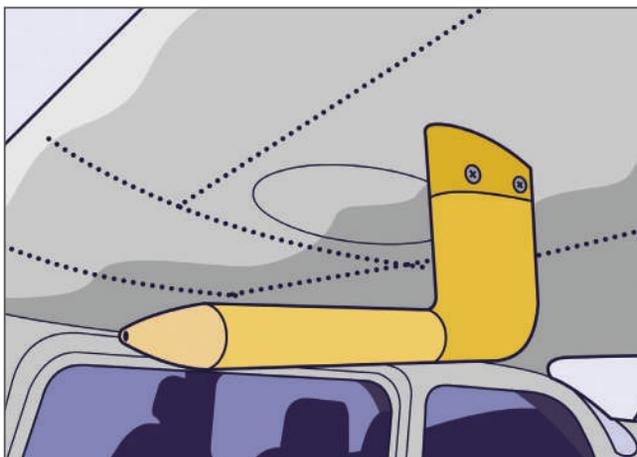


Figura 59 - Tubo de *pitot* na asa do avião

O tubo de *pitot* é posicionado em paralelo à linha de voo da aeronave, em local onde o ar seja menos turbulento, para que a pressão de admissão do ar no tubo não seja prejudicada. O local da instalação varia de acordo com a aeronave. Em algumas, o tubo fica no nariz da fuselagem, em outras, se localiza na asa (Figura 59) ou na empenagem. Existem diversos modelos, mas a função permanece a mesma, capturar as pressões do ar de impacto e do ar estático e direcioná-las para o instrumento anemométrico na cabine.

A maioria das aeronaves equipadas com um tubo *pitot*-estático tem uma fonte alternativa de pressão de ar estático, para uso em caso de emergência. O piloto seleciona a fonte alternativa empregando um interruptor na cabine, caso lhe pareça que os instrumentos de voo não estejam fornecendo indicações confiáveis. Nas aeronaves não pressurizadas, a fonte alternativa de pressão estática é simplesmente o ar da cabine. A Figura 60 ilustra o funcionamento do sistema de *pitot*-estático com uma fonte alternativa de pressão estática vinda da cabine.

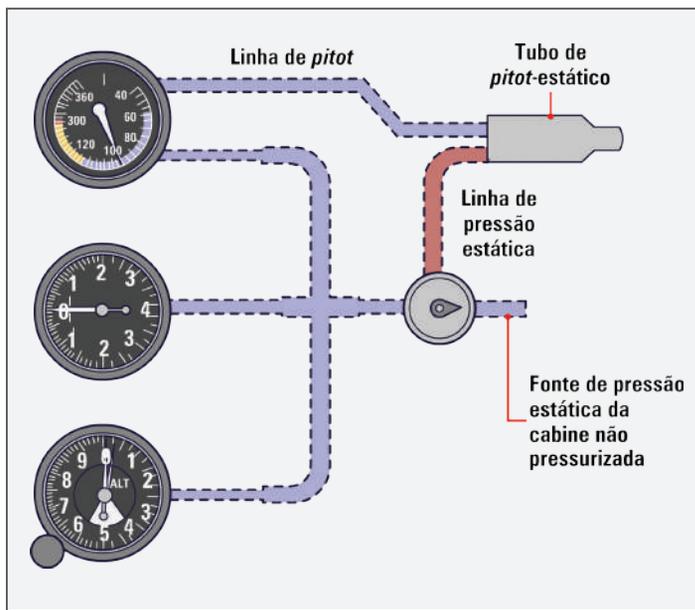


Figura 60 - Sistema de *pitot*-estático com fonte de pressão estática alternativa

Nas aeronaves pressurizadas, a pressão da cabine é significativamente diferente da pressão do ambiente externo. Assim, caso ela seja utilizada como fonte alternativa de pressão estática, as indicações dos instrumentos ficam extremamente comprometidas. Para contornar o problema, são usados vários pontos de coleta de ventilação estática, localizados na parte externa da aeronave e ligados aos instrumentos por meio de tubulações. O piloto seleciona qual das fontes de estática direcionará o ar aos instrumentos. Em aeronaves equipadas com monitores eletrônicos, a escolha da fonte é feita pelo computador automaticamente ou pela tripulação.

Em outro tipo de sistema de *pitot*-estático, o conjunto do *pitot* e as fontes de pressão estáticas são instalados em locais diferentes da aeronave. Nessa configuração, o tubo *pitot* é usado apenas para fornecer a informação sobre a pressão dinâmica do ar. Normalmente, ele está localizado ao lado da fuselagem (Figura 61).

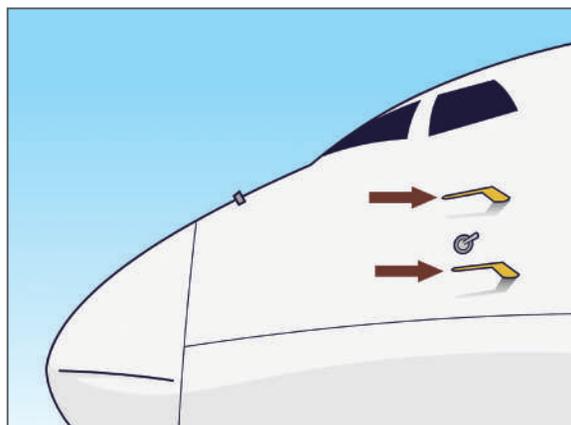


Figura 61 - Dois tubos *pitot* na lateral do avião

O sistema conta com dois ou mais suspiros (Figura 62) para captação de pressão estática. Um primário e um alternativo, assim como suspiros separados e dedicados aos instrumentos do piloto e do copiloto. Da mesma forma, dois suspiros primários estão localizados em lados opostos da fuselagem (Figura 63) e conectados com uma tubulação (Y), para alimentar os instrumentos. Isso é feito para compensar qualquer variação na pressão estática do ar dos suspiros devido à altitude da aeronave. Independentemente do número e da localização dos diversos suspiros estáticos, eles podem ser aquecidos para evitar congelamento.

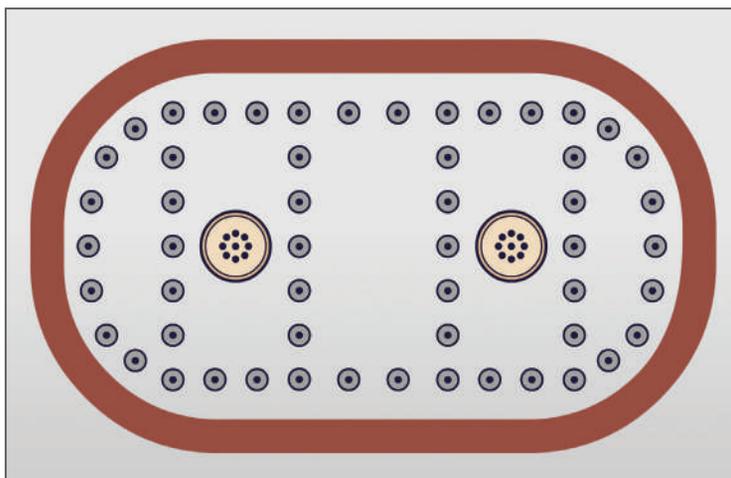


Figura 62 - Portas para tomada de ar estático

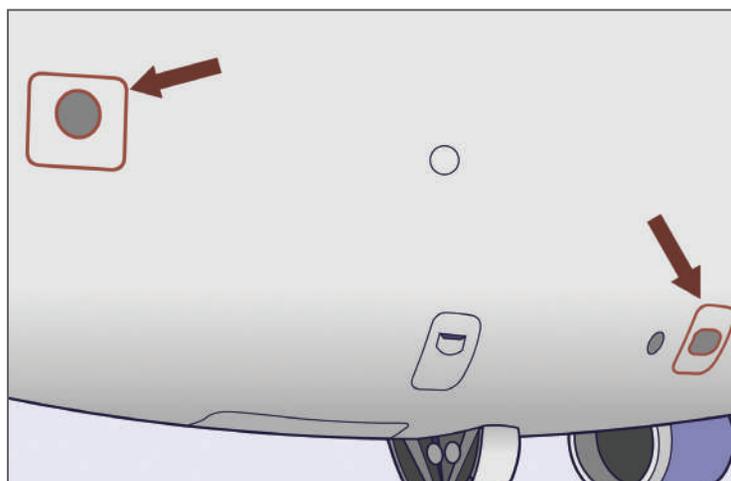


Figura 63 - Locais dos suspiros na aeronave

As aeronaves modernas e complexas também utilizam o sistema de *pitot*, nas quais este dispõe de computadores que processam os dados anemométricos e os usam para alimentar outros sistemas que necessitam das informações de pressão dinâmica e estática para operar adequadamente.

Como se viu, nas aeronaves pressurizadas, há uma complicação para a tomada de ar estático, pois não se pode utilizar a cabine como fonte alternativa. Além disso, o sistema de piloto automático requer informação de pressão estática, assim como da unidade de pressurização da cabine. Diante desse cenário, fontes aquecidas, separadas da pressão de ar estático, são captadas de ambos

os lados da fuselagem para alimentar coletores independentes de pressão estática do ar. Uma das fontes alimenta os instrumentos de voo do piloto, e a outra, os do copiloto. Essa configuração permite que sempre haja pelo menos um conjunto de instrumentos de voo operacional em caso de mau funcionamento do sistema. A Figura 64 ilustra o esquema de alimentação de pressão estática e de dinâmica aos instrumentos anemométricos, em aeronave moderna pressurizada.

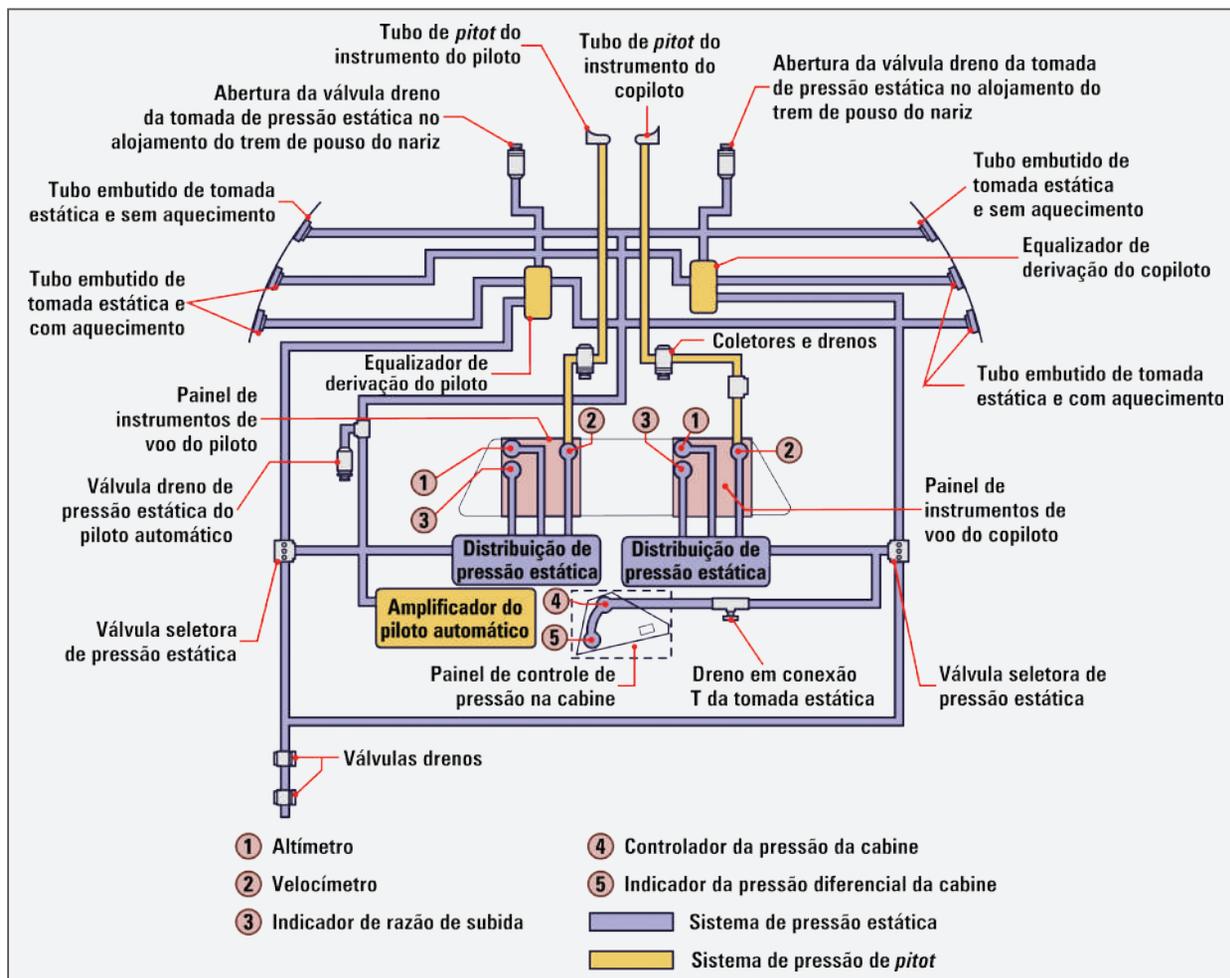


Figura 64 - Esquema de *pitot*-estático em aeronave pressurizada

2.4.2 Computador de dados anemométricos (ADC) e computador digital de dados anemométricos (DADC)

Como se observou, o sistema de *pitot*-estático é simples de explicação. Entretanto, a operação não é tão simples assim, pois as condições ambientais variam de acordo com as fases de voo e com as altitudes em que as aeronaves voam. Nos aviões de alto desempenho, a situação fica ainda mais complicada, porque eles frequentemente operam em elevadas altitudes, nas quais a temperatura ambiente se mantém abaixo de 50 °C negativos.

A compressibilidade do ar também é alterada em altas velocidades e em altas altitudes. Da mesma forma, o fluxo de ar ao redor da fuselagem muda, tornando difícil coletar dados de pressão estática consistentes. As variações de temperatura e de densidade do ar precisam ser compensadas para indicações corretas dos instrumentos serem obtidas.

Nos instrumentos analógicos, a compensação da variação é realizada por meio de dispositivos de compensação internos, enquanto nas aeronaves de alto rendimento tal tarefa cabe aos computadores de dados anemométricos, em inglês, *air data computer* (ADC), e, nas aeronaves modernas, aos computadores de dados anemométricos digitais, em inglês, *digital air data computer* (DADC). Neste último, os dados sobre as medidas de pressão do ar são transmitidos ao DADC sob forma digital, o que facilita a operação do computador na tarefa de prover as informações devidamente compensadas em relação às diversas variáveis envolvidas no processo.

A Figura 65 apresenta a parte traseira de um ADC, na qual são conectadas as linhas de pressão de *pitot* (dinâmica) e de pressão estática. Na Figura 66, está ilustrado um ADC aberto, com as placas de circuitos eletrônicos expostas.

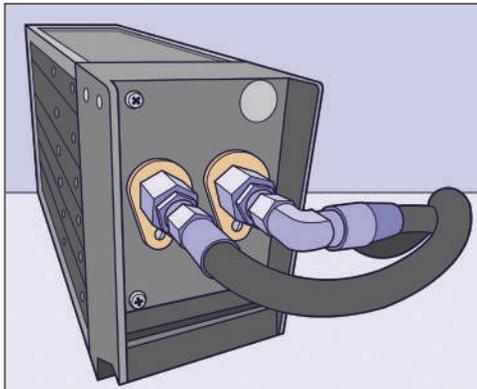


Figura 65 - Computador de dados anemométricos

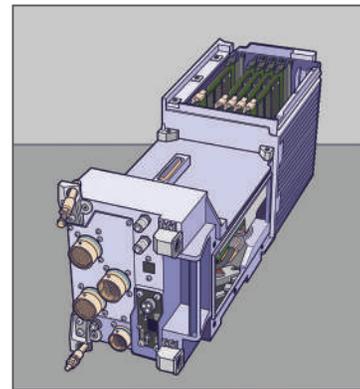


Figura 66 - Computador de dados anemométricos do caça F-14

O funcionamento do computador de dados anemométricos consiste, basicamente, nas seguintes etapas:

- os sensores captam as informações de temperatura e de pressão do ambiente;
- os dados são transmitidos ao ADC;
- as unidades analógicas instaladas no próprio ADC são empregadas e utilizam transdutores para converter os sinais elétricos e manipulá-los em diversos módulos;
- os transdutores são equipados com circuitos projetados para fazerem as compensações adequadas dos valores de temperatura e de pressão e encaminhar as informações ajustadas para o uso dos diferentes instrumentos e sistemas.

A principal característica do computador digital de dados anemométricos é que ele opera com sinais digitais. Dessa forma, há a necessidade de se converter os sinais analógicos dos sensores para o formato digital, antes de enviá-los ao DADC. Para tanto, é utilizado um conversor – localizado dentro ou fora do computador – como uma unidade dedicada a essa tarefa. Após receber as informações, todos os cálculos e compensações são realizados de forma digital pelo computador.

Com efeito, o DADC encaminha as informações a outros sistemas, tais como o de pressurização, os de controle de voo, e aos que requerem informações de pressão de *pitot* e de estática. Ademais, ele transmite as informações para serem apresentadas no painel da aeronave ou, ainda, para convertê-las em sinais elétricos com vistas a movimentar os servomotores. Os sinais de saída

do DADC são distribuídos aos demais sistemas e ao monitor no painel da cabine mediante os barramentos de dados digitais. A Figura 67 exemplifica essa distribuição.

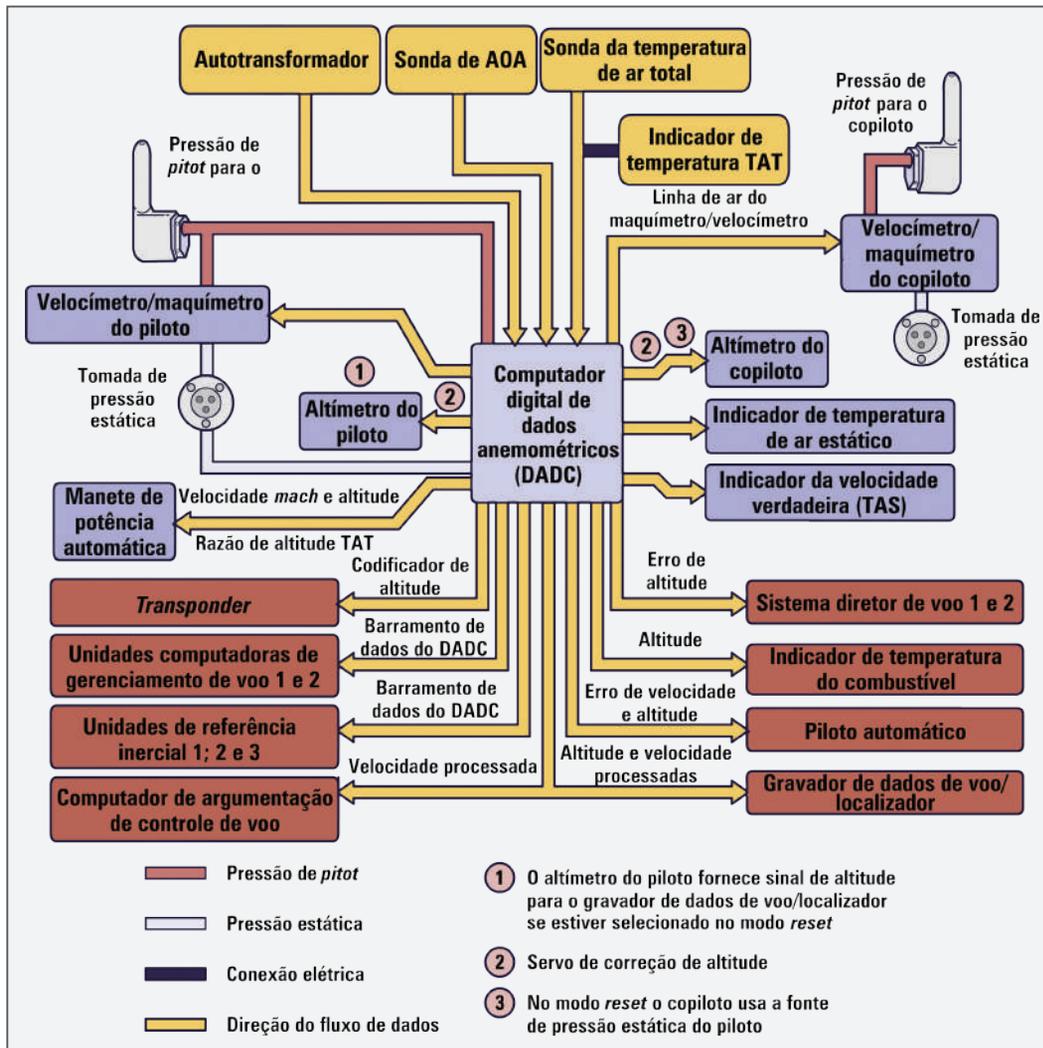


Figura 67 - Esquema de funcionamento do computador de dados anemométricos digital

O DADC (Figura 68) representa uma evolução muito grande na cabine, porque, além de realizar as compensações mencionadas, ele monitora os parâmetros dos dados anemométricos fornecidos por diversas fontes e alerta a tripulação acerca de algum parâmetro que esteja fora do normal. Outro recurso importante é a possibilidade de mudança automática para uma fonte de dados alternativa, caso necessário, de forma que os sistemas sejam mantidos continuamente operantes. Além das qualidades citadas, destaca-se que esse computador, por utilizar tecnologia de estado sólido – de forma geral mais confiável – e dispor de mais recursos, apresenta reduzidas dimensões e baixo peso, fatores importantíssimos na aviação.

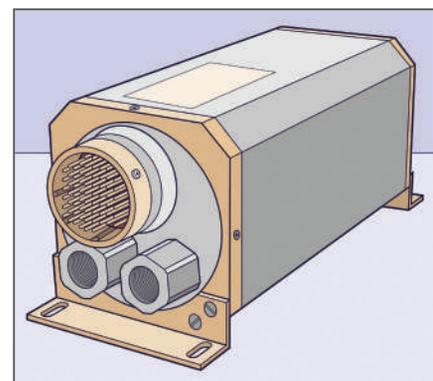


Figura 68 - DADC com dimensões aproximadas de 16 cm x 8,1 cm x 8,3 cm (CxLxA)

Existem diversos benefícios no uso do ADC. A simplificação das linhas de tubulação do *pitot*-estático cria um sistema mais leve e simples, com menos conexões e, dessa forma, com menor probabilidade de vazamentos e de mais fácil manutenção. Cálculos de compensação de uma só vez podem ser realizados no computador, eliminando-se a necessidade de se construir dispositivos de compensação em diversos instrumentos ou unidades individuais do sistema que utilizam os dados anemométricos.

2.4.3 Instrumentos com sensores no sistema de *pitot*

Os instrumentos primários de voo são diretamente conectados, em muitas aeronaves, ao sistema do *pitot*-estático. Os instrumentos de voo analógicos usam formas mecânicas de medir e indicar os diversos parâmetros de voo. Os sistemas de instrumentos de voo digitais, por seu turno, empregam a eletricidade e a eletrônica para executarem a mesma função. De qualquer forma, o princípio de funcionamento não muda. Os sensores captam a informação de pressão. Esta é encaminhada diretamente, ou por meio de transmissores, ao indicador ou ao computador de dados anemométricos. A seguir, são elencados alguns dos principais instrumentos que operam a partir do *pitot*-estático.

a) Altímetro e altitude

Uma das informações mais relevantes para o piloto é a altitude em que se encontra a aeronave sob seu comando. Altitude é a distância vertical medida entre um ponto da superfície terrestre e o nível médio do mar. Na aviação, esse conceito apresenta alguns desdobramentos, pois é necessário definir a distância da aeronave até o nível do mar, bem como dela até o solo. Dessa forma, têm-se os conceitos de altitude verdadeira para o primeiro caso e absoluta para o segundo, conforme ilustrado na Figura 69.

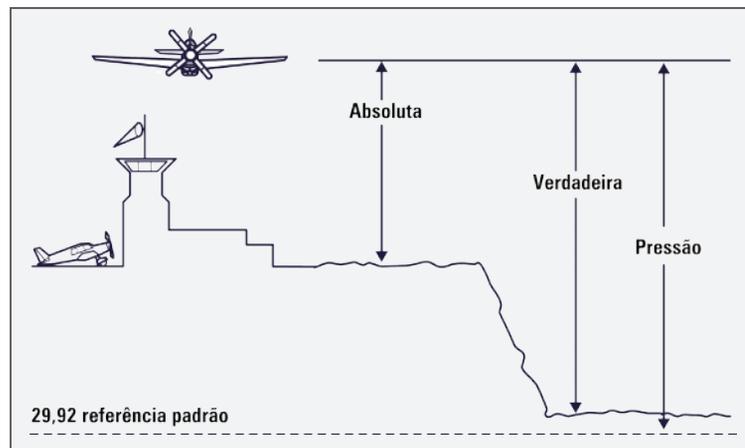


Figura 69 - Pressão absoluta e pressão verdadeira

Para obter a informação de altitude, o piloto utiliza o altímetro, que é projetado para indicar a altitude da aeronave acima de um nível predeterminado, como o do mar, ou de um terreno abaixo da aeronave. Portanto, ele sinaliza a altitude verdadeira ou a absoluta. Esse instrumento se baseia nas descobertas realizadas por cientistas há muito tempo. No século XVII, restou provado que o ar na atmosfera exercia pressão sobre as coisas. Com base nessa teoria, Evangelista Torricelli inventou o instrumento para medir

a pressão atmosférica, o barômetro. No mesmo século, usando os conceitos desse instrumento, Blaise Pascal demonstrou a relação consistente entre altitude e pressão do ar. Quanto maior a altitude, menor a pressão atmosférica. Assim, pela mensuração da pressão do ar, é possível determinar a altitude. Essa é a base de funcionamento do altímetro. A Tabela 2 relaciona a pressão atmosférica com a altitude.

Tabela 2 - Relação entre a altitude e a pressão atmosférica

Pressão atmosférica	
Altitude (ft.)	Pressão (psi)
Nível do mar	14,69
2.000	13,66
4.000	12,69
6.000	11,77
8.000	10,91
10.000	10,10
12.000	9,34
14.000	8,63
16.000	7,96
18.000	7,34
20.000	6,75
22.000	6,20
24.000	5,69
26.000	5,22
28.000	4,77
30.000	4,36

Os altímetros de pressão, como são conhecidos os instrumentos que indicam a altitude de uma aeronave por meio da medição da pressão atmosférica, são projetados para medir a pressão do ar ambiente em qualquer local e altitude. Eles são conectados às tomadas estáticas pelas tubulações do sistema de *pitot*-estático.

Um aneroide ou fole aneroide calibrado com a pressão de referência sofre expansão e contração de seu volume, na medida direta do aumento ou da diminuição de altitude da aeronave. A relação entre a medida de pressão e a altitude é indicada no mostrador, que é calibrado em pés. Esses aparelhos são instrumentos de leitura direta, que medem a pressão absoluta, haja vista que a pressão é comparada ao vácuo da cápsula aneroide.

Para o funcionamento do altímetro, a pressão estática do ar entra na caixa de instrumentos hermeticamente fechada e envolve o aneroide. Ao nível do mar, o altímetro indica zero, pois a pressão exercida pelo ar ambiente no aneroide é a adotada como referência. Isso acontece porque o vácuo do aneroide é calibrado para ficar em equilíbrio com a pressão atmosférica ao nível do mar. Portanto, a altitude indicada no altímetro é a intitulada altitude verdadeira. Quando a pressão do ar é reduzida em virtude da movimentação do altímetro para altitudes mais elevadas na atmosfera, o aneroide se expande

e indica a altitude no instrumento através da rotação do ponteiro indicador. Quando o altímetro desce, a pressão do ar ao redor do aneroide aumenta, este se contrai, e o indicador é movido para a direção oposta.

Conforme visto, a referência do altímetro é a pressão do nível do mar. Entretanto, o piloto necessita considerar os relevos acima do nível do mar, nos quais são localizados inúmeros aeródromos. Quando esses planaltos são adotados como referência, tem-se a altitude absoluta.

A leitura do altímetro analógico não é muito amigável, quando comparada à dos monitores das aeronaves modernas. A apresentação da escala de altitude é semelhante à dos relógios tradicionais. Entretanto, no altímetro, há três ponteiros de tamanhos diferentes (Figura 70), de modo que cada um representa uma grandeza de altitude.

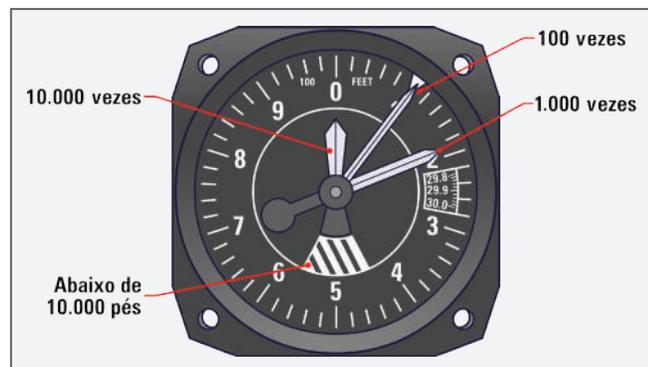


Figura 70 - Altímetro

O ponteiro mais longo registra a altitude em centenas de pés. Logo, se ele indicar o número 1 da escala, a leitura será de 100 pés. Quando ele percorre uma volta completa, indicando o número zero, a leitura será de 1.000 pés de altitude. Como não dá para ficar contando quantas voltas esse ponteiro realiza, o ponteiro médio foi instalado para registrar as variações de altitude em milhares de pés. Portanto, na medição anterior em que o ponteiro maior percorreu uma volta completa, o médio marcará 1.000 pés, apontando para o número 1 da escala.

Com efeito, o ponteiro médio se move mais lentamente que o maior. Sua escala varia de 1.000 em 1.000 pés. Portanto, cada vez que ele atinge a sua primeira unidade da escala (nº 1), o ponteiro mais longo realizou uma volta completa no mostrador, ou seja, nesse caso, a indicação é de 1.000 pés.

Quando o ponteiro médio avança uma volta completa no mostrador, significa que a altitude aumentou em 10.000 pés, justamente a medida da primeira unidade do ponteiro mais curto. A escala do ponteiro menor varia de 10.000 em 10.000 pés. A primeira unidade da escala (nº 1) representa 10.000 pés.

De forma geral, quando o ponteiro mais longo avança uma volta completa no mostrador, o médio aponta para o nº 1 da escala, indicando a altitude de 1.000 pés. Quando o ponteiro médio fizer o mesmo, o mais curto aponta para o número 1 da marcação, registrando 10.000 pés de altitude.

Para saber o valor da altitude, são somados os valores indicados por todos os ponteiros.

A título de exemplo, esta marcação é citada: o ponteiro menor entre as marcações de números 2 e 3; o médio entre 5 e 6; e o maior alinhado com o 5 da escala. Então:

- ponteiro menor entre as unidades 2 e 3 = 20.000;
- ponteiro médio entre as unidades 5 e 6 = 5.000;
- ponteiro maior

Logo, a altitude será de 25.500 pés (20.000 + 5.000 + 500).

A diferença proporcional de velocidade de rotação dos ponteiros é conseguida com o emprego de um jogo de engrenagens com diâmetros diferentes em dimensões proporcionais, conforme mostrado na Figura 71.

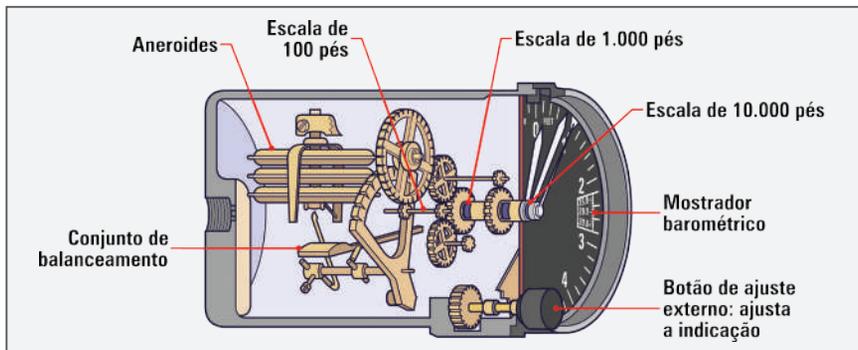


Figura 71 - Componentes internos do altímetro

Uma área hachurada preta e branca ou vermelha e branca aparece no mostrador do instrumento até que o nível de 10.000 pés tenha sido alcançado. Quando a aeronave ultrapassa essa altitude, a indicação desaparece do dispositivo.

Muitos altímetros contêm ligações que, além de movimentar os ponteiros do mostrador, giram um contador numérico (Figura 72). Esta janela de referência rápida permite que o piloto leia, de forma simples, a altitude em pés. O movimento dos dígitos rotativos ou contador do tipo tambor torna a leitura muito difícil, ou quase impossível, em subidas ou descidas rápidas. A referência, então, é o indicador clássico no estilo relógio.



Figura 72 - Altímetro com contador numérico

Em monitores digitais, a altitude é apontada de diversas formas. O uso de um mostrador numérico, em vez da reprodução do mostrador em formato de relógio, é o mais comum. Normalmente, um mostrador digital numérico de altitude é utilizado na tela de instrumentos primários de voo, próximo ao horizonte artificial. Uma escala linear vertical também pode ser apresentada para evidenciar o valor numérico em perspectiva (Figura 73).



Figura 73 - Indicação de altitude (escala à esquerda do HSI) no PFD

Conforme mencionado, medir a altitude com um dispositivo de medição de pressão é uma tarefa complexa, que requer medidas para refinar a indicação, compensando-se os fatores que interferem na precisão da informação. Como se sabe, a exatidão da informação sobre a altitude da aeronave é muito importante para o voo, principalmente nas condições de voo por instrumentos. Imprecisões nessa informação levam a acidentes, principalmente durante as manobras de aterrissagem. Tal preocupação também se manifesta quando a aeronave sobrevoa obstáculos altos e terrenos elevados, com base na indicação precisa de altitude, assim como o voo em uma altitude específica determinada pelo controle de voo (ATC), com o fim de evitar colisões com outras aeronaves. Portanto, o indicador de altitude tem de se manter preciso em qualquer fase do voo.

Um fator contribuinte importante para a complexidade do processo é o de que variações de pressão na atmosfera são comuns, devido às condições do tempo. Isso ocorre em virtude dos deslocamentos de massa de ar que dão origem ao clima a que o ser humano está acostumado. As diferenças de pressão ocorrem, principalmente, nas áreas limites entre essas massas, chamadas de frentes. Assim, ao nível do mar, mesmo que a temperatura permaneça constante, a pressão do ar cresce e diminui de acordo com o movimento das massas de ar.

Uma solução criada para manter a precisão do altímetro, apesar da variação da pressão atmosférica, foi a instalação de uma escala de pressão ajustável, visível no mostrador do instrumento, conhecida como janela barométrica ou janela Kollsman (Figura 74). Essa escala apresenta a pressão barométrica selecionada, por meio do botão de ajuste, instalado na frente do instrumento. O mecanismo de ajuste conta com uma ligação mecânica de engrenagens dentro do altímetro, que movimentam, também, os ponteiros responsáveis por indicar a altitude no mostrador. Dessa forma, ao se ajustar, na janela Kollsman, a pressão atmosférica atual conhecida (tarefa de ajuste do altímetro), o mostrador do instrumento indicará a altitude real.

Como destacado, a pressão atmosférica de um mesmo local varia ao longo do dia. Dessa forma, para o pouso em um determinado aeródromo, a equipe do órgão de controle de tráfego aéreo disponibiliza ao piloto o valor atualizado da pressão atmosférica local, para o ajuste do altímetro. A indicação ajustada pelas mudanças da pressão atmosférica, em razão do clima e das inconsistências de pressão da massa de ar, é conhecida como altitude indicada.

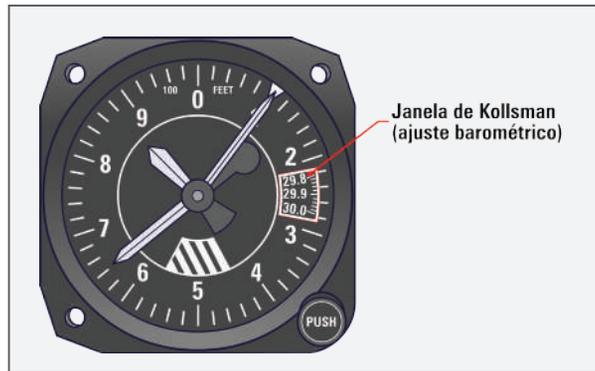


Figura 74 - Altímetro com a janela de Kollsman

Salienta-se que, em voo, o ajuste do altímetro é mudado para coincidir com a informação do clima da estação meteorológica ou aeroporto mais próximos. Esse procedimento mantém o altímetro ajustado durante o voo.

Quando se seleciona a pressão de 29,92 na janela de Kollsman, tem-se a chamada altitude de pressão. Ao voar no espaço aéreo americano acima de 18.000 pés em relação ao nível do mar, os pilotos precisam ajustar seus altímetros para a altitude de pressão, com 29,92, na janela de Kollsman. Dessa forma, todas as aeronaves terão como referência esse nível de pressão padrão, e a separação vertical entre as aeronaves atribuídas pelo órgão de controle de voo para as diferentes altitudes ficam asseguradas. Logicamente que todos os altímetros devem estar funcionando adequadamente e os pilotos mantendo as altitudes determinadas.

Destaca-se que a altitude verdadeira ou a altura real da aeronave acima do nível do mar apenas são as mesmas da altitude de pressão, se existirem condições padrão no dia. Caso contrário, todas as aeronaves com altímetros ajustados a 29,92 "Hg podem ter altitude real mais alta ou mais baixa do que a altitude de pressão indicada. Isso em razão da pressão dentro da massa de ar na qual estão voando, acima ou abaixo da pressão dia-padrão (29,92). Nesse caso, a altitude real, ou verdadeira, é menos importante do que evitar que uma aeronave colida com outra, haja vista que todas as aeronaves apresentarão a mesma defasagem.

Portanto, não é somente a variação na pressão que influencia na precisão do altímetro. A temperatura também contribui para tornar mais complicada a medição da altitude baseada na pressão atmosférica. Isso acontece em virtude de os aneroides utilizados nos altímetros serem fabricados em metais. Com isso, a elasticidade deles altera conforme as mudanças de temperatura. Isso leva a uma falsa indicação, especialmente em elevadas altitudes, em que o ar ambiente é muito frio. Para sanar essa deficiência, foi acrescentado

ao mecanismo do instrumento um dispositivo bimetálico de compensação, que corrige a variação de temperatura. A Figura 75 apresenta o mecanismo do altímetro com o compensador de temperatura.

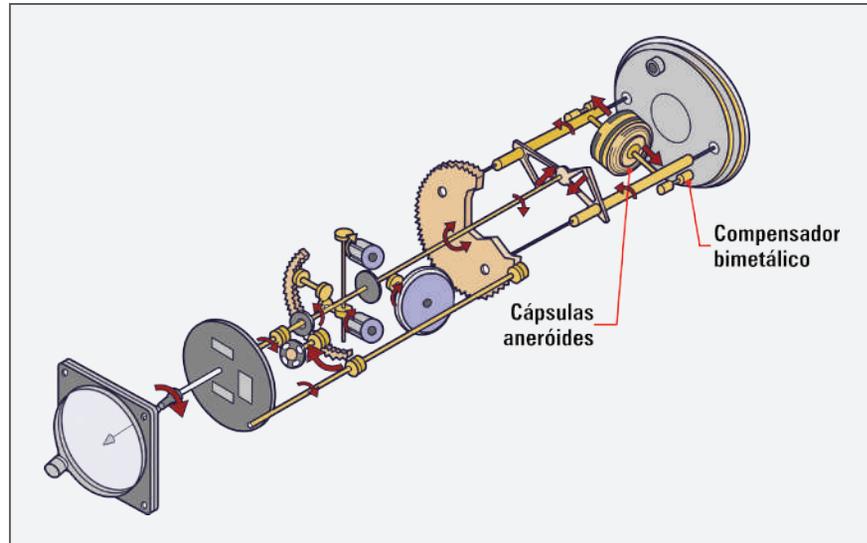
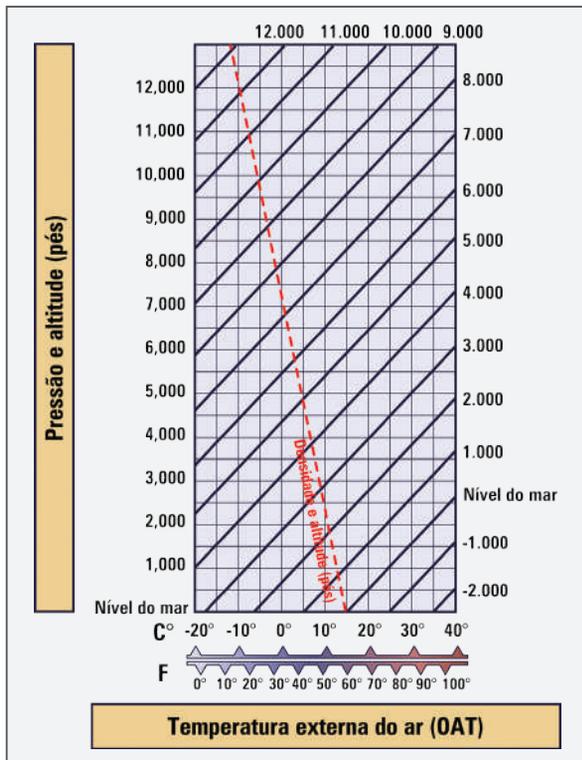


Figura 75 - Compensador bimetálico do altímetro

GRÁFICO 2 - Densidade e altitude



A temperatura também interfere na densidade do ar, o que provoca alterações no desempenho da aeronave. Tal fato não faz com que o altímetro apresente uma leitura errada, mas a tripulação tem de estar ciente das mudanças provocadas pelas variações de temperatura na atmosfera.

O termo altitude de densidade descreve a altitude correta para temperatura não padrão. Ou seja, a altitude de densidade é a altitude dia-padrão (altitude de pressão) na qual a aeronave experimenta um desempenho similar àquele que experimentaria, caso não fosse um dia-padrão. Por exemplo, em um dia muito frio, o ar é mais denso do que em um dia-padrão, então uma aeronave tem um desempenho como se estivesse em uma altitude mais baixa. Isso acontece porque a altitude de densidade está mais baixa naquele dia. Em um dia muito quente, o inverso é verdadeiro, e uma aeronave apresenta o desempenho como se estivesse em uma altitude maior, na qual o ar é menos denso. Nesse caso, a altitude de densidade é maior. Portanto, apesar de os efeitos da temperatura na densidade não provocarem informações falsas no altímetro, uma indicação correta dele pode ser enganosa, em

relação ao desempenho da aeronave, caso os efeitos destacados não sejam considerados. Para que a tripulação possa calcular a altitude de densidade em um determinado dia, são disponibilizados tabelas e fatores de correção, conforme o Gráfico 2 apresenta.

Outros fatores ligados à instalação, à operação ou à manutenção do instrumento podem causar uma indicação incorreta do altímetro. Entre eles, cita-se o erro de escala, que acontece quando a escala do instrumento não está alinhada aos ponteiros do altímetro. Para evitá-lo, é preciso que sua correção seja checada durante os processos de manutenção periódica.

Os vazamentos na linha do *pitot*-estático devem ser corrigidos para não prejudicarem o funcionamento dos giroscópios – principais componentes dos instrumentos anemométricos. É possível que esse tipo de problema afete a entrada de ar estático no altímetro ou ADC, resultando em indicações incorretas de altitude. É por essa razão que a manutenção do sistema estático inclui checagens de vazamentos a cada 24 meses, independentemente se discrepâncias tenham sido detectadas ou não no período.

Um tipo de problema que ocorre com os diafragmas do altímetro é a perda de suas propriedades mecânicas, de maneira que a sua capacidade elástica fica comprometida. Como decorrência, o diafragma se deforma e não consegue retornar ao seu formato anterior. Tal deficiência provoca alteração na indicação do instrumento, caso não seja temporária. O termo histerese é definido como a tendência de um material ou sistema em conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou.

Evidencia-se que muitos altímetros modernos são projetados para integrar os sistemas de controle de voo da aeronave, pilotos automáticos e sistemas de monitoramento de altitude. A operação básica de detecção de pressão desses altímetros é a mesma, porém é adicionada uma forma de transmissão de informações aos computadores de dados anemométricos.

b) Indicador de velocidade vertical

O indicador de velocidade vertical, em inglês, *vertical speed indicator* (VSI), também chamado de indicador de razão de subida, em inglês, *climb*, informa ao piloto se a aeronave está subindo, descendo ou em voo nivelado. A taxa de subida ou descida é indicada no mostrador em pés por minuto e a indicação é zero, quando o voo está nivelado.

É um medidor de pressão diferencial, de leitura direta, que compara a pressão estática fornecida pelo sistema estático da aeronave. O funcionamento do sistema é simples. A pressão estática do sistema *pitot* é direcionada ao interior do diafragma. Este fica circundado por pressão estática na caixa do instrumento. Portanto, em solo, a pressão interna e a externa do diafragma são iguais. O ar presente no interior do diafragma fica livre para circular até a tomada estática, de forma irrestrita. Enquanto o ar da caixa do instrumento só flui através de um dispositivo restritor, dotado de um furo calibrado. Portanto, o fluxo de ar é mais lento na caixa de instrumento do que no interior do diafragma, conforme se percebe na Figura 76.

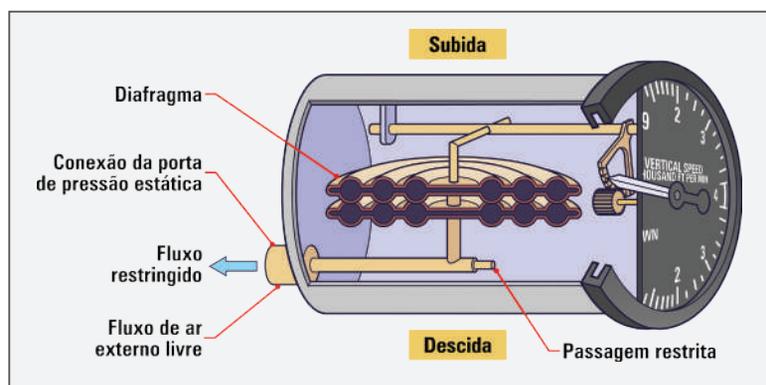


Figura 76 - Componentes internos do indicador de razão de subida

Ao passo que a aeronave ganha altitude, o diafragma recebe sem restrição a pressão atmosférica que atua naquele momento. Como o ar é menos denso nessa altitude, a pressão que age no interior do diafragma é menor, logo o ar tende a sair do diafragma sem restrição. A pressão do ar que envolve o diafragma também é maior que a da atmosfera e tende a sair da caixa de instrumento. Entretanto, ela diminui mais lentamente, tendo em vista que o ar precisa passar pelo restritor calibrado para sair do instrumento. Isso faz com que a pressão interna do diafragma seja menor que a da caixa, provocando uma pequena contração nele. Esse movimento é transmitido mecanicamente ao ponteiro do indicador, que informará a subida da aeronave.

O processo funciona de forma inversa quando a aeronave estiver descendo. Nesse caso, a pressão interna do diafragma será maior que a da caixa do instrumento, levando-o a se expandir. Caso a subida ou a descida sejam mantidas constantes, uma pressão diferencial contínua é estabelecida entre o diafragma e a pressão da caixa que o circunda, resultando em uma indicação correta da razão de subida ou de descida indicada no mostrador do instrumento.

O ponteiro sinaliza a razão de subida zero quando a pressão dentro e fora do diafragma forem iguais. O mostrador é graduado em 100 pés por minuto. Na face do instrumento (Figura 77), há um parafuso, ou botão, de ajuste para alinhar o zero da escala, quando a aeronave está em solo.



Figura 77 - Indicador de razão de subida (destaque para o parafuso de ajuste)

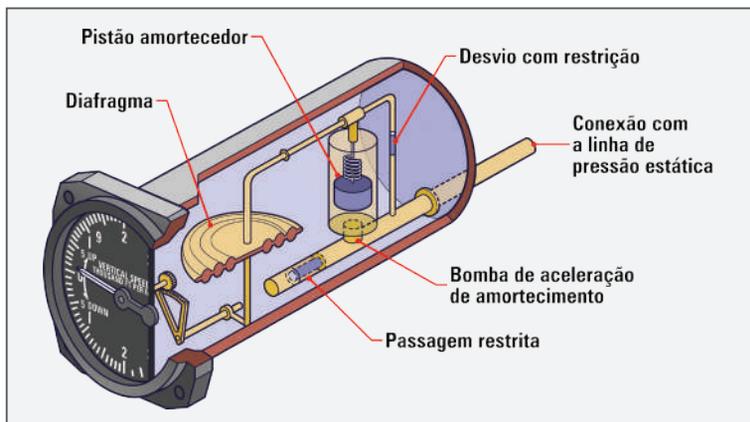


Figura 78 - Indicador de razão de subida instantâneo

Uma característica inconveniente desse sistema é o retardo da indicação da taxa de subida ou de descida real da aeronave até que a pressão diferencial se estabilize. Essa deficiência gera uma defasagem de seis a nove segundos para a indicação no instrumento. A correção desse problema foi conseguida com a incorporação de dispositivos que diminuem essa defasagem no mecanismo interno do instrumento. Um dos dispositivos utiliza um pequeno e leve amortecedor de mola, ou pistão, que reage à mudança de direção de subida ou de descida abrupta da aeronave. Ele bombeia o ar para dentro ou para fora do diafragma, apressando o estabelecimento da pressão diferencial. A Figura 78 retrata o mecanismo de amortecimento que permite a diminuição do tempo para o equilíbrio das pressões diferenciais no instrumento.

Existe um tipo de indicador de velocidade vertical chamado de variômetro, empregado em planadores. É um instrumento diferencial que compara a pressão estática a uma pressão conhecida, ele é muito sensível e dá uma indicação instantânea. O variômetro usa um dispositivo defletor giratório com um ponteiro ligado a ele. O defletor possui duas câmaras separadas:

- uma é conectada à linha de pressão estática da aeronave, ou é aberta para a atmosfera;
- a outra é conectada a um pequeno reservatório dentro do instrumento, que é preenchido com uma pressão calibrada de referência.

Conforme a aeronave perde altitude, a pressão estática do ar aumenta. Como a câmara da ventoinha está ligada à pressão estática, a pressão dentro da câmara também aumenta, pressionando-a contra a ventoinha. A ventoinha e o ponteiro, então, giram, indicando uma descida da aeronave. Isso ocorre porque a pressão estática é agora maior do que o valor de referência na câmara de pressão do reservatório. Durante a subida da aeronave, a pressão do reservatório é maior do que a pressão estática, assim, a ventoinha é empurrada na direção oposta fazendo com que o ponteiro gire e indique a subida. A Figura 79 ilustra o funcionamento do mecanismo interno do variômetro.

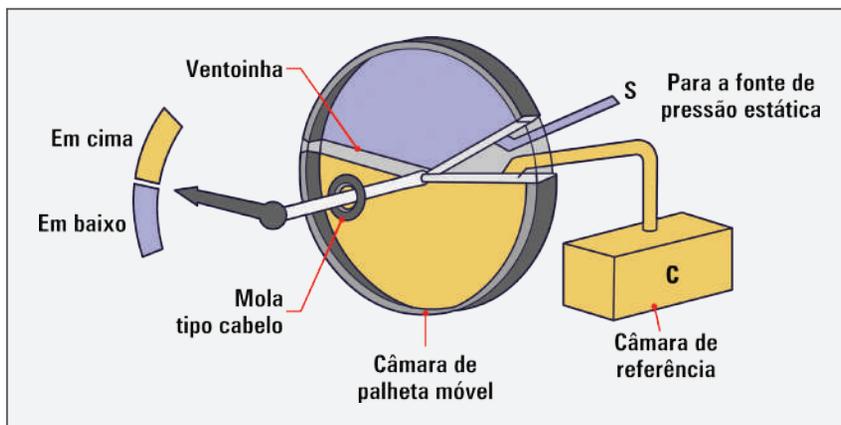


Figura 79 - Funcionamento do mecanismo interno do variômetro

Nos instrumentos digitais, a indicação da razão de subida é processada a partir da entrada de ar estático no computador de dados anemométricos. Um aneroide, ou sensor de pressão em estado sólido, reage continuamente às mudanças da pressão estática. Um relógio digital dentro do computador substitui o orifício calibrado utilizado nos instrumentos analógicos. Conforme a pressão estática muda, o relógio do computador estabelece a razão da mudança utilizando a taxa de conversão de lapso/ defasagem conhecida para a pressão do ar. Ao passo que a altitude aumenta ou diminui, um valor para a subida ou descida, em pés por minuto, é calculado e enviado à cabine. A informação do indicador de razão de subida (Figura 80) é apresentada próxima da indicação de altitude na tela de instrumentos primários de voo, em inglês, *primary flight display* (PFD).

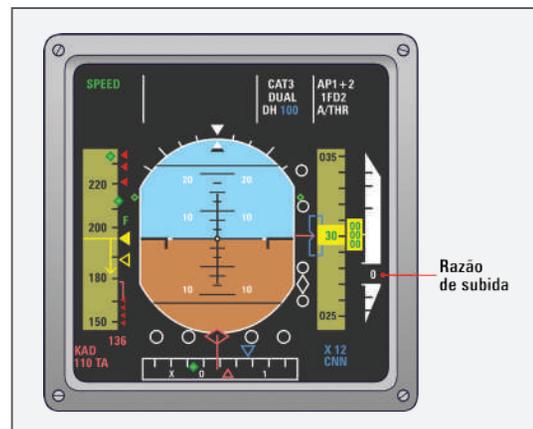


Figura 80 - Indicação de razão de subida no PFD

c) Velocímetro

O velocímetro, ou indicador de velocidade (Figura 81), é usado pelo piloto durante todas as fases do voo, a fim de manter a velocidade dentro das faixas específicas para o tipo de aeronave e condições de funcionamento. É, portanto, um instrumento essencial ao voo.



Figura 81 - Indicador de velocidade analógico

O velocímetro indica a velocidade aerodinâmica e é outro instrumento que se baseia na pressão diferencial. Nesse caso, a pressão dinâmica do ar, fornecida pelo tubo *pitot* da aeronave, é direcionada para o interior de um diafragma instalado na caixa do instrumento. A pressão estática do ar, fornecida pela tomada estática da aeronave, é direcionada para a caixa que envolve o diafragma. Conforme a velocidade da aeronave varia, a pressão dinâmica do ar também varia proporcionalmente, expandindo ou contraindo o diafragma. Mecanismos ligados ao diafragma fazem com que o ponteiro se movimente na face do instrumento, à frente de uma escala, calibrada em nós ou milhas por hora (mph). Na Figura 82, nota-se que a pressão estática age no interior da caixa do instrumento, envolvendo o diafragma, enquanto a pressão de *pitot* (dinâmica) atua no interior do diafragma.

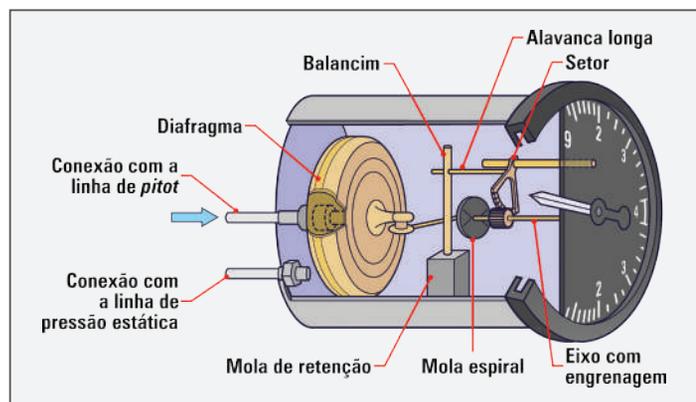


Figura 82 - Componentes internos do velocímetro analógico

A relação entre a pressão dinâmica e a pressão estática do ar produz a indicação conhecida como velocidade indicada (VI). Tal como acontece com o altímetro, existem outros fatores que precisam ser considerados na medição da velocidade em todas as fases do voo. Esses fatores provocam leituras imprecisas ou indicações que não sejam úteis ao piloto em uma determinada situação. Em indicadores de velocidade analógicos, os fatores são frequentemente compensados por um mecanismo dentro da caixa e no mostrador.

Os instrumentos de voo digitais realizam os cálculos no ADC para que a indicação correta seja exibida.

Embora a relação entre pressão dinâmica e pressão estática do ar seja a base para a maioria dos indicadores de velocidade, ela pode ser mais precisa. A velocidade calibrada leva em consideração os erros relativos ao posicionamento dos *pitots*-estáticos. Ela também corrige a natureza não linear da pressão diferencial do *pitot*-estático quando é exibida em uma escala linear. O indicador de velocidade analógico vem com uma tabela de correção que permite o cruzamento da velocidade indicada com a calibrada, para várias condições de voo. Essas diferenças são muito pequenas e frequentemente ignoradas. Nos instrumentos digitais, tais correções são feitas pelo ADC.

Salienta-se que a velocidade indicada não considera as diferenças de temperatura e de pressão do ar, necessárias à indicação da velocidade real. Esses fatores afetam bastante a indicação da velocidade. A velocidade real, assim, é a mesma que a velocidade indicada quando existirem condições de dia-padrão. No entanto, quando a temperatura ou a pressão atmosférica variam, a relação entre a pressão dinâmica e a estática se altera. Instrumentos analógicos para medição da velocidade, frequentemente, incluem dispositivos bimetálicos de compensação de temperatura, que alteram o movimento de ligação entre o diafragma e o ponteiro.

Há, outrossim, velocímetros equipados com um aneroide dentro da caixa do instrumento para compensar a indicação em condições de pressão fora do padrão. De forma alternativa, existem indicadores de velocidade real que permitem ao piloto ajustar as variáveis de pressão e temperatura manualmente, usando botões externos, no mostrador do instrumento. Os botões giram a face do mostrador e os mecanismos de ligações internas para apresentar uma indicação que compense a pressão e a temperatura fora do padrão, resultando na indicação da velocidade real. O piloto alinha manualmente a temperatura do ar exterior à escala de altitude de pressão, acarretando uma indicação de velocidade real.

A Figura 83 exemplifica um indicador de velocidade com ajuste para obter a velocidade real. Na parte superior do mostrador, há uma janela indicadora da temperatura regulada pelo botão de ajuste do instrumento.



Figura 83 - Velocímetro com botão de ajuste para velocidade real

Sistemas digitais de instrumentos de voo realizam todos os cálculos de velocidade real por meio do ADC. O ar dinâmico do tubo *pitot* e o ar da linha de pressão estática passam pela parte de sensoriamento do computador. A informação de temperatura também é adicionada. Esses dados são processados para que o valor da velocidade real possa ser transmitido digitalmente ao indicador no painel da cabine. O mostrador de velocidade do ar no PFD de uma aeronave leve fica em uma posição semelhante à da configuração (T) padrão do painel analógico. O indicador de velocidade fica à direita do horizonte artificial (Figura 84).

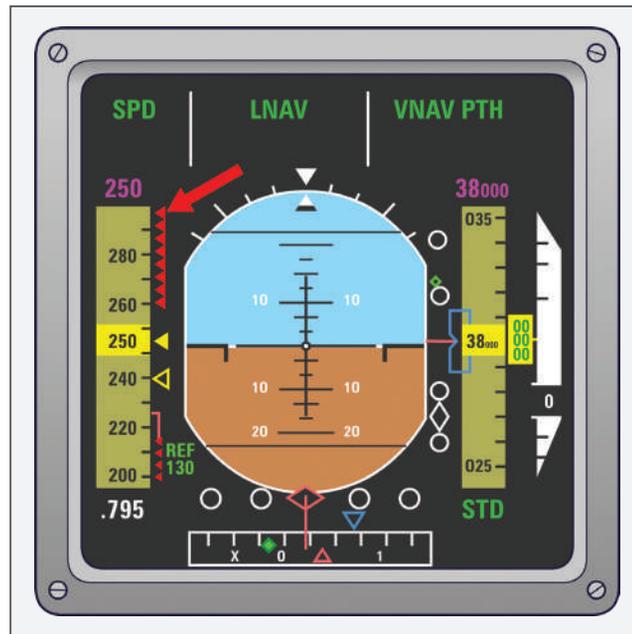


Figura 84 - Indicação de 250 mph no velocímetro do PFD

As complicações para a obtenção dos valores corretos de velocidade continuam quando se considera as indicações de velocidade e limites de operação. É muito importante evitar que as aeronaves de alto desempenho não excedam a velocidade do som, caso elas não sejam projetadas para isso. Ainda que uma aeronave se aproxime da velocidade do som, algumas partes dela experimentam fluxos de ar que excedem essa velocidade. O problema é que, próximo a tal velocidade, ondas de choque se desenvolvem e afetam os controles de voo, e, em alguns casos, partir a aeronave ao meio, caso ela não seja projetada para fluxos de ar supersônicos. Outra complicação é que a velocidade do som muda com a altitude e com a temperatura. Então, uma velocidade real segura em determinada altitude coloca a aeronave em perigo quando em altitude mais elevada. A Tabela 3 mostra a variação da velocidade do som, de acordo com a altitude, a temperatura e a pressão atmosférica.

Tabela 3 - Tabela de pressão, altitude, temperatura e velocidade do som

Atmosfera padrão			
Altitude (ft.)	Pressão (in. Hg)	Temperatura (°C)	Temperatura (°F)
0	29,92	15,0	59,0
1.000	28,86	13,0	55,4
2.000	27,82	11,0	51,9
3.000	26,82	9,1	48,3
4.000	25,84	7,1	44,7
5.000	24,89	5,1	41,2
6.000	23,98	3,1	37,6
7.000	23,09	1,1	34,0
8.000	22,22	-0,9	30,5
9.000	21,38	-2,8	26,9
10.000	20,57	-4,8	23,3
11.000	19,79	-6,8	19,8
12.000	19,02	-8,8	16,2
13.000	18,29	-10,8	12,6
14.000	17,57	-12,7	9,1
15.000	16,88	-14,7	5,5
16.000	16,21	-16,7	1,9
17.000	15,56	-18,7	-1,6
18.000	14,94	-20,7	-5,2
19.000	14,33	-22,6	-8,8
20.000	13,74	-24,6	-12,3

Em face dos fatores que interferem na determinação dos valores das velocidades, além das referências adotadas na verificação, há um grande número de nomenclaturas e siglas relacionadas à velocidade da aeronave. A seguir, serão apresentadas algumas dessas nomenclaturas.

- a) Velocidade indicada (VI), em inglês, *indicated airspeed* (IAS) - velocidade indicada no velocímetro, sem a correção dos erros de indicação, instalação ou compressibilidade.
- b) Velocidade verdadeira (VV), em inglês, *true airspeed* (TAS) - velocidade da aeronave em relação à massa de ar na qual ela está voando, ou seja, a velocidade indicada corrigida dos erros de altitude e de temperatura. É a velocidade real ou verdadeira, daí o seu nome.
- c) Velocidade de estol em configuração de aterrissagem (Vs0), em inglês, *velocity stall 0* (VS0) - mínima velocidade constante de voo na qual a aeronave, em configuração de aterrissagem, ainda é controlável.
- d) Velocidade absoluta (VA), em inglês, *ground speed* (GS) - velocidade que a aeronave desenvolve em relação ao solo. A velocidade GS é composta de velocidade TAS e de componente do vento atuante.

e) Velocidade calibrada (VC), em inglês, *calibrated airspeed* (CA) - velocidade indicada, corrigida dos erros de indicação e instalação do instrumento. A velocidade calibrada corrigida dos erros de altitude e de temperatura torna-se a velocidade aerodinâmica.

A seguir, são apresentadas outras nomenclaturas referentes a velocidades, cujo valor é específico para cada aeronave.

a) Velocidade de estol (Vest), em inglês, *velocity of stall* (VS) - mínima velocidade constante de voo, na qual a aeronave possui sustentação capaz de permitir o controle pelo piloto.

b) Velocidade máxima com os flapes abaixados (Vfe), em inglês, *velocity with flaps extended* (Vfe) - maior velocidade da aeronave permitida com os flapes abaixados, isto é, em razão das cargas impostas à estrutura dos flapes.

c) Velocidade máxima estrutural de cruzeiro (Vno), em inglês, *velocity of normal operations* (Vno) - velocidade que não deve ser excedida.

d) Velocidade nunca exceder (Vne), em inglês, *velocity that you never exceed* (VNE) - limite de velocidade, ou velocidade *mach*, que nunca deve ser excedida, sob pena de desintegração estrutural da aeronave em voo.

A Figura 85 mostra um indicador de velocidade com as marcações de Vs0, Vs, Vfe, Vno e Vne.

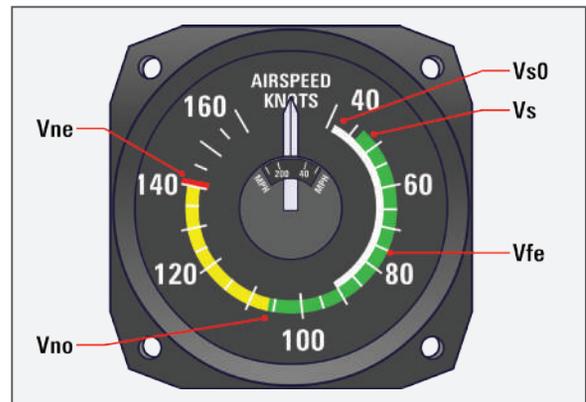


Figura 85 - Referências de velocidade no velocímetro

Os arcos no mostrador do instrumento servem para indicar as faixas de operação, e os radiais ao longo da escala informam os limites de operação.

Na Figura 86, são apresentadas essas referências no mostrador do indicador de velocidade. As indicações no mostrador variam conforme as características da aeronave. Dessa forma, as informações específicas sobre as referências de velocidade precisam ser consultadas no manual de voo da aeronave.

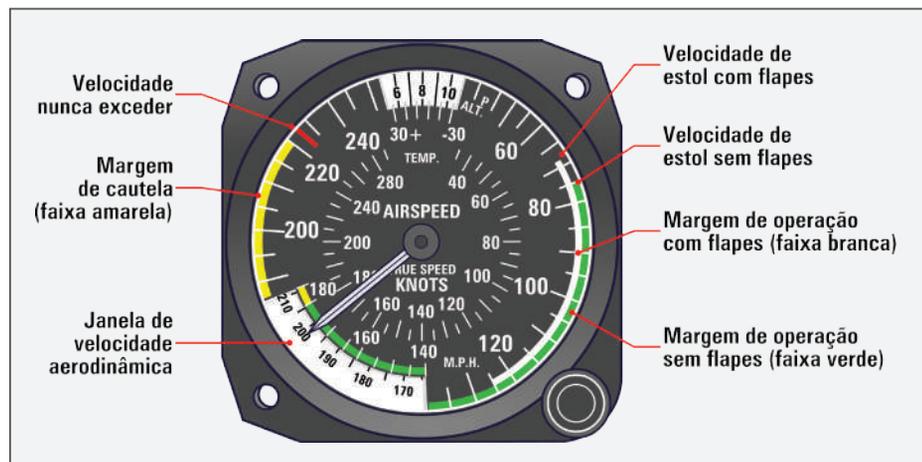


Figura 86 - Velocímetro com as referências de operação e de limites de velocidade

d) Maquímetro

Para evitar o risco de a aeronave exceder a velocidade máxima prevista, os pilotos monitoram a velocidade constantemente. Uma velocidade máxima permissível é estabelecida para a aeronave durante os seus testes de certificação de voo. Essa velocidade é conhecida como número *mach* crítico ou *mcrit*.

Mach é o termo utilizado para indicar a velocidade do som. O número mach crítico é expresso como uma decimal de *mach*, como, por exemplo, 0,9 *mach*. Isso significa 9/10 da velocidade do som, independentemente de qual seja a velocidade real do som em uma determinada altitude. A Figura 87 apresenta um típico maquímetro analógico.



Figura 87 - Maquímetro analógico

Muitas aeronaves de alto desempenho são equipadas com um maquímetro para monitorar o número *mach* crítico. Ele é, essencialmente, um instrumento de velocidade, calibrado em relação ao *mach*. Existem várias escalas para aeronaves subsônicas e supersônicas. Além da combinação do diafragma para ar dinâmico e estático, os maquímetros são equipados com um diafragma para sensoriamento da altitude. Esse mecanismo ajusta a entrada de informação para o ponteiro, com o fim de que as mudanças na velocidade do som, de acordo com a altitude, sejam incorporadas na indicação.

Na Figura 88, estão ilustrados os mecanismos internos de um maquímetro. Nela, é perceptível a presença de dois aneroides, um para o sensoriamento da velocidade e outro para o de altitude.

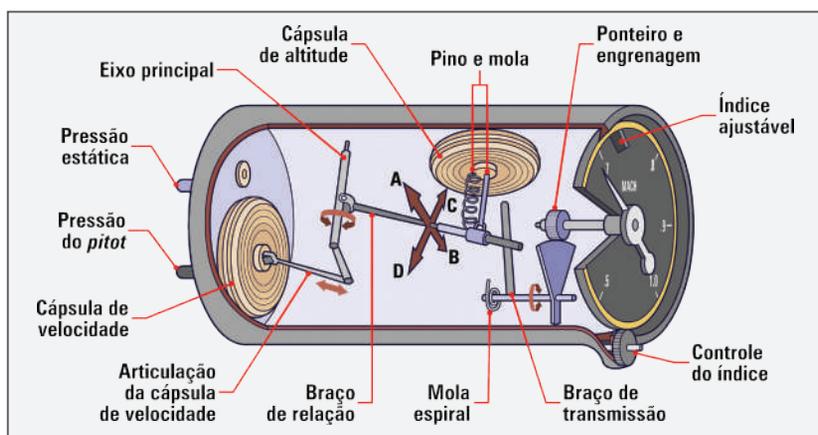


Figura 88 - Componentes de um maquímetro



Figura 89 - Velocímetro com indicação de velocidade *mach*

Algumas aeronaves usam um indicador de velocidade que apresenta duas informações distintas e contém mecanismos separados para mostrar a velocidade da aeronave e o número *mach* atingido. Um ponteiro branco padrão é usado para indicar a velocidade na escala em nós. Um ponteiro listrado em vermelho e branco movimenta-se de forma independente fazendo a indicação na escala *mach* para monitorar a velocidade máxima permitida (Figura 89).

Resumindo

Diversos eventos envolvendo a variação de pressão ocorrem durante a operação de uma aeronave, desde o funcionamento do motor ao deslocamento da aeronave em diferentes altitudes e velocidades. Nesse cenário, há a necessidade de diversos instrumentos para indicar a condição de tais eventos à tripulação. Foram apresentados os três principais mecanismos utilizados para o sensoriamento da pressão, quais sejam, tubo de Bourdon, diafragma ou foles e dispositivo de sensoriamento em estado sólido.

Da mesma forma, viu-se que os instrumentos de leitura direta recebem o elemento a ser medido no próprio corpo do instrumento, enquanto os de sensoriamento remoto possuem um mecanismo sensor, que fica fora do instrumento. Ademais, foram abordados os princípios de funcionamento de diversos instrumentos de pressão do motor, tais como manômetro de ar de admissão, de óleo, de combustível e de razão de pressão.

Foram explicitados os instrumentos indicadores de velocidade, de razão de subida e de altitude da aeronave, os quais usam as pressões de ar do sistema *pitot* para o seu funcionamento. Ainda assim, foram apresentados os componentes desse sistema, como tubo de *pitot* e tomadas de pressão estática, suas localizações comuns nas aeronaves e suas finalidades. Evidenciou-se, em seguida, o princípio de funcionamento dos computadores de dados anemométricos e a sua importância para a evolução dos sistemas de instrumentos de aeronaves.

A influência da variação da pressão atmosférica e da temperatura nas indicações dos instrumentos anemométricos foi destacada, assim como as soluções encontradas para que as informações se mantivessem confiáveis em qualquer altitude e condições climáticas.

Concluindo, foram apresentadas as principais características dos altímetros, dos indicadores de razão de subida e dos velocímetros, que fazem parte dos instrumentos primários de voo.

Capítulo 3

Sistema de indicação remota

A utilização de instrumentos de leitura direta apresenta algumas consequências indesejáveis. Entre elas está a presença de tubulações de fluidos na cabine, inclusive de combustível, o que, nela, eleva o risco potencial de incêndio, além de maior peso e volume em suas ligações, principalmente nas aeronaves multimotoras. Dessa forma, a adoção de instrumentos de sensoriamento remoto mostra-se desejável na maioria dos casos, pois, além de corrigir os problemas citados, permite maior liberdade para a configuração dos sistemas. Nesse caso, o transmissor é instalado em local considerado mais conveniente para ligar o sensor ao indicador na cabine. Essa configuração é favorecida pelas dimensões reduzidas dos componentes de estado sólido, o que faz com que os sensores e transmissores sejam cada vez menores.

Não é prático, ou é impossível, usar medidores de leitura direta para a obtenção de informações necessárias na cabine. Um método de sensoriamento remoto e de indicação do sistema de instrumentos das aeronaves amplamente empregado consiste na instalação de sensores em local considerado mais apropriado da fuselagem ou do motor, com a transmissão dos dados sendo realizada eletricamente, por meio de fios, até os mostradores no painel da cabine.

O sistema de sensoriamento remoto de muitos instrumentos é simples, sendo composto de uma unidade de sensoriamento e transmissão e mostrador na cabine, conectados por fios. Nas aeronaves mais modernas, os sinais dos sensores são transmitidos a computadores que empregam essas informações para, após processá-las, comandar servomotores, apresentá-las ao piloto no monitor da cabine ou transmiti-las a outros sistemas que dependam dessas informações. São citados, como exemplo, os instrumentos de pressão do ar utilizados pelos instrumentos de voo, nos quais o ADC recebe as informações a partir dos dispositivos de coleta de dados, representados pelas unidades de sensoriamento e transmissão, tais como o tubo *pitot* e as tomadas de pressão estática. Em muitas aeronaves, os dados dos sensores são coletados pelos próprios computadores dedicados da célula e do motor. Neles, as informações são processadas e transmitidas, de forma elétrica ou digital, para a cabine.

Como se pode deduzir, a informação que sai do sensor, passando pelo transmissor até chegar ao indicador, reflete a realidade daquilo que se deseja mensurar. Portanto, as etapas do sensoriamento remoto têm de ser precisas. E é o que se verifica nos sistemas empregados nos instrumentos de aviação. Eles operam com grande confiabilidade e precisão.

Tendo em vista que nesses sistemas a transmissão da informação do sensor até o indicador se dá por meio de sinais elétricos, eles são alimentados pelo sistema elétrico da aeronave. Pequenos motores, dentro das caixas dos instrumentos, são usados para posicionar os ponteiros do indicador, em vez de ligações mecânicas operadas diretamente. De acordo com a variação dos sinais elétricos recebidos, os motores do indicador são movimentados para a posição que reflete a indicação correta.

Ocorre que a informação dos sensores precisa ser convertida em sinais elétricos de forma consistente para poder ser transmitida ao indicador. Para tanto, são empregadas algumas técnicas confiáveis e relativamente simples que atendem a diferentes tipos de sensores. Uma das maneiras de transmitir informações de um ponto a outro de forma confiável é por meio de sistema elétrico sincronizado. Esse método é empregado tal como se verifica no indicador remoto de posicionamento em sistemas de trem de pouso, em sistemas de piloto automático e em muitas outras aplicações de indicação remota. Os mecanismos mais comuns de indicação remota são conhecidos como sistema de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã elétrico, de corrente contínua de sincronismo de dados e de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã permanente. Eles apresentam construção similar, e todos operam com base na relação consistente entre eletricidade e magnetismo. Eles usam, em sua operação, a capacidade de a eletricidade criar campos magnéticos com direção definida, e deles poderem interagir com ímãs e outros campos eletromagnéticos.

Nas aeronaves modernas, a transmissão das informações adota o mesmo princípio, porém por meios diferentes, uma vez que os mostradores digitais da cabine recebem toda a sua informação de um DADC e de outros computadores, por intermédio do barramento de dados digitais e não pelo uso de fios elétricos. Os pacotes de dados transmitidos através do barramento contêm as instruções específicas para indicar determinada informação em uma tela específica do monitor, no painel da cabine.

A seguir, serão apresentados os principais sistemas de indicação remota elétricos.

3.1 Sistema de corrente contínua de sincronismo de dados

O sistema de corrente contínua de sincronismo de dados é composto de um transmissor (Figura 90), um indicador e fios de ligação. Ele é muito empregado em aeronaves com sistemas elétricos de corrente contínua, em inglês, *direct current* (DC). O transmissor é equipado com uma resistência de enrolamento circular e um braço de contato rotativo. Este gira sobre um eixo no centro do enrolamento da resistência. As duas extremidades do braço são escovas e sempre tocam o enrolamento em lados opostos. A Figura 91 ilustra a configuração desse sistema.

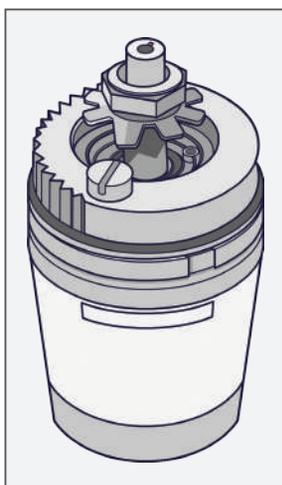


Figura 90 - Transmissor síncro

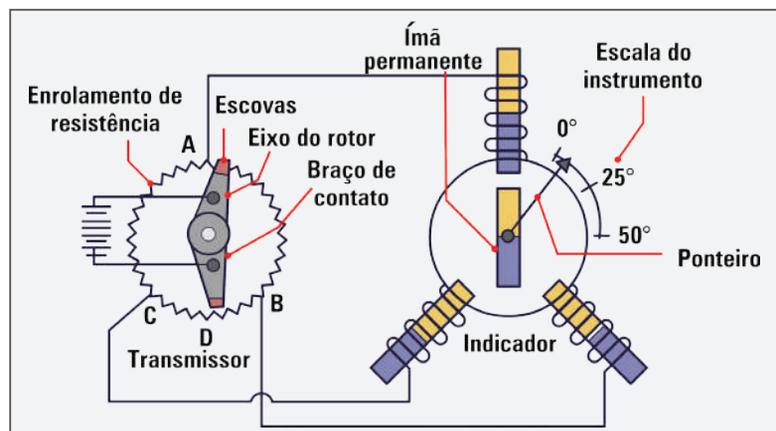


Figura 91 - Sistema de transmissão remota

Quando se pretende indicar a posição de um componente usando esse sistema, o eixo, ao qual estão fixados os braços e os contatos, segue até o final da caixa do transmissor e é conectado ao componente cuja posição será transmitida (por exemplo: *flaps* ou trem de pouso). À medida que o componente se move, ele faz com que o eixo do transmissor e os braços de contato fixados a ele girem e a voltagem seja aplicada por meio das escovas nos dois pontos de contato do braço, na circunferência do enrolamento da resistência.

Esse mecanismo apresenta o mesmo princípio de funcionamento para medir dados que não sejam a indicação de posição. Nesse caso, o eixo do rotor não sai da caixa do transmissor, pois o dispositivo de sensoriamento, que transmite movimento rotativo ao eixo, normalmente fica localizado no interior dessa caixa. Como se percebe na Figura 90, os enrolamentos da resistência do transmissor são divididos em três grupos fixos, separados entre si em 120°. Esses espaçamentos distribuem a corrente através dos **enrolamentos toroidais** do motor do indicador. Portanto, há três setores no enrolamento de resistência, os quais são percorridos pelas duas escovas do braço mecânico.

O funcionamento ocorre da seguinte maneira:

- a corrente, ao passar pelos enrolamentos, cria um campo magnético com norte e sul definidos;
- no momento em que o eixo do rotor do transmissor é girado, o braço de fornecimento de tensão se move;
- o braço faz contato com os enrolamentos da resistência circular do transmissor em diferentes posições, a resistência entre o braço de fornecimento e os diversos ressaltos do enrolamento muda;
- a voltagem entre os ressaltos, em consequência, também se modifica, segundo as distâncias dos enrolamentos da resistência fiquem mais longas ou mais curtas. Isso acontece porque os braços se movimentam nos três setores, dois de cada vez;
- o braço, nesse movimento, determina o tamanho do setor da resistência e, conseqüentemente, o valor da resistência do circuito formado. Isso estabelece a tensão entre as escovas dos braços de contato.

O resultado é que correntes variadas são enviadas através dos ressaltos para os três enrolamentos do motor do indicador. O campo magnético, criado pela corrente que passa por intermédio das bobinas dos indicadores, muda quando cada um recebe correntes de valores variados dos ressaltos dos enrolamentos. A direção do campo magnético também muda, correspondendo à posição do braço móvel do transmissor. Um ímã permanente é ligado ao centro do eixo do rotor no indicador. Ele se alinha à direção do campo magnético, modificando sua posição. Toda vez que o campo magnético muda de direção, o ímã permanente e o ponteiro se alinham à nova posição do campo. Dessa forma, sempre que o rotor do transmissor é movido, o ponteiro do indicador acusa essa movimentação.



Enrolamento toroidal:
enrolamento em forma de toroide, ou seja, em forma tubular.

A Figura 92 exemplifica o acionamento do ponteiro indicador, a partir da variação de corrente promovida pelos ressaltos dos enrolamentos tocados pelo cursor. Nela, também se verifica a posição do ímã permanente junto às bobinas estatoras do motor de acionamento do ponteiro indicador.

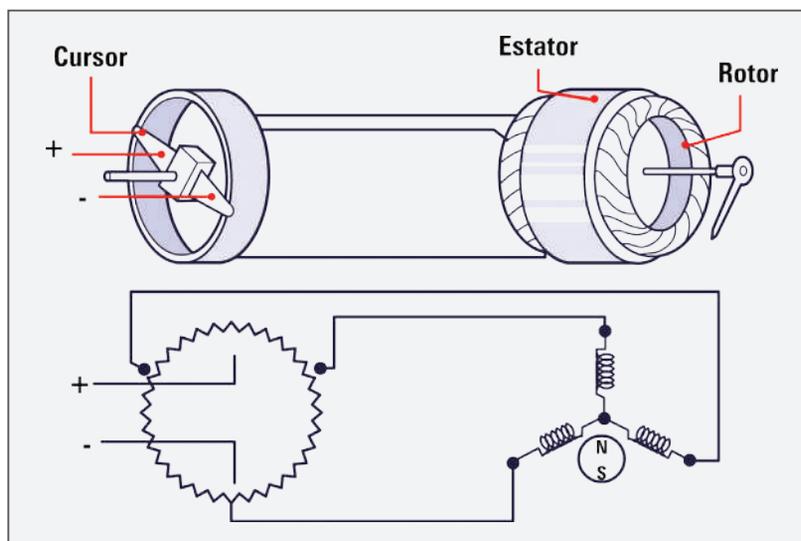


Figura 92 - Cursor, estator e rotor do sistema de corrente contínua

Quando o sistema de corrente contínua é usado para informar a posição do trem de pouso, um recurso é adicionado a ele para indicar se o trem está travado. Assim, o sistema avisa se o trem está em baixo ou em cima e se está travado. Essa configuração é de suma importância, pois, para o piloto, não basta saber se o trem está totalmente distendido ou recolhido. Também é necessária a informação de que ele esteja corretamente travado. Para tanto, os dispositivos mecânicos que travam o trem nas posições fornecem essa informação ao indicador de posição na cabine. Nesse cenário, o indicador deve ser equipado com mecanismo que acrescente a informação de travado às suas indicações de posição recolhido ou distendido. Isso é conseguido pela variação da corrente que passa através das bobinas do indicador. Os interruptores localizados nos dispositivos de travamento fecham, quando as travas se engatam, indicando que o dispositivo está travado.

O sistema funciona da seguinte maneira:

- a corrente do sistema de corrente contínua flui através do interruptor e de um pequeno circuito adicional, o qual incorpora um resistor à seção de enrolamento do transmissor (Figura 93), criada pelo braço do rotor nos ressaltos do enrolamento;
- esse circuito adicional muda a resistência total da seção. Com isso, a corrente que flui através de uma das bobinas do motor do indicador apresenta um valor diferente em relação ao que seria indicado sem a presença do resistor no circuito, e o campo magnético ao redor da bobina também sofre alteração;
- assim, o campo magnético combinado, criado pelas três bobinas do motor, também é afetado, causando uma mudança de direção do campo magnético do indicador;
- o ímã permanente e o ponteiro se alinham à nova direção e mudam para a posição travada indicada no mostrador.

Resumidamente, o circuito adicional é incorporado ao sistema no momento em que as travas do trem de pouso acionam o interruptor de indicação de trem travado. Dessa forma, os campos magnéticos das bobinas estatoras do indicador são alterados e o ímã permanente se alinha a uma nova posição, indicando no mostrador que o trem está travado. Quando o dispositivo de travamento é deslocado, o circuito resistor adicional é retirado do sistema, fazendo com que o ponteiro indique no mostrador que o trem está destravado. A Figura 93 apresenta um diagrama simplificado do interruptor de travamento em um sistema de corrente contínua de três fios e um mostrador indicador.

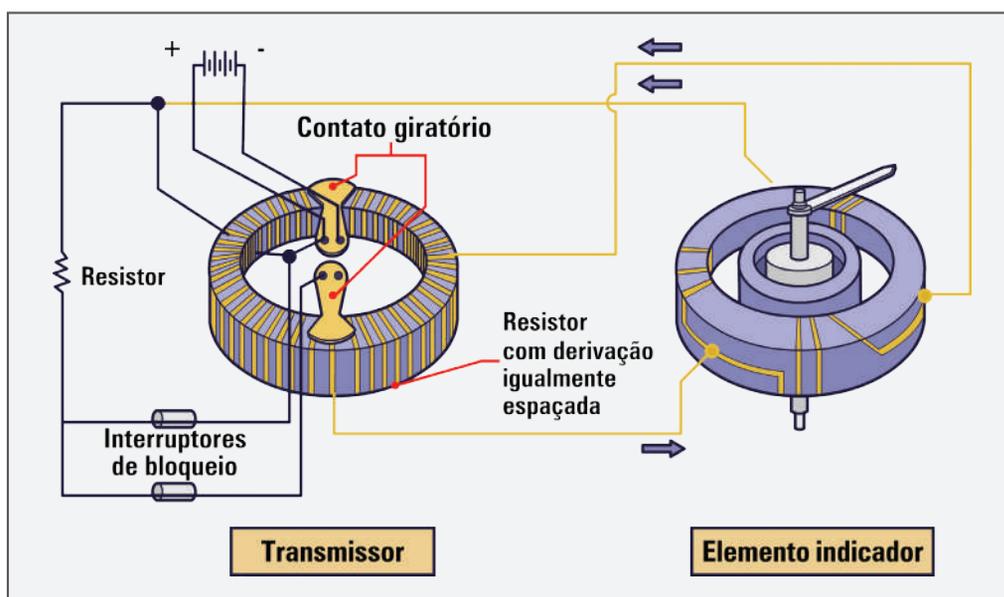


Figura 93 - Circuito de indicação de travamento adicionado ao sistema de indicação remota de corrente contínua

3.2 Sistema síncro AC

Os sistemas de indicação remota de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã elétrico e de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã permanente são empregados em aeronaves equipadas com sistema elétrico de corrente alternada, em inglês, *alternating current* (AC). Eles funcionam de maneira semelhante ao sistema de corrente contínua, porém utilizam a corrente alternada para alimentar o seu circuito. Esses sistemas são ligados de forma diferente em relação aos sistemas de corrente contínua. Os diferentes fluxos de corrente através do transmissor e das bobinas estatoras do indicador são induzidos, conforme os ciclos de corrente se alternam entre o zero e o fluxo do campo magnético, que é deixado fluir pelo rotor magnético. Dessa forma, eles fazem uso da indução elétrica definida pelas escovas do rotor, em vez do fluxo de corrente por meio de resistências.

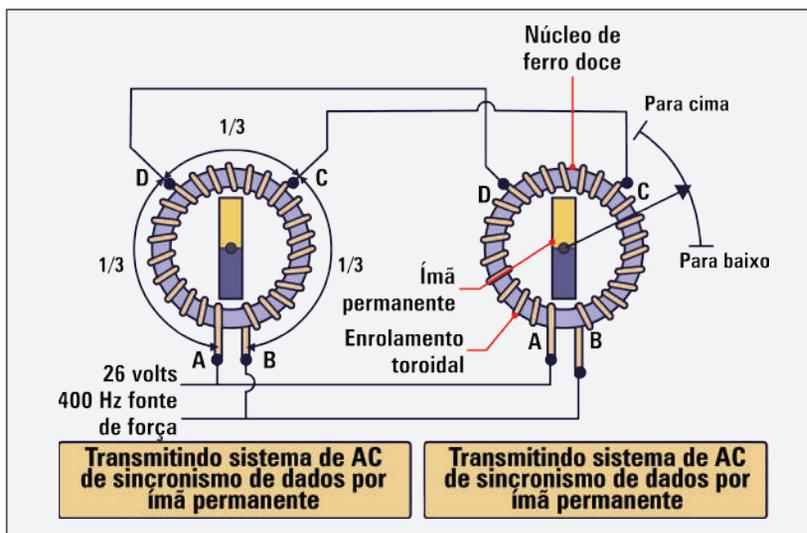


Figura 94 - Circuito elétrico do sistema de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã permanente de indicação remota

O sistema de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã permanente usa rotores com ímãs permanentes no transmissor e no indicador (Figura 94). Em geral, o ímã do transmissor é maior do que o do indicador, porém a resposta eletromagnética do ímã do rotor indicador e do ponteiro permanece a mesma, de maneira que o ímã do indicador acompanha a posição do transmissor, permanecendo alinhados. Em tal sistema, quando o eixo do sistema de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã permanente transmissor é girado em determinado ângulo, o

rotor do indicador é movimentado nesse mesmo ângulo. Eles se alinham ao campo magnético criado pelas bobinas, adotando o mesmo ângulo de deflexão.

O sistema de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã elétrico é praticamente idêntico ao por ímã permanente. A diferença primordial é que, enquanto neste os rotores de indicação e transmissão empregam ímãs permanentes, naqueles são usados ímãs eletromagnéticos (Figura 95). Isso é possível pela característica de o dispositivo eletromagnético, tal como um ímã permanente, se alinhar à direção do campo magnético criado pela corrente que passa através das bobinas estatores do indicador. Isso faz com que a posição do ponteiro indicador acompanhe a posição do rotor do transmissor.

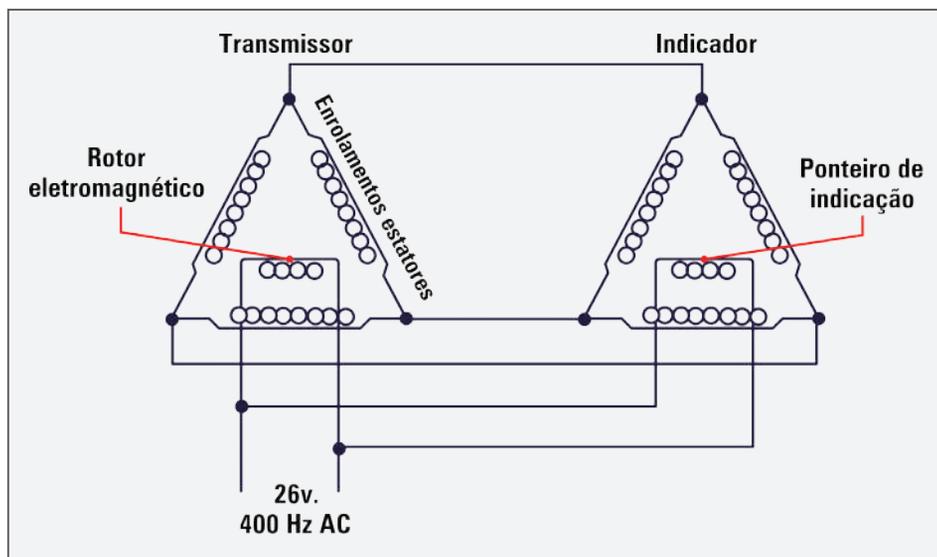


Figura 95 - Circuito elétrico do sistema de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã elétrico de indicação remota

Como se observa, tanto um quanto outro mantém a principal característica de todos os sistemas síncro, a posição do rotor do indicador espelhar a do rotor transmissor em qualquer variação deste. Esses sistemas são usados em muitas das aplicações dos sistemas DC. Destaca-se que são comuns adaptações dos sistemas síncro por ímã elétrico e por ímã permanente, as quais são, frequentemente, empregadas em indicadores direcionais ou em sistemas de piloto automático.

3.3 Manômetro de indicação remota de pressão de combustível e de óleo

Os sistemas síncro são muito apropriados para a tarefa de transmissão dos parâmetros de pressão do combustível e do óleo lubrificante do motor para o manômetro na cabine. Isso porque os instrumentos de leitura direta não são desejáveis nesses casos, pelos motivos apresentados anteriormente.

O funcionamento do sistema é bem simples:

- uma linha de pressão do sistema que se quer mensurar é direcionada a um transmissor remoto de um sistema síncro, localizado próximo da fonte de pressão para evitar a necessidade de longas linhas de tubulação;
- a pressão do fluido atua sobre um fole de pressão, que varia de volume em proporção direta à pressão recebida do fluido. O movimento do fole aciona o rotor do transmissor, fazendo-o girar. Este se movimenta de maneira proporcional à variação da pressão do fluido, fazendo com que o ajuste de voltagem do enrolamento resistor do estator do síncro varie de forma consistente;
- essa voltagem é transmitida às bobinas do indicador, que desenvolvem um campo magnético, ocasionando o posicionamento do ponteiro sobre a escala de pressão do manômetro (Figura 96).

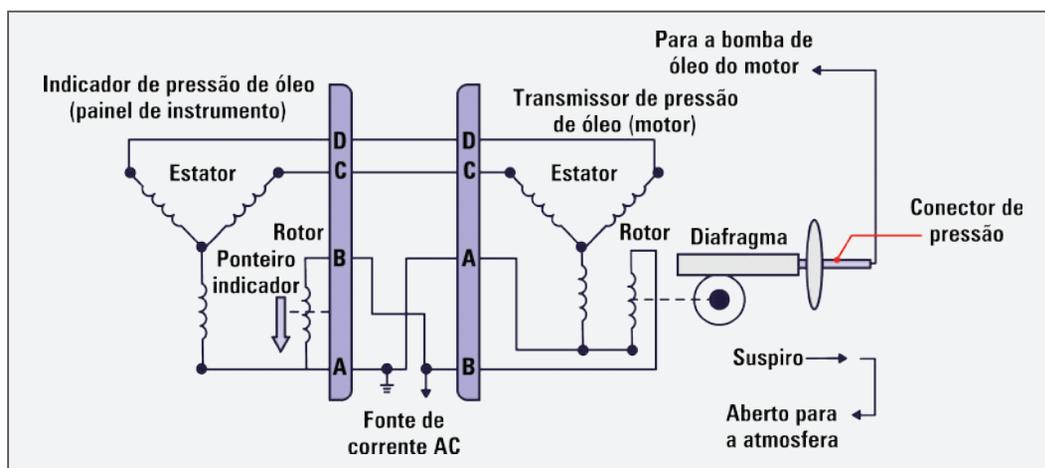


Figura 96 - Circuito elétrico do sistema de sensoriamento remoto de pressão

Por motivo de economia de espaço no painel da cabine, em algumas aeronaves bimotoras, os mecanismos síncro de cada motor são usados para movimentar ponteiros distintos em um

mesmo indicador. São os chamados mostradores duplos ou duais. Isso é viável porque os eixos dos motores dos ponteiros indicadores ficam alinhados, de modo que o eixo traseiro passe por meio do eixo oco do motor indicador dianteiro. Dessa forma, é possível colocar uma bobina atrás da outra para acionar os ponteiros de modo independente. Cada ponteiro recebe a sua bobina. Elas respondem ao alinhamento de seu próprio campo magnético do motor. Cada ponteiro se movimenta de acordo com a variação do campo magnético do seu motor. Como se vê, são indicadores independentes que compartilham a caixa do instrumento.

Nesse tipo de indicador, os ponteiros são rotulados de número um e de número dois, para evitar confusão de indicação. O mesmo princípio de funcionamento é empregado para compartilhar, em um mesmo instrumento, duas indicações de parâmetros distintos, tais como pressão do óleo e pressão do combustível. Cada parâmetro possui seu próprio motor síncro para posicionar o ponteiro.

Muitos outros instrumentos utilizam os sistemas de indicação remota síncro descritos neste tópico, ou similares. O modelo empregado depende de uma série de variáveis. Em alguns casos, a tecnologia mais simples é a mais adequada e a menos cara para o emprego a que se destina. Em aeronaves modernas, com instrumentação digital, são aplicados sensores semicondutores sensíveis à pressão, que fornecem sinais digitais diretamente aos computadores dedicados do motor e da célula da aeronave. Em outras, os sensores analógicos são mantidos acompanhados de uma unidade de conversão de sinal analógico para digital, por meio da qual o computador pertinente obtém a informação em formato digital para processar e exibir em uma tela digital na cabine.

3.4 Indicadores de movimento mecânico

Muitos instrumentos em uma aeronave sinalizam o movimento mecânico de um componente, ou até mesmo da aeronave. Alguns empregam o sistema de sensoriamento remoto síncro e os sistemas de indicação apresentados anteriormente. Outros modos de capturar e exibir informações dos movimentos mecânicos também são utilizados. Em seguida, são apresentados alguns indicadores individuais de movimentos mecânicos e grupos de instrumentos com essa função. Todos proporcionam informações valiosas para o piloto sobre as condições de voo da aeronave, ou de um componente.

3.4.1 Tacômetro

O termo tacômetro aplica-se aos instrumentos empregados para medir a velocidade angular. Nas aeronaves, é utilizado para monitorar a potência do motor e garantir que ele está operando dentro do limite permitido. Nos motores convencionais, ele indica a velocidade do eixo de manivelas, ou seja, o quanto o eixo está girando em rotações por minuto (RPM). O instrumento é de indicação direta ou remota, e o mostrador é calibrado para sinalizar o giro do eixo em RPM. Nota-se que muitos tacômetros de motores convencionais também possuem tambores numéricos embutidos que são acionados por um mecanismo rotacional interno. Eles indicam o

tempo, em horas, no qual o motor está operando (Figura 97). Existem dois tipos de tacômetros em uso: o mecânico e o elétrico.



Figura 97 - Tacômetro analógico de motor alternativo

Nos motores a turbina, o tacômetro é usado para monitorar a velocidade da seção do compressor do motor. Nesse caso, a calibração é representada em percentuais de RPM (Figura 98), segundo a qual 100% corresponde à velocidade ótima da turbina. Esse tipo de calibração permite que sejam adotados procedimentos de operação similares em motores dotados de diferentes regimes de RPM. Essas indicações são relacionadas ao eixo do compressor que se está medindo. Normalmente, é utilizado o termo N1 para se referir à rotação do eixo de baixa pressão do compressor e N2 para o de alta. O termo NG é usado sinalizar o regime da turbina de gases do motor.



Figura 98 - Tacômetro analógico de motor a turbina

Existem vários tipos e modelos de tacômetros, baseados em diversos princípios de funcionamento. A seguir, serão apresentadas as principais características dos tacômetros elétricos e dos mecânicos, comumente empregados na aviação.

- a) Tacômetros mecânicos - esse é mais apropriado para equipar aeronaves leves, pequenas, monomotoras, nas quais existe uma distância curta entre o motor e o painel de instrumentos. Isso porque a transmissão do movimento do eixo de manivela até o indicador na cabine é feita diretamente, por meio de um eixo de transmissão flexível. Desse modo, quando o motor é acionado, o eixo flexível o acompanha. O indicador dispõe de um conjunto de contrapesos (Figura 99) acoplado ao mecanismo de engrenagem que movi-

menta o ponteiro. Quando o eixo de transmissão gira, a força centrífuga age nos contrapesos e os move para uma posição angular. Essa posição varia de acordo com a rotação do motor. A quantidade de movimento dos contrapesos é transmitida ao ponteiro, que se desloca no mostrador do tacômetro indicando o movimento dos contrapesos, o qual está diretamente relacionado à rotação do motor.

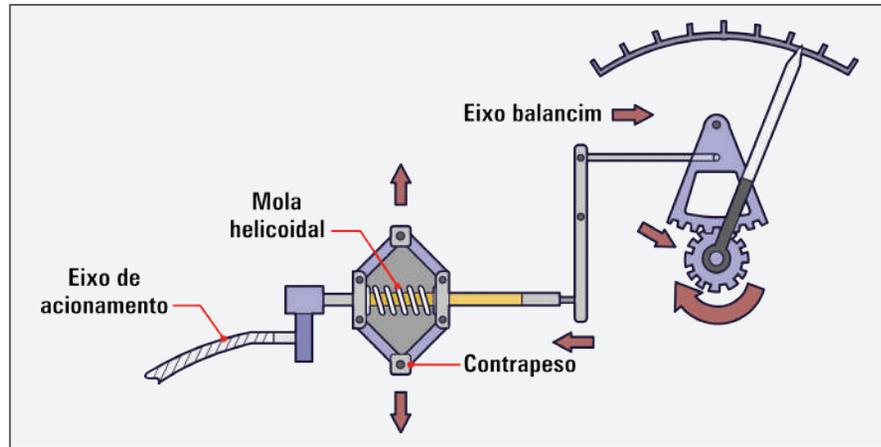


Figura 99 - Mecanismo de contrapeso do tacômetro mecânico

Há outro tipo de tacômetro mecânico que é uma variação mais comum do equipamento apresentado. Ele utiliza um copo de arrasto magnético para mover o ponteiro no indicador. Conforme o eixo de transmissão se movimenta, ele gira um ímã permanente em um copo de alumínio de baixa tolerância. Um eixo ligado ao ponto de indicação é fixado no centro externo do copo. Como o ímã é girado pelo cabo flexível do motor, seu campo magnético atravessa o condutor que o circunda, criando **correntes parasitas** no copo de alumínio. Esse fluxo de corrente gera o seu próprio campo magnético, que interage com o produzido pela rotação do ímã. Como consequência, o copo tende a girar, levando com ele o ponteiro do indicador. Uma mola espiral de restrição calibrada limita as rotações do copo e do ponteiro na escala do instrumento, conforme ilustrado na Figura 100.



Corrente parasita: o mesmo que corrente de Foucault.

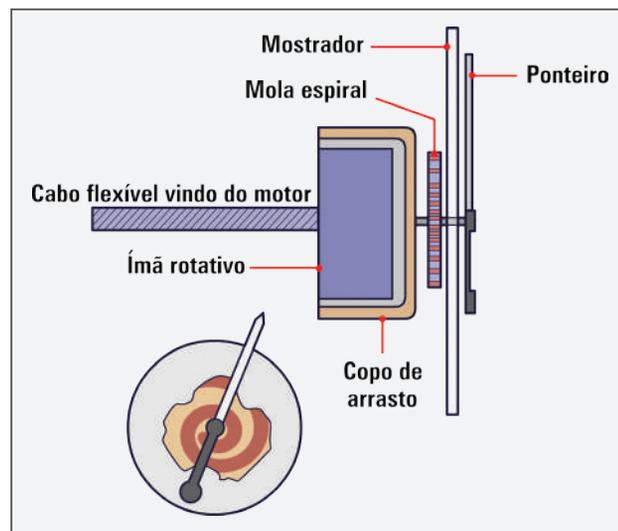


Figura 100 - Mecanismo interno do tacômetro mecânico com copo de arrasto

b) Tacômetro elétrico

Pelo fato de o tacômetro mecânico não ser indicado para aeronaves multimotoras, em virtude de as distâncias entre os motores e a cabine serem grandes, o que leva à utilização de longos cabos de transmissão flexíveis, foi desenvolvido o tacômetro elétrico. Este instrumento apresenta maior precisão e menor necessidade de manutenção, além de poder ser empregado em grande variedade de sistemas, diferentemente dos tacômetros mecânicos.

Muitas aeronaves são equipadas com um tacômetro elétrico dotado de pequenos geradores AC, montados na caixa de engrenagens, em motores convencionais, ou na seção de acessórios, nos motores a turbina. Ele funciona da seguinte maneira: como o gerador é ligado mecanicamente ao movimento do motor, quando este entra em operação, ele o acompanha, produzindo uma saída elétrica com frequência diretamente proporcional à velocidade do motor. O sinal do gerador é transmitido, por meio de fios, até o motor síncrono do indicador, o qual espelha o sinal de saída. Um copo de arrasto (ou disco) é usado para movimentar o indicador, da mesma maneira que no tacômetro mecânico. A Figura 101 ilustra o funcionamento do tacômetro elétrico.

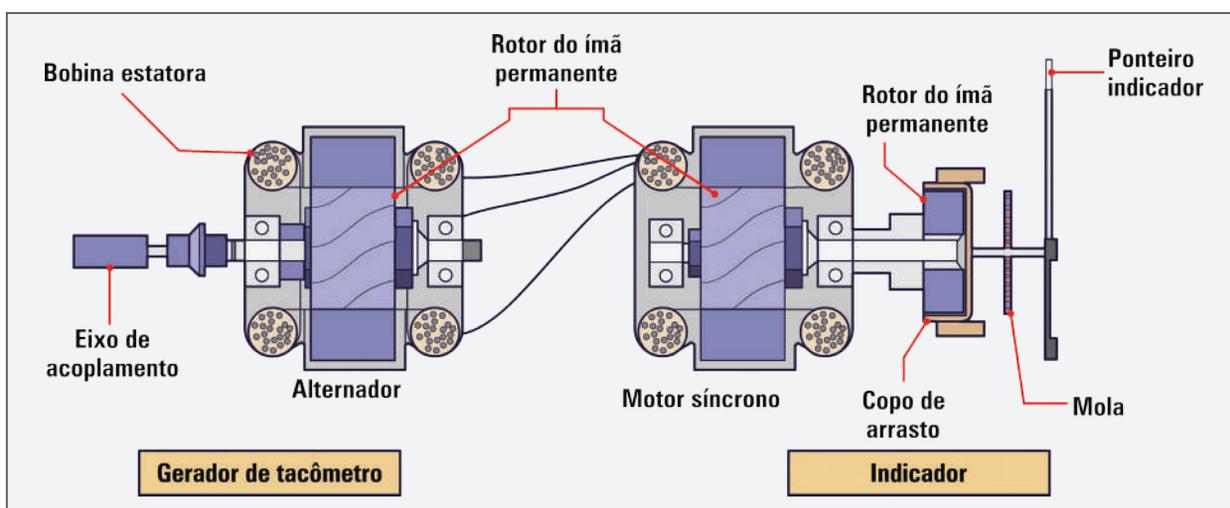


Figura 101 - Tacômetro elétrico com motor síncrono e copo de arrasto

Da mesma forma como os manômetros, o tacômetro possui indicadores dobrados, ou duais, para apresentar duas informações distintas em um mesmo instrumento (Figura 102). Nesse caso, os ponteiros do indicador mostram simultaneamente, em uma ou duas escalas, as rotações de dois motores. No caso de alguns helicópteros, o tacômetro dual indica, frequentemente, as rotações do motor e do rotor principal.

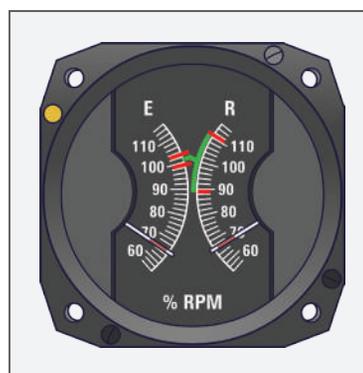


Figura 102 - Tacômetro dual analógico de helicóptero com RPM do rotor e do motor

Essa configuração do tacômetro fornece informações relacionadas ao deslizamento da embreagem, obtidas por meio da comparação das voltagens produzidas pelos dois geradores dos tacômetros. Dessa forma, é possível verificar se a rotação do motor está produzindo o giro esperado para o rotor principal. Algumas vezes, uma terceira indicação é disponibilizada no mostrador, informando o valor do deslizamento. No tacômetro analógico, exemplificado na Figura 103, verificam-se duas escalas concêntricas. Uma para indicar o giro do motor e outra a do rotor. Nas escalas, são destacados arcos para se averiguar o deslizamento da embreagem. Normalmente, os ponteiros se movimentam de maneira coordenada, estando um próximo do outro. Quando ocorre o deslizamento, o ponteiro do motor tende a se afastar do ponteiro do rotor.

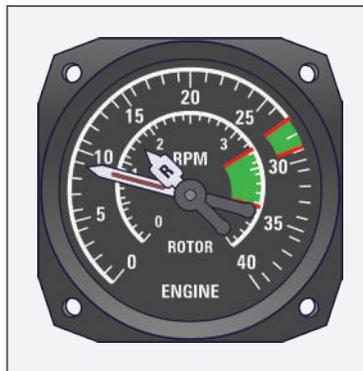


Figura 103 - Tacômetro analógico de helicóptero com RPM do rotor e do motor

Os motores a turbina são equipados com um tacômetro que utiliza uma sonda (Figura 104) para obter a informação do giro do eixo do compressor. A sonda é posicionada junto a uma engrenagem que gira com a mesma velocidade do eixo do compressor.

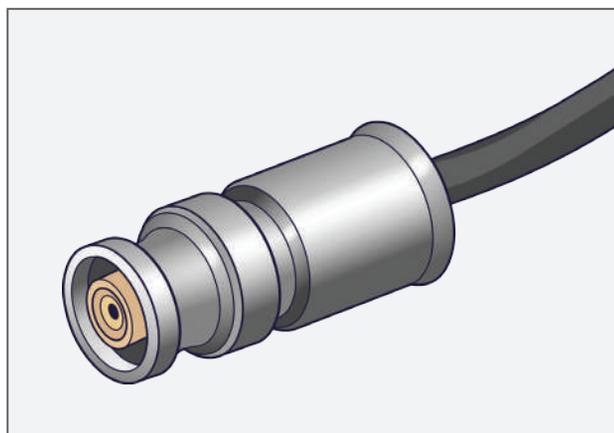


Figura 104 - Sonda do tacômetro

No interior da sonda, um ímã permanente forma um campo magnético e cria dois polos definidos. Esse campo magnético se estende através dos polos e se expande para fora da sonda. Como a engrenagem gira próxima da sonda (Figura 105), ela altera a densidade do fluxo do campo magnético, enquanto este se move através dos polos. Isso gera sinais de voltagem nas bobinas dentro da sonda, os quais variam de amplitude de modo diretamente proporcional à velocidade do motor.

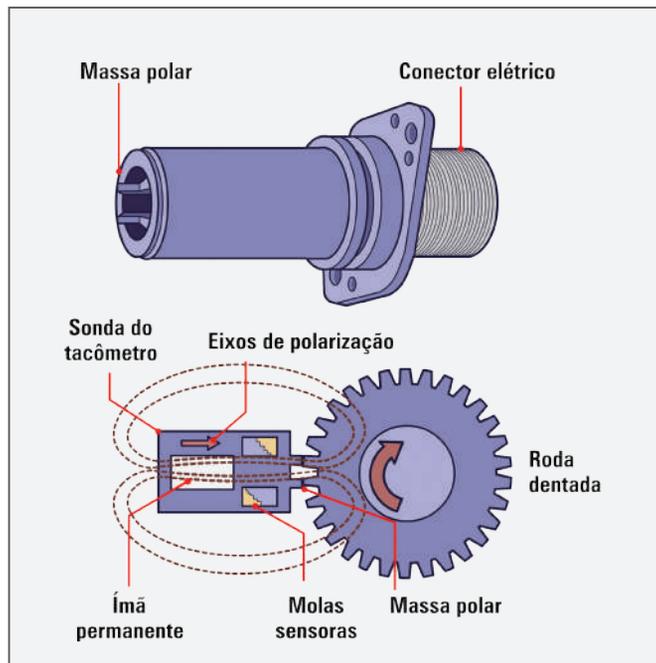


Figura 105 - Tacômetro com sonda

Os sinais de saída da sonda do tacômetro precisam ser processados em um módulo localizado remotamente. Da mesma forma que necessitam ser amplificados para que o indicador, do tipo servomotor, seja movimentado no instrumento, localizado na cabine. Eles são, também, usados como entrada para um sistema de controle automático de potência ou por um sistema de aquisição de dados de voo.

3.4.2 Sincroscópio

É um instrumento que indica se dois ou mais dispositivos rotativos, tais como motores, estão sincronizados. O dispositivo informa o quanto um motor está girando mais rápido ou mais lento que o outro. Normalmente, o motor de referência é chamado de mestre. Portanto, em uma aeronave bimotora, um dos motores está mais rápido, mais lento ou na mesma velocidade que o motor mestre.

Para fazer a comparação entre as velocidades dos motores, o sincroscópio usa como referência a saída dos geradores de tacômetro. Para tanto, ele dispõe de um pequeno motor elétrico que recebe a corrente elétrica dos geradores de ambos os motores. A corrente elétrica fornecida pelo motor mais veloz controla o sentido do giro do motor do sincroscópio (horário ou anti-

horário). Se ambos os motores estiverem operando exatamente na mesma velocidade, o motor do instrumento fica parado.

Em uma aeronave bimotora, cujo motor mestre é o esquerdo, caso o ponteiro do sincrocópio se movimente para a esquerda, o motor do lado direito (que não é o mestre) estará mais lento que o motor mestre. Caso ele esteja mais rápido, o ponteiro gira para a direita. Portanto, o movimento do ponteiro depende da velocidade desenvolvida por um motor em relação ao motor mestre. Ele pode estar mais lento, mais rápido ou com a mesma velocidade. A rotação do ponteiro é proporcional à diferença de corrente produzida pelos tacômetros dos motores.

Conforme visto, caso um dos motores opere mais rapidamente, seu gerador de sinal tacômetro faz com que o motor do sincrocópio gire em um determinado sentido. Entretanto, se a velocidade do outro motor ultrapassar a do primeiro, o sinal do gerador tacômetro fará com que o motor do sincrocópio comece a girar no sentido oposto.



Figura 106 - Sincrocópio

A rotação de determinado motor é sempre comparada à do motor mestre. No mostrador do indicador sincrocópio, aparecem as indicações lento (*slow*) e rápido (*fast*), que representam a comparação com o motor mestre, a partir da qual o piloto faz os ajustes necessários, conforme mostra a Figura 106.

3.4.3 Acelerômetro

Acelerômetro é um instrumento que mede a aceleração. Ele é usado para monitorar forças que agem sobre a estrutura da aeronave. Também é utilizado em sistemas de navegação de referência inercial. A instalação dos acelerômetros era limitada a aeronaves de alto desempenho e a aviões acrobáticos. Em seguida, ele passou a ser também empregado para monitorar as cargas impostas às aeronaves durante os voos, com vistas a determinar o tempo de vida da aeronave.

Os acelerômetros simples são instrumentos mecânicos, de leitura direta, calibrados para indicar a força aplicada em relação à força da gravidade (**G**). Um (**G**) é igual à força da gravidade. O mostrador de um acelerômetro dispõe de escalas para sinalizar forças positivas e negativas. Quando uma aeronave inicia uma subida rápida, a força (**G**) positiva tende a puxar um tripulante para o seu assento. Enquanto no início de uma descida rápida faz com que a força atue em direção oposta, resultando em uma força (**G**) negativa.

Esse instrumento permite ao piloto restringir as manobras dentro das limitações do avião e da tripulação. Essa preocupação com a aceleração se deve ao fato de as aeronaves apresentarem limites de operação, alguns aviões resistem até 2,5 G, enquanto outras modernas aeronaves de caça toleram 15 G ou mais. O excesso de cargas de aceleração na estrutura acarreta danos estruturais da aeronave e prejudica a tripulação. O piloto deve conhecer a resistência do seu avião, em unidade (**G**).

Diante dessa situação, a maioria dos acelerômetros analógicos possui três ponteiros (Figura 107). Um, chamado de ponteiro principal, aponta continuamente a força da aceleração a que é submetida a aeronave. Ele gira no sentido horário. Os outros dois são chamados de ponteiros auxiliares e possuem dispositivos de catraca, que permitem ao piloto ajustar, por meio de um botão, localizado no canto inferior esquerdo do instrumento, as cargas máximas aproximadas de aceleração positiva e negativa pretendidas durante o voo ou uma manobra específica. Após a seleção, os ponteiros auxiliares permanecem imóveis na posição ajustada para indicação máxima de aceleração, até que sejam determinados novos limites, por meio de ajuste no botão mencionado.

O ponteiro auxiliar de (G) positivo gira no mesmo sentido do ponteiro principal, ou seja, no sentido horário. Enquanto o de (G) negativo gira no sentido anti-horário.

A base de funcionamento desse instrumento é a inércia. É o mesmo efeito que se experimenta quando se está em um automóvel que realiza uma frenagem abrupta. O carro diminui de velocidade, mas o corpo tende a permanecer na velocidade que estava.

Para o acelerômetro perceber a variação de inércia, em seu mecanismo interno há uma massa, fabricada em bronze fosforoso, que fica livre para deslizar ao longo de um eixo. Quando ocorre qualquer movimento de aceleração ou desaceleração da aeronave, a massa tende a permanecer com o movimento anterior, fazendo com que ela deslize pelo eixo em que está apoiada. Dessa forma, a posição relativa do peso no eixo muda, acionando uma série de polias, de molas e de eixos, os quais movimentam os ponteiros no mostrador para indicar a força relativa da aceleração. Essa posição corresponde à força envolvida na manobra.

A Figura 108 exemplifica os componentes internos de um acelerômetro analógico. Nela, são facilmente percebidos a posição da massa instalada em dois eixos e o conjunto de transmissão do movimento dela ao eixo do ponteiro.



Figura 107 - Acelerômetro com indicação do limite de aceleração positiva e negativa

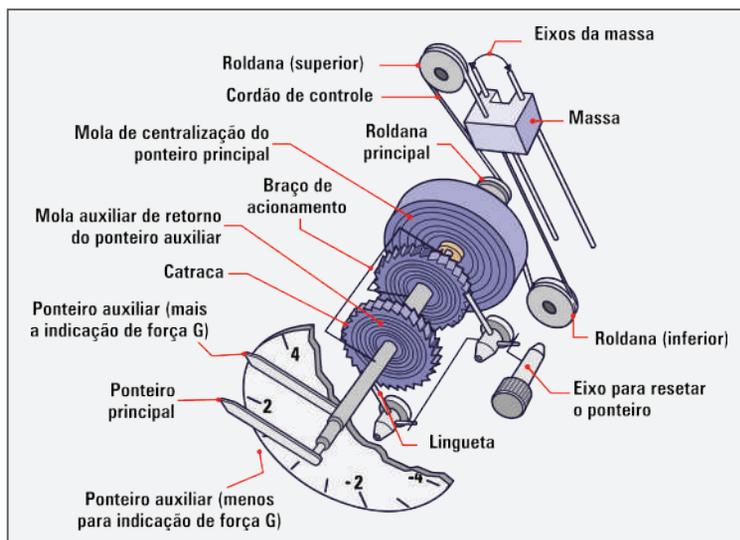


Figura 108 - Componentes internos do acelerômetro mecânico

Quando a aeronave está em repouso, a única força que atua sobre ela é a gravidade, logo o acelerômetro marca 1 G positivo. Da mesma forma, quando o avião permanece em voo horizontal nivelado, a força exterior, que está atuando sobre a massa do acelerômetro, não é capaz de mudar a posição da massa. Assim, a indicação do ponteiro permanece na posição 1 G.

Quando o avião executa manobras de picada (nariz do avião para baixo), a massa do acelerômetro tende a manter a sua posição, enquanto a aeronave desce. Dessa forma, o ponteiro indica a aceleração para baixo. Esse movimento reposiciona a massa nos eixos em um ponto superior ao médio, fazendo com que o ponteiro indique uma aceleração negativa, condição esta que se reflete na leitura negativa. Portanto, quando o avião sai de uma manobra de picada, todos os objetos nele tendem a se mover para baixo, inclusive a massa do acelerômetro, que desce indicando uma leitura de aceleração positiva. Ao voltar à horizontal, a indicação volta a ser de 1 G. O funcionamento é o mesmo durante as manobras de **cabragem**, porém a indicação será de aceleração para cima, ou seja, positiva.



Cabragem: elevar o nariz do avião acima da linha de voo.

Estol: condição de um aerofólio ou avião em que se encontra operando em um ângulo de ataque maior que o de máxima sustentação. Ocorre uma perda da velocidade de voo e, em muitos casos, perda temporária da sustentação e do controle da aeronave.

Corda: linha imaginária que liga o bordo de ataque ao bordo de fuga de um aerofólio.

Neste tópico, foi destacado o funcionamento do acelerômetro simples, que é verificado na maioria dos medidores nas cabines. Ele mede a aceleração em relação às manobras de arfagem executadas sobre o eixo lateral da aeronave. Entretanto, como se sabe, a aceleração se manifesta nos três eixos de voo da aeronave, ocasionando a atuação das forças sobre uma fuselagem ao longo desses eixos. Diante disso, são disponibilizados acelerômetros com indicação da aceleração nos três eixos de voo. O sistema de navegação de referência inercial faz uso desse tipo de acelerômetro para calcular matematicamente, de forma contínua, a localização da aeronave no plano tridimensional.

Também existem acelerômetros elétricos e digitais. Em aeronaves modernas, são utilizados sensores de estado sólido, tais como dispositivos dotados de cristais piezoelétricos. Nesses instrumentos, quando a força de aceleração é aplicada, o valor da resistência, do fluxo de corrente e/ou da capacitância muda de forma diretamente proporcional à intensidade da força. Eles produzem sinais microelétricos que são perfeitamente empregados pelos computadores projetados para processar e exibir as informações na cabine.

3.4.4 Indicador de ângulo de ataque e alerta de estol

Algumas vezes o piloto se depara com uma situação na qual precisa executar uma manobra acentuada de cabragem, porém ele sabe que, se exagerar na manobra, a aeronave entrará em **estol**. Para auxiliar o piloto nesses momentos, há uma série de dispositivos que indicam o ângulo de ataque e as faixas-limite de estol da aeronave.

Cabe destacar que o ângulo de ataque de uma aeronave (AOA) é aquele formado entre o centro da **corda** da asa e o vento relativo. Em um determinado ângulo, o fluxo de ar sobre a superfície da asa é pequeno para criar sustentação suficiente para manter a aeronave voando, dando origem ao estol, ou seja, a força de sustentação da aeronave não é suficiente para mantê-la em voo, fazendo com que ela perca velocidade e altitude, vindo em direção ao solo.

Nas aeronaves pequenas, há um indicador de AOA bem simples, que consiste em um dispositivo de aviso de estol, localizado na parte externa da aeronave. Tal instrumento não

possui qualquer indicador ou comando localizado na cabine. Ele utiliza apenas um aviso sonoro para informar sobre um estol iminente, quando um aumento do AOA é verificado. Isso é feito por meio da instalação de uma palheta em uma cavidade logo atrás do bordo de ataque da asa. A cavidade conta com uma passagem livre até um ponto precisamente determinado, localizado no bordo de ataque.

Como se sabe, durante o voo, uma parte do ar flui pela parte superior, enquanto a outra flui pela inferior. O ponto no bordo de ataque, no qual o ar de impacto diverge, é conhecido como ponto de estagnação. À medida que o ângulo de ataque da asa aumenta, o ponto de estagnação se move para baixo, incidindo na passagem aberta (Figura 109) que leva para a área interna da asa, onde se localiza a palheta. O fluxo de ar passando pela superfície curva do bordo de ataque diminui a pressão do ar na área. Isso faz com que o ar contido na passagem seja sugado para fora do interior da asa. Em virtude desse fluxo, a palheta vibra, produzindo um som audível na cabine.

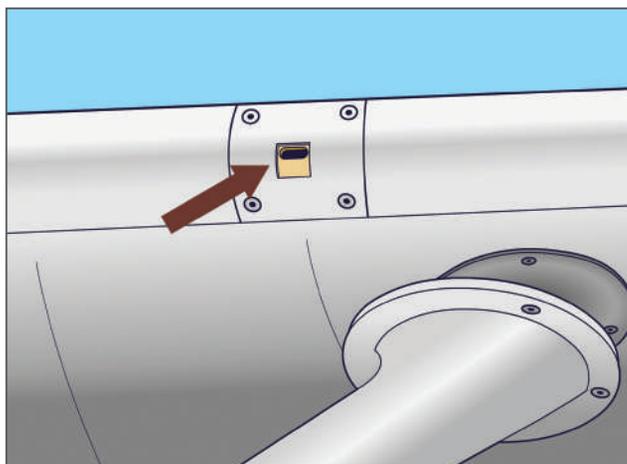


Figura 109 - Entrada de ar para o sistema AOA

Outro dispositivo comum de alarme usa um aviso audível quando o AOA aumenta e chega próximo ao ponto de estol. Esse dispositivo de alerta de estol inclui um interruptor elétrico que abre e fecha o circuito no qual se encontra ligada uma buzina de advertência sonora na cabine. Esse alarme também pode estar conectado por fios a um circuito de luz de advertência na cabine.

O interruptor do circuito fica localizado próximo ao ponto de estagnação do bordo de ataque da asa. Uma pequena aba levemente arqueada ativa o interruptor, conforme é observado na Figura 110.

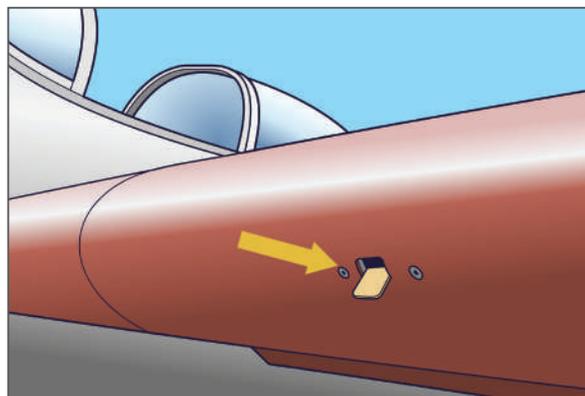


Figura 110 - Interruptor do sistema de alarme de AOA

Em ângulo de ataque normal, a aba é baixada pelo ar que diverge no ponto de estagnação e passa sob a asa. Isso mantém o interruptor aberto para que a buzina não toque, nem a luz de advertência se acenda. Com o aumento do AOA, o ponto de estagnação se move para baixo. O ar divergente, que flui para a parte superior da asa, empurra a aba para cima, acionando o interruptor que fecha o circuito da buzina e da luz. A Figura 111 apresenta o funcionamento desse sistema.

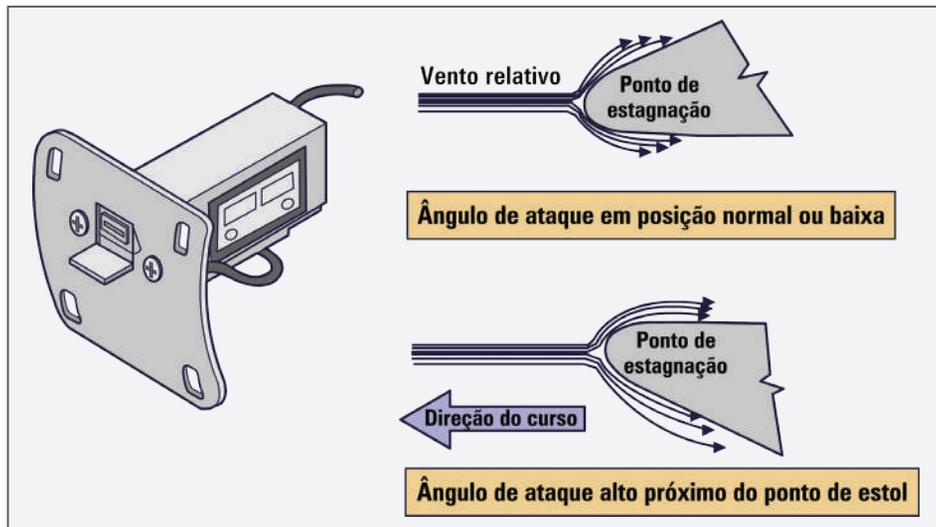


Figura 111 - Sistema de alarme de AOA

Um verdadeiro mecanismo de indicação AOA detecta o ângulo de ataque da aeronave e exibe a informação no indicador da cabine. Ele também é projetado para fornecer informações de referência para outros sistemas em aeronaves de alto desempenho. Os mecanismos de sensoriamento e de transmissão estão localizados no lado dianteiro da fuselagem. Os sinais são enviados pelo sensor à cabine ou ao computador. Os sensores são, comumente, equipados com elemento de aquecimento para garantir a operação sem gelo. Um indicador de AOA é calibrado com ângulos reais, com unidades arbitrárias, com percentual de sustentação utilizado, com símbolos ou mesmo com indicações rápido/lento.

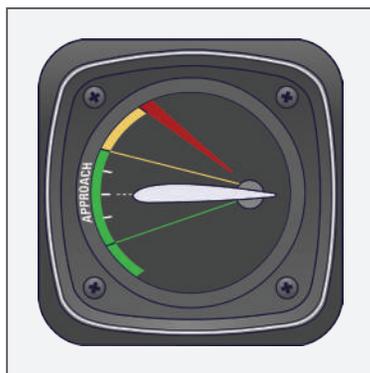


Figura 112 - Indicador analógico de AOA com código de cores

A Figura 112 destaca um indicador de AOA com apresentação bastante intuitiva, usando o recurso pictográfico de um aerofólio. As faixas verdes sinalizam os ângulos de ataque de operações normais. O arco amarelo apresenta a faixa angular que requer atenção do piloto, enquanto a marcação radial vermelha indica o ponto de estol.

Na Figura 113, o indicador possui uma gradação, até a faixa limite, apresentada pelo arco vermelho. Seguindo, a Figura 114 destaca a tela do PFD com a indicação das faixas angulares do AOA. Nela, é empregado o mesmo código de cores apresentado para o instrumento analógico.

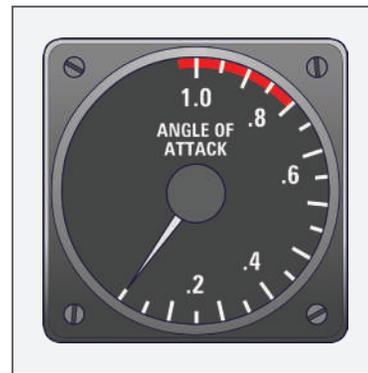


Figura 113 - Indicador de AOA com numeração

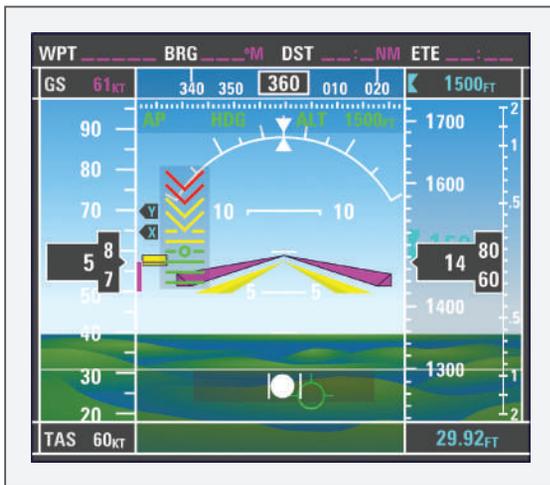


Figura 114 - Indicador de AOA no PFD

Existem dois tipos principais de sensores AOA mais usados. Ambos detectam a diferença angular entre o vento relativo e a fuselagem da aeronave, e a utiliza como plano de referência. Um deles usa defletor, conhecido como defletor alfa (Figura 115), instalado na área externa da fuselagem. Ele é livre para girar com o vento. Quando o ângulo de ataque muda, o ar que passa sobre o defletor muda seu ângulo.

O outro tipo de sensor AOA é equipado com uma sonda que possui duas fendas, conforme se nota, também, na Figura 115.

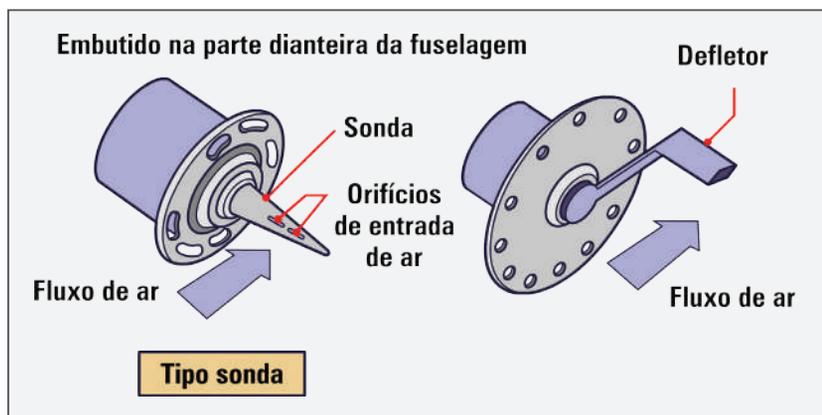


Figura 115 - Sensores de AOA do tipo sonda com ranhuras e do tipo defletor

Ela se estende na parte externa da lateral da fuselagem, na direção do fluxo de ar. As fendas direcionam o ar para lados diferentes das palhetas móveis, instaladas em uma câmara da unidade, localizada sob a carenagem da fuselagem. Com a variação do AOA, a pressão do ar também varia. O fluxo de ar, direcionado através de cada uma das fendas em direção às palhetas, faz

com que estas girem. Como as palhetas são conectadas ao braço de um potenciômetro, os seus movimentos provocam a mudança de resistência dele (Figura 116).

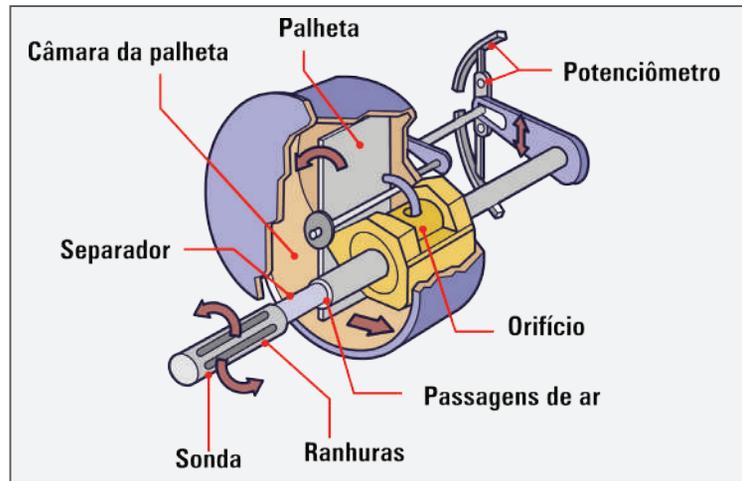


Figura 116 - Componentes internos do sensor AOA

Isso ocasiona a variação da resistência do circuito de ponte equilibrada e, por conseguinte, a sinalização do motor do indicador para movimentar o ponteiro proporcionalmente à mudança de ângulo de ataque da aeronave.

O sensor equipado com o defletor alfa apresenta funcionamento semelhante ao dotado de sonda. Isso porque o defletor também é conectado a um potenciômetro, de maneira que seu movimento faz com que a resistência do circuito varie e movimente o motor elétrico do indicador, apresentando a posição do AOA.

Em aeronaves modernas, os sensores de ângulo de ataque enviam sinais ao ADC. Lá, os dados são usados para criar uma indicação de AOA, normalmente no monitor primário de voo, em inglês, *primary flight display* (PFD). A informação também pode ser integrada com as posições dos flapes e dos *slats*, para melhor determinar o ponto de estol. Além disso, os sensores apresentados estão sujeitos a erro de posição, porque o fluxo de ar ao redor do defletor alfa e da sonda com ranhuras muda um pouco, de acordo com a velocidade do ar e da atitude da aeronave. Esses erros são pequenos, mas corrigíveis no ADC.

Para incorporar um aviso de estol iminente, muitos sistemas AOA utilizam um motor vibrador, que, literalmente, sacode a coluna de controle do avião (*manche*) para avisar ao piloto que a aeronave se aproxima de uma condição de estol. Interruptores elétricos são acionados no indicador AOA para ativar o motor, que movimenta um anel com peso desbalanceado, causando a vibração da coluna de controle do piloto. Alguns sistemas incluem um mecanismo impulsor do *manche* que o empurra para frente, baixando o nariz da aeronave quando um AOA crítico se aproxima.



Slat: aerofólio auxiliar arqueado, posicionado no bordo de ataque do aerofólio principal, de forma a criar uma fenda.

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que a presença de instrumentos de leitura direta na cabine é indesejável, por representar maior risco de incêndio e mais peso para a aeronave. Com efeito, a circulação de tubos com combustível pela cabine significa um grande potencial de incêndio, o que deve ser evitado. Diante desse fato, foram criados sistemas de sensoriamento remoto que permitem a utilização de instrumentos de leitura indireta. Tal mecanismo emprega uma unidade de sensoriamento remoto e outra indicadora que fica na cabine, ligados por fios. Entre eles pode ter uma unidade conversora de sinal e ser elétrico ou digital. Dessa forma, a cabine não recebe o elemento a ser medido, pois a transmissão do sinal é realizada por meio de fiação ou barramento.

Estudou-se que os sistemas de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã elétrico, de corrente contínua de sincronismo de dados e de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã permanente são os mais comuns de indicação remota e que há configurações mistas deles para melhor atender a determinadas características da aeronave.

Foram abordados os sistemas de indicação remota, suas características, seus componentes e seus princípios de funcionamento. Da mesma forma em que foi visto o funcionamento desses sistemas nos manômetros de leitura indireta de óleo e de combustível.

Também foram explicadas as características gerais dos indicadores de movimento, tais como tacômetros, sincrocópios, acelerômetros e indicadores de ângulo de ataque (AOA). Destacou-se que os tacômetros são empregados para indicar a velocidade de eixos em RPM ou porcentagem, que os sincrocópios apontam se dois ou mais dispositivos rotativos estão sincronizados, que os acelerômetros medem as cargas de aceleração a que é submetida a aeronave e que os indicadores de AOA informam a atitude da aeronave em relação à posição de estol e alertam ao piloto quando o ângulo de ataque está próximo a essa posição.

Capítulo 4

Instrumentos de medição de temperatura

A temperatura de certos componentes de aeronaves é um ótimo indicador de seu funcionamento. Por essa razão, existem vários tipos de termômetros em uma cabine de comando. As temperaturas do óleo, da entrada de ar e da cabeça do cilindro do motor, além da temperatura de mistura no carburador, do ar exterior, dos dutos de aquecimento e dos gases de escapamento dos motores a turbina são alguns exemplos de informações importantes para o piloto verificar o correto funcionamento do motor e de outros sistemas. Para se obter essas informações, são usados diferentes tipos de termômetros, que empregam distintos meios para mensurar a temperatura.

A construção desses instrumentos se baseia nas propriedades físicas de certos materiais que variam alguma de suas propriedades, de maneira proporcional à variação de temperatura a que estão expostos. Assim sendo, existem dois tipos de termômetros, os que usam e os que não usam energia elétrica em sua operação.

4.1 Termômetros não elétricos

É muito fácil encontrar um termômetro de mercúrio ou de álcool, seja para indicar a temperatura ambiente, seja para uso clínico. Esses são exemplos típicos de termômetros não elétricos. O funcionamento deles se baseia na característica do mercúrio e do álcool em se expandir com o aumento da temperatura e em se retrair quando ela diminui. Nesses termômetros, uma quantidade de líquido é colocada em um reservatório ligado a uma passagem estreita, chamada de capilar. Quando a temperatura desse líquido aumenta, ele se expande pela passagem estreita, que é graduada em uma escala associada a essa expansão. Os termômetros de mercúrio e de álcool não são utilizados na aviação, mas são ótimos exemplos para entender o princípio básico de funcionamento dos demais indicadores de temperatura.

As características físicas da maioria dos materiais mudam quando expostas às alterações de temperatura. As modificações são consistentes, tais como expansão e contração dos sólidos, líquidos e gases. O coeficiente de expansão de diferentes materiais varia e é exclusivo de cada material.

Um tipo de termômetro muito empregado na aviação apresenta funcionamento simples e didático para explicar o aproveitamento das propriedades físicas de certos materiais para a indicação de temperatura. O termômetro bimetálico é muito útil na aviação. Ele se baseia no comportamento consistente de dois metais diferentes, que apresentam atitudes de dilatação distintas quando submetidos à mesma temperatura.

Esses dois materiais são instalados justapostos (colados um ao outro), formando um único componente bimetálico, utilizado como sensor. Tendo em vista que cada metal se expande e se

contrai segundo diferentes taxas de dilatação, à medida que a temperatura muda, um deles se dilata mais rapidamente que o outro. Ocorre que ambos estão ligados entre si, desse modo, o sensor bimetálico tende a se mover no sentido de enrolar ou desenrolar. Isso acontece porque o metal que se dilata mais está preso ao que se dilata menos. Destarte, ele é puxado pelo metal que se dilata menos e não consegue se expandir em linha reta. A Figura 117 ilustra esse movimento.

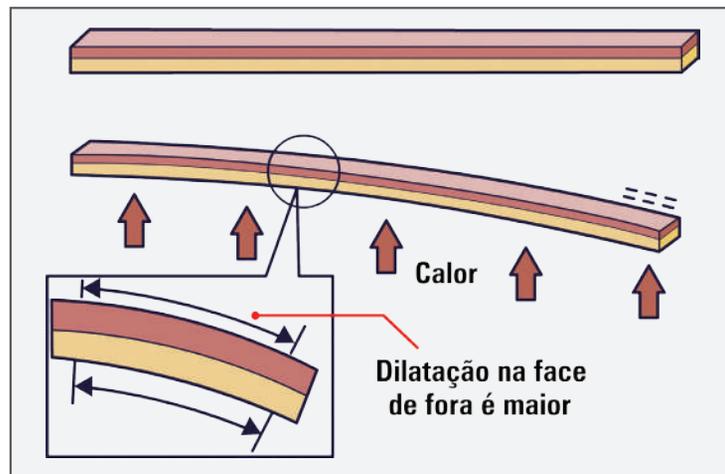


Figura 117 - Comportamento do sensor bimetálico ao ser aquecido

Nesse termômetro, uma extremidade da tira é fixa, enquanto a outra é bobinada (Figura 118). Um ponteiro é fixado na extremidade bobinada, que é presa na caixa do instrumento. Quando o sensor bimetálico é aquecido, os dois metais se expandem e a extremidade bobinada tenta se enrolar, porque um metal se expande mais rápido do que o outro. Esse movimento do par bimetálico é transmitido ao ponteiro no mostrador do instrumento. Quando a temperatura diminui, os metais se contraem em taxas diferentes, o que tende a desenrolar a bobina e mover o ponteiro para a direção oposta. Como se vê, trata-se de instrumento de leitura direta.

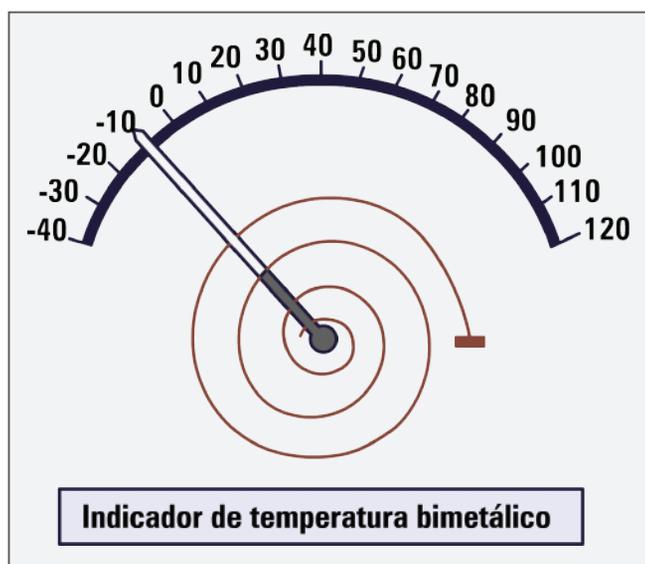


Figura 118 - Par bimetálico em formato de bobina no termômetro bimetálico

Esses medidores de temperatura são empregados em aeronaves leves para medir a temperatura do ar livre ou do ar externo da aeronave, em inglês, *outside air temperature* (OAT). Nesta aplicação, uma sonda de coleta (Figura 119) se projeta através do para-brisa da aeronave para ficar exposta ao ar atmosférico. A extremidade bobinada do sensor bimetálico fica localizada na cabeça do instrumento, na área interna do para-brisa, onde a leitura pode ser feita pelo piloto (Figura 120).

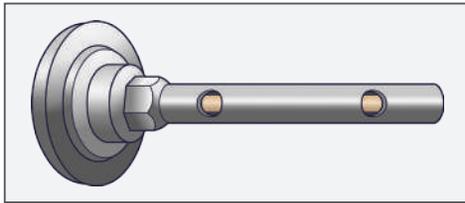


Figura 119 - Sonda de coleta do termômetro de temperatura externa

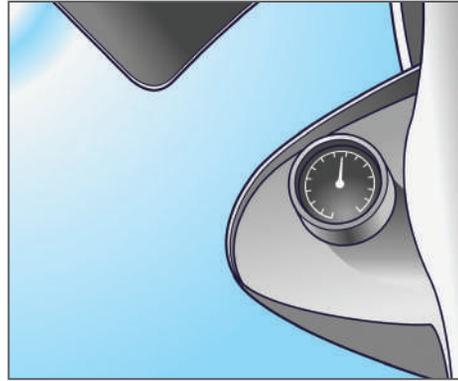


Figura 120 - Termômetro de temperatura externa

Este é outro exemplo de termômetro não elétrico que usa as características do tubo de Bourdon como base para a sua operação. Tal mecanismo é empregado para medir pressões, aproveitando a propriedade elástica de certos tubos metálicos para mensurar a pressão de fluidos em seu interior. A base de operação do termômetro está na expansão consistente do vapor produzido por um líquido volátil em uma área fechada. Essa pressão do vapor varia diretamente com a temperatura. Dessa forma, o termômetro usa um tubo sensor cheio de líquido volátil, conectado a um tubo de Bourdon (Figura 121). Assim, à medida que a pressão do vapor aumenta, o tubo de Bourdon se expande, movimentando o ponteiro, o qual indica a nova temperatura na escala do mostrador calibrada em graus Celsius ou Fahrenheit. O processo inverso se verifica quando a pressão do vapor diminui.

Em algumas aeronaves, esse tipo de termômetro é empregado para medir a temperatura do óleo. Ele é um instrumento de leitura direta, cujo tubo de sensoriamento é colocado na área em que se precisa obter a medida da temperatura. Desse modo, um longo tubo capilar conecta o bulbo ou tubo de Bourdon à caixa do instrumento. O diâmetro estreito do tubo capilar assegura que o líquido volátil seja leve e fique no bulbo de sensoriamento.

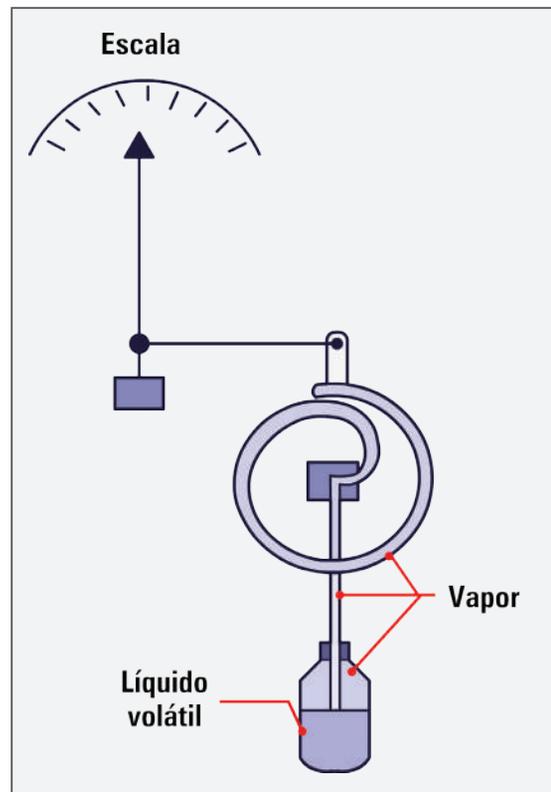


Figura 121 - Termômetro equipado com tubo de Bourdon

4.2 Termômetros elétricos

O uso de eletricidade na medição de temperatura é muito comum na aviação. Há diversos modelos com soluções elétricas diferentes. A seguir, serão apresentados alguns sistemas de indicação e de medição encontrados em muitos tipos de aeronaves. Certas faixas de temperatura são medidas de forma mais adequada por um ou por outro tipo de sistema.

4.2.1 Termômetros de resistência elétrica

O princípio de funcionamento dos termômetros de resistência elétrica se baseia na característica de certos materiais em mudar consistentemente o valor de sua resistência à medida que varia a sua temperatura, sendo esse critério válido para a maioria dos metais. Precisamente, a resistência elétrica de um metal aumenta, conforme a temperatura sobe. Várias ligas metálicas são apropriadas para serem empregadas como sensores nesse tipo de termômetro, em virtude de apresentarem alto coeficiente de resistência de temperatura, o que significa que sua resistência altera significativamente com a variação da temperatura. Para o sensoriamento, o resistor de metal é submetido ao fluido ou à área na qual a temperatura precisa ser medida.

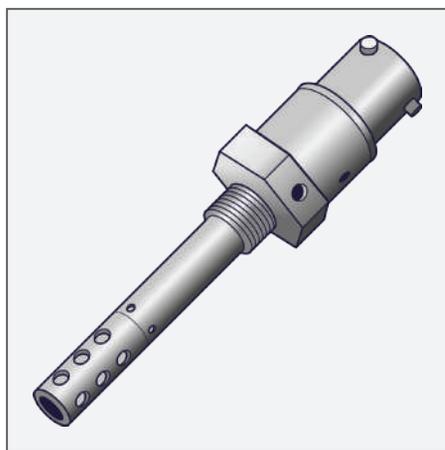


Figura 122 - Bulbo sensor do termômetro de resistência elétrica

O resistor sensível ao calor é fabricado para que tenha uma resistência precisa para cada valor de temperatura dentro da sua faixa de trabalho. O elemento desse resistor é um fio longo ou em formato espiral. Normalmente, são fabricados de níquel/magnésio, ou outra liga apropriada, em um material de isolamento. O resistor é protegido por um tubo de metal fechado ligado a um plugue de cabeça hexagonal com rosca (Figura 122). As duas extremidades do enrolamento são soldadas a um receptáculo elétrico, projetado para receber os pinos do plugue conector.

Basicamente, o termômetro de resistência elétrica é constituído pelos seguintes componentes principais: indicador, elemento sensível à temperatura (bulbo), fios de conexão e conectores. Ele é conectado por fios a um dispositivo de medição de resistência dentro do indicador na cabine. O mostrador do instrumento é calibrado em graus Celsius ou Fahrenheit.

Esse termômetro é indicado para medir temperaturas baixas e médias, de 70 °C negativos a 150 °C, sendo amplamente utilizado em muitos tipos de aeronaves para medir a temperatura do ar do carburador, do óleo, do ar livre e de outras áreas. Pelo fato de ser um instrumento de leitura direta, ele é equipado com mecanismo que compensa a influência da temperatura da cabine na indicação do mostrador.

Para medir a variação de resistência do metal usado como sensor, o indicador do instrumento é equipado com um circuito medidor de resistência, que consiste, em alguns casos, em uma forma modificada do circuito de ponte de Wheatstone. Esse medidor funciona com base no

princípio do equilíbrio do circuito, a partir de um resistor variável e de outras resistências conhecidas. O circuito formado por resistências conhecidas recebe um resistor variável, que é o bulbo sensor do termômetro. O circuito busca o equilíbrio toda vez que o valor da resistência do bulbo muda.

A variação de resistência do bulbo faz com que haja uma variação de corrente no circuito, proporcional e consistente com a mudança de temperatura. Essa corrente é utilizada como referência para gerar indicações no mostrador do instrumento. Uma forma simplificada do circuito da ponte de Wheatstone é apresentada na Figura 123.

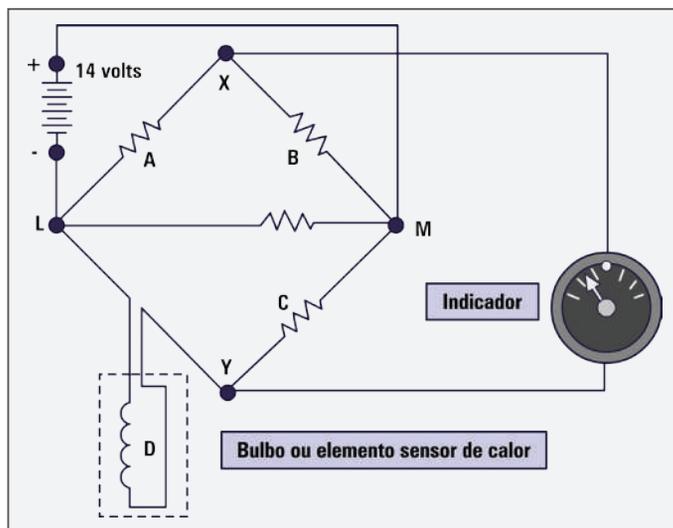


Figura 123 - Esquema simplificado da ponte de Wheatstone

Conforme a Figura 123, há três resistências com valores iguais, conectadas em um circuito com formato de losango (A, B e C). Ademais, verifica-se nela que o resistor variável faz parte do circuito, ele é a resistência do bulbo de temperatura (D), e que um galvanômetro é ligado no circuito nos pontos (X) e (Y). O funcionamento do circuito ocorre da seguinte maneira:

- inicialmente, o galvanômetro funciona como um indicador, pois é ele quem monitora a corrente no circuito;
- quando a temperatura faz com que a resistência do bulbo se iguale às outras resistências do circuito, não existe diferença de potencial entre os pontos (X) e (Y). Assim, a corrente não circula pelo galvanômetro do circuito. Porém, se a temperatura do bulbo varia, sua resistência muda, e a ponte fica desequilibrada, em consequência, a corrente circula através do galvanômetro em uma direção ou em outra;
- por fim, o ponteiro do galvanômetro se move no mostrador, calibrado em graus, indicando a temperatura.

Muitos indicadores são equipados com um parafuso de ajuste zero na face do instrumento. Ele ajusta a tensão da mola para zerar o ponteiro, quando a ponte está em equilíbrio. Uma inconveniente deficiência dos termômetros que utilizam a ponte de Wheatstone consiste na **flutuação** da linha de voltagem, que provoca erros na leitura do indicador.



Flutuação: oscilação, balanço ou variação.

Há outro tipo de termômetro mais estável e preciso que o instrumento apresentado. Ele também usa a resistência elétrica como base de funcionamento, porém não sofre interferências por flutuação de tensão, é o radiômetro, que se baseia na razão do fluxo de corrente no circuito. Esse tipo de termômetro é empregado em muitos tipos de aeronaves para medir a temperatura do óleo dos motores, do ar externo da aeronave, do ar do carburador, entre outras aplicações. Eles são usados, principalmente, quando a exatidão da indicação é uma necessidade.

O radiômetro funciona deste modo:

- a parte de sensoriamento é idêntica ao do termômetro com ponte de Wheatstone. Consiste em um bulbo de metal, cuja resistência varia conforme a temperatura;
- o circuito dispõe de uma resistência variável (Figura 124) e de uma fixa para fornecer a indicação da temperatura, além de dois ramais para o fluxo de corrente;
- cada ramal conta com uma bobina montada em cada lado do conjunto do ponteiro. Por sua vez, este fica localizado dentro de um campo magnético de um grande ímã permanente;
- conforme a corrente no circuito varia, ela passa através das bobinas causando a formação de diferentes campos magnéticos, os quais reagem com o campo magnético maior do ímã permanente. Essa interação de campos magnéticos movimenta o ponteiro no mostrador, sobre uma escala calibrada em graus Celsius ou Fahrenheit, indicando a temperatura.

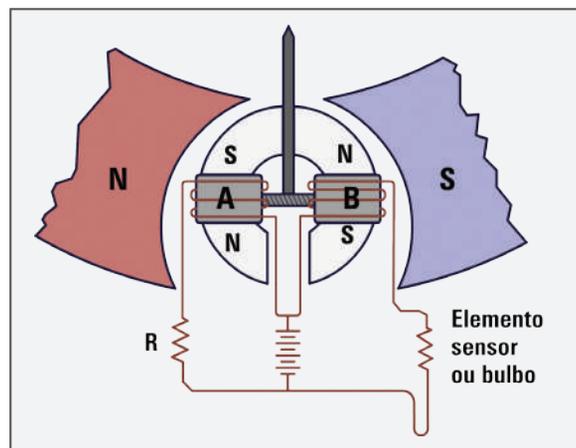


Figura 124 - Esquema de funcionamento do termômetro do tipo radiômetro

A configuração do circuito é feita de maneira a permitir o equilíbrio constante entre os campos magnéticos formados pelas bobinas e pelo ímã permanente. Conforme a resistência do bulbo varia, a corrente do circuito é modificada, ocasionando a alteração dos campos magnéticos das bobinas e realização de um novo equilíbrio entre eles. Essas variações são transmitidas ao ponteiro do mostrador, indicando a temperatura.

O equilíbrio nos campos magnéticos ocorre porque, como se observa na Figura 124, as extremidades do polo magnético do ímã permanente ficam mais próximas do topo do que do fundo do compartimento do instrumento. Isso faz com que as linhas de campo magnético do fluxo entre os polos sejam mais concentradas no topo. À medida que as duas bobinas

produzem seus campos magnéticos, o campo mais forte gerado por uma bobina interage, movendo-se de forma articulada para baixo, em direção à parte mais fraca e menos concentrada do campo magnético permanente, enquanto o campo magnético mais fraco, produzido pela outra bobina, se movimenta para cima, em direção ao campo de fluxo mais concentrado do ímã grande. Isso proporciona um efeito de equilíbrio entre os campos magnéticos, que se modifica, mas permanece em equilíbrio, à proporção que as forças do campo da bobina variam com a temperatura e a corrente resultante flui entre as bobinas.

A título de exemplo, com base, ainda, na Figura 124, se a resistência de um bulbo de temperatura for igual ao valor da resistência fixa (**R**), correntes de valores iguais fluem entre as bobinas. As forças causadas pelos campos magnéticos criados em cada bobina são iguais e cancelam qualquer movimento no campo magnético maior. Nesse cenário, o ponteiro indicador estará na posição vertical. Se a temperatura do bulbo aumentar, sua resistência também aumenta. Isso faz com que a corrente que flui através do ramo do circuito da bobina (**A**) aumente, criando um campo magnético mais forte do que o da bobina (**B**). Como consequência, a força do campo magnético na primeira bobina aumenta e é puxada para baixo, em direção à parte mais fraca do campo magnético grande. Ao mesmo tempo, em que menos corrente passa através do resistor do bulbo do sensor e da bobina (**B**), ocasionando a formação de um campo magnético mais fraco, que é puxado para cima, local em que o fluxo do campo magnético do ímã permanente é mais forte. O ponteiro é deslocado para o lado esquerdo, e ele para de rodar quando o campo atinge um novo ponto de equilíbrio, diretamente relacionado à resistência no bulbo de sensoriamento. O oposto dessa ação acontece quando a temperatura do bulbo diminui.

4.2.2 Termômetros bimetálicos (termopar)

Diferentemente dos termômetros bimetálicos, que não usam energia elétrica, o termopar dispõe de um circuito elétrico formado por dois metais diferentes. Ele se baseia na diferença de tensão verificada entre dois pontos distintos dos condutores metálicos, sendo um deles considerado o ponto quente, onde se deseja mensurar a temperatura, e o outro lado, o ponto frio, onde fica o indicador. A Figura 125 ilustra de forma sintética o circuito do termopar.

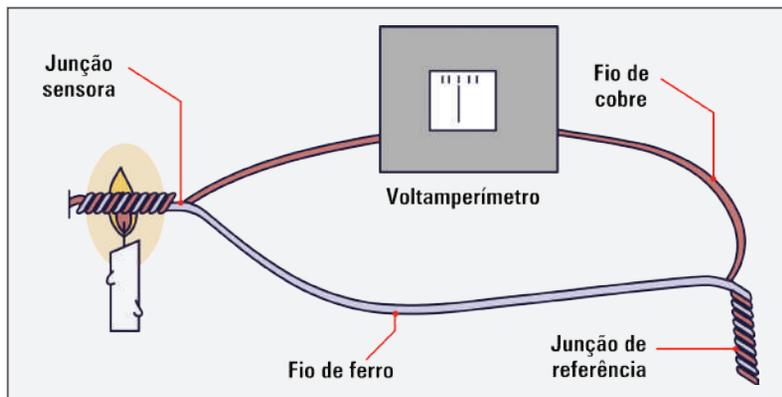


Figura 125 - Circuito simplificado do termopar

Nesse termômetro, os metais se tocam em duas junções separadas. Se uma das junções está aquecida a uma temperatura mais alta do que a outra, uma força eletromotriz é produzida no circuito. Essa voltagem é diretamente proporcional à temperatura experimentada. Assim, medindo-se a quantidade da força eletromotriz, é possível determinar a temperatura. Um voltímetro é colocado através da junção mais fria do termopar. Ele é calibrado em graus Celsius ou Fahrenheit. Quanto mais quente ficar a junção (junção quente) maior será a força eletromotriz produzida, e maior será a indicação de temperatura.

Os termopares são fabricados em diversos materiais, dependendo da temperatura máxima a que serão expostos. São comuns instrumentos para medição da temperatura da cabeça do cilindro, com sensores fabricados em ferro e constantã (liga de cobre e níquel) ou cobre e constantã. Para a medição dos gases de escapamento de turbina, são comuns os de cromel (liga com 90% de níquel e 10% de cromo) e alumel (liga à base de níquel).

A Figura 126 destaca o circuito formado pelos dois condutores do termopar, desde o ponto quente até o instrumento, no qual está localizado o voltímetro, no ponto frio.

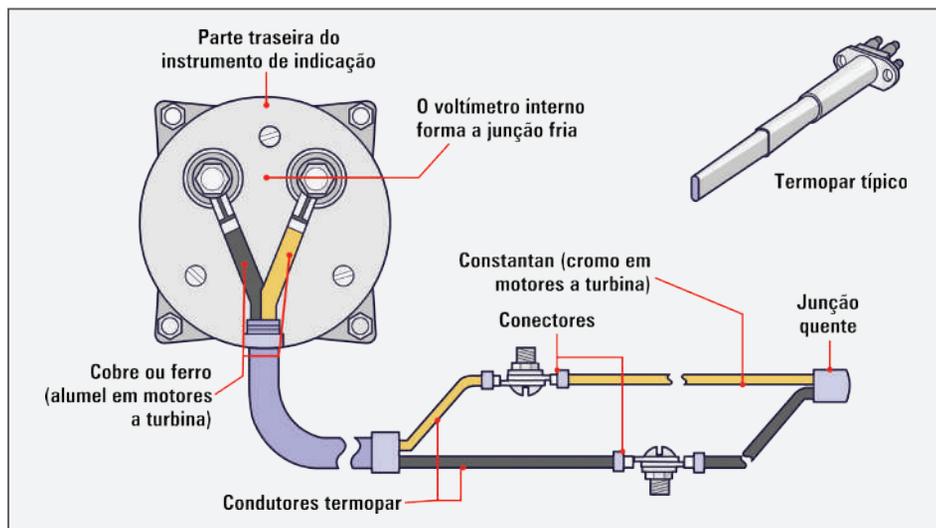


Figura 126 - Ligação dos termopares

O termopar é indicado para medir altas temperaturas, tais como a da cabeça do cilindro, em inglês, *cylinder head temperature* (CHT), em motores alternativos, e a dos gases de escapamento, em inglês, *exhaust gas temperature* (EGT), nos motores a turbina.

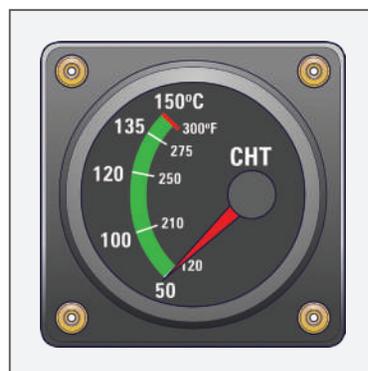


Figura 127 - Indicador analógico de CHT

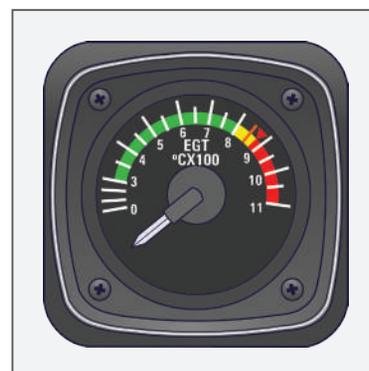


Figura 128 - Indicador analógico de EGT

Em razão de a junção quente do termopar ser instalada no local do sensoriamento da temperatura, há uma variedade de formatos dessa junção para melhor se adequar ao local da aplicação. Dois tipos comuns são os formatos de gaxeta e de baioneta. No primeiro, os anéis de metais diferentes são prensados e unidos em forma de uma gaxeta (Figura 129) que pode ser instalada sob uma vela de ignição ou em um cilindro (Figura 130), embaixo de uma porca.

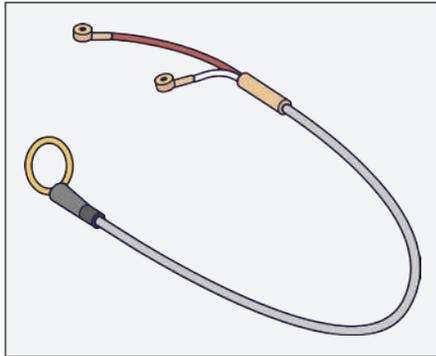


Figura 129 - Junção quente tipo gaxeta

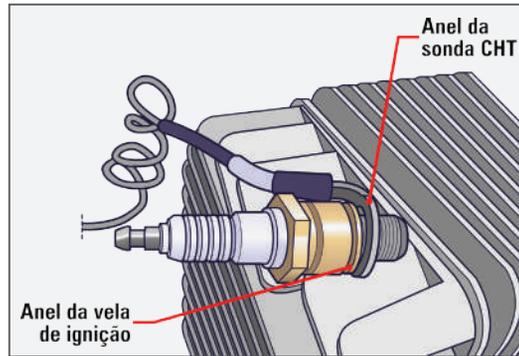


Figura 130 - Junção quente tipo gaxeta, instalada no cilindro do motor

No segundo, os metais são alojados juntos, dentro de um estojo protetor perfurado. Os termopares tipo baioneta (Figura 131) se encaixam em um furo, como se verifica no termopar usado na cabeça de cilindros em motores alternativos (Figura 132). Em motores a turbina, eles são encontrados montados na entrada ou na saída da turbina e se estendem pelo duto de fluxo dos gases de escapamento. Salienta-se que, para a indicação da temperatura da cabeça do cilindro, o termopar é instalado naquele que trabalha mais quente, na maioria das condições de operação. A localização desse cilindro varia conforme o motor.

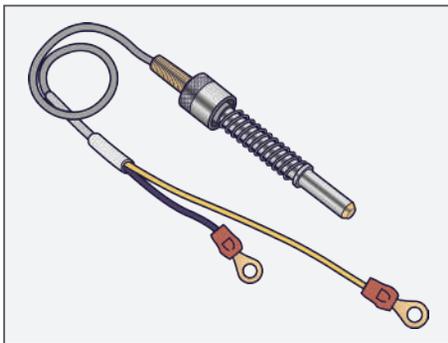


Figura 131 - Junção quente do tipo baioneta

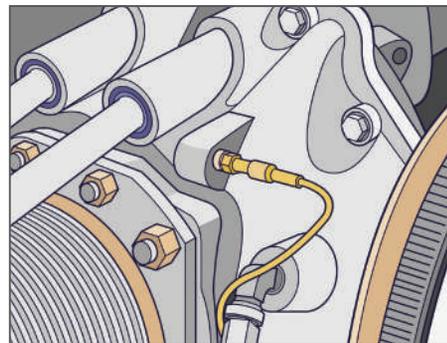


Figura 132 - Junção quente do tipo baioneta, instalada no cilindro do motor

Um dado a se destacar é o de que a voltagem produzida por metais diferentes, quando aquecidos, é medida em milivolts. Logo, é um circuito sensível. Assim, os termopares são projetados para fornecerem uma quantidade específica de resistência muito pequena em um circuito. Dessa forma, é preciso ter cuidado para que o tipo de material, o comprimento e o tamanho da sessão transversal do circuito não sejam alterados durante as atividades de manutenção, sem a devida compensação da mudança da resistência total que resultaria com a alteração. Cada termopar que faz uma conexão no voltímetro deve ser inteiramente de um mesmo material. Por exemplo, é necessário que um fio de cobre seja conectado a uma porção

de cobre em uma junção quente e um fio de constantã, a uma parte de constantã. Não se podem fazer emendas com materiais diferentes.

Tendo em vista que a junção fria do termopar fica dentro da caixa de instrumentos na cabine de comando, a indicação da temperatura é influenciada pela temperatura ambiente da cabine. Para que isso não ocorra, o sistema é equipado com um mecanismo para realizar a compensação dessa temperatura. O dispositivo é uma mola bimetálica conectada ao mecanismo indicador, ela funciona da mesma forma que o termômetro bimetálico descrito anteriormente. Quando os termopares estão desconectados do indicador, a temperatura na área da cabine é indicada no instrumento.

a) Sistema de indicação da temperatura da turbina

A indicação da temperatura dos gases de escapamento da turbina fornece uma orientação importante para se saber a condição de funcionamento do motor. Essa informação é conhecida como *exhaust gas turbine* (EGT). Em certos motores, a temperatura desses gases é medida na entrada da unidade da turbina. Nesse caso, tem-se o sistema de indicação da temperatura na entrada da turbina, em inglês, *turbine inlet temperature* (TIT). O sensoriamento é realizado por diversos sensores localizados ao redor do duto de passagem dos gases de escapamento (Figura 133). Eles são espaçados em intervalos regulares ao redor do perímetro da carcaça da turbina do motor ou duto de escapamento.

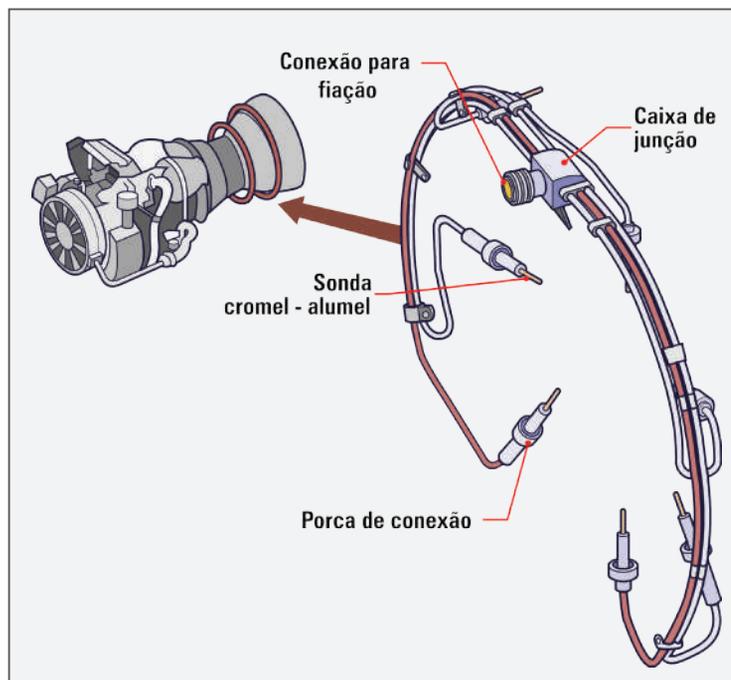


Figura 133 - Termopares utilizados para a indicação da temperatura dos gases da turbina

A variação de temperatura provoca voltagens muito pequenas, as quais precisam ser amplificadas para energizar um servomotor que movimentará o ponteiro do indicador. O indicador EGT é uma unidade lacrada hermeticamente. A escala do instrumento varia

de 0 °C a 1.200 °C (Figura 134), podendo ter uma escala vernier no canto superior direito e uma bandeira de advertência de alimentação desligada, localizada na porção inferior do mostrador.

O sistema de indicação TIT desempenha a mesma função do EGT, porém opera em local diferente. Ele monitora a temperatura do ar na região localizada entre as turbinas do compressor e a de potência. Para tanto, emprega termopares duais, com duas junções eletricamente independentes, dentro de uma única sonda. O sensoramento da temperatura é realizado por meio de um conjunto de termopares de cromel e alumel, ligados em paralelo a duas barras de interligação (Figura 135).



Figura 134 - Indicador de EGT analógico

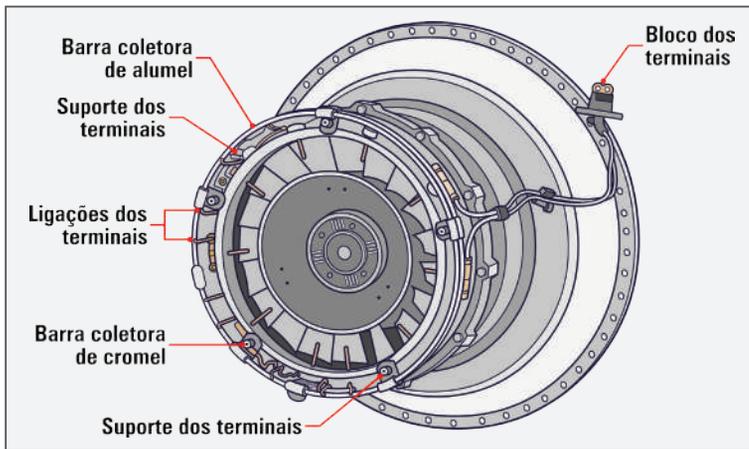


Figura 135 - Termopares usados para a indicação da temperatura entre turbinas

Na Figura 136, é apresentado o circuito elétrico dos termopares até o instrumento. São destacadas a ligação em paralelo dos termopares e a presença de uma bandeira de advertência de desligado na face do instrumento.

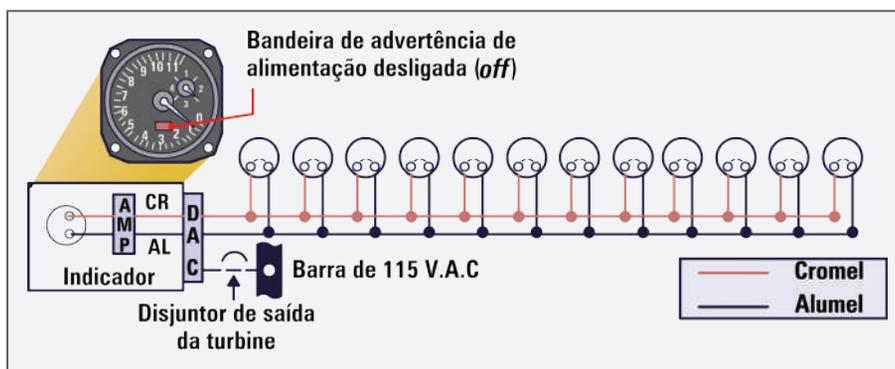


Figura 136 - Ligação em paralelo dos termopares

Os sinais recebidos dos sensores são medidos, e a média dos valores é transmitida ao indicador na cabine. O sistema é composto de dois conjuntos de termopares, eletricamente independentes. Enquanto um é instalado para transmitir os sinais ao indicador na cabine, o outro fornece sinais de temperatura para monitorar o motor e controlar os sistemas. Essa redundância confere mais confiabilidade ao sistema.



Comutador: dispositivo que muda o sentido da corrente elétrica de um circuito, em motor elétrico ou gerador, permitindo a inversão do sentido da força que move a espira e promove a rotação.

Chopper: o conversor *chopper* é utilizado para obter uma tensão DC variável, a partir de uma fonte DC constante.

Em seguida, na Figura 137, é mostrado o circuito de indicação de temperatura TIT. Nela, é perceptível que o indicador do instrumento se compõe de um circuito ponte, um circuito *comutador (chopper)*, um motor bifásico para movimentar o ponteiro e um potenciômetro de realimentação. O dispositivo é, ainda, equipado com um circuito de referência de voltagem, um amplificador, uma bandeira de potência desligada, uma fonte de alimentação e uma luz de advertência de sobretemperatura.

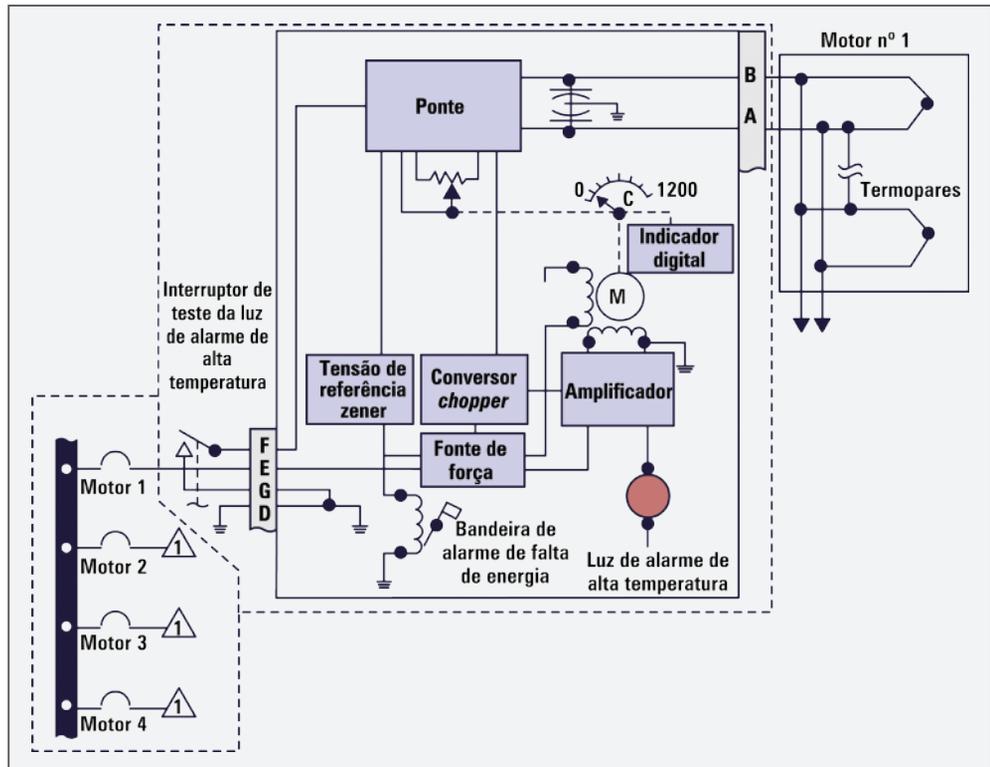


Figura 137 - Esquema do indicador de TIT de uma aeronave quadrimotora

O indicador funciona da seguinte maneira:

- o sinal vindo dos termopares de sensoriamento é aumentado pelo amplificador;
- o sinal, após esse processo, energiza o campo variável do motor bifásico, que posiciona o ponteiro principal do indicador ou o indicador digital;
- o circuito de referência de voltagem proporciona uma tensão de referência bem regulada na ponte do circuito, para eliminar erro de variação de voltagem na entrada da fonte de alimentação do indicador.

Caso o indicador atinja um limite de segurança determinado, a luz de advertência de sobretemperatura acende. O funcionamento dessas luzes é verificado por meio de um interruptor de teste. Esse teste checa as luzes de todos os motores de uma só vez. Quando o interruptor de testes é acionado, um sinal de sobretemperatura é simulado em cada circuito de ponte de controle do indicador, ocasionando o acendimento das luzes.

Nas aeronaves equipadas com instrumentação digital, os valores de tensão e de resistência dos sensores são transmitidos aos computadores apropriados, nos quais são ajustados, processados, monitorados e exibidos nos painéis da cabine. Eles também são enviados

para outros computadores que precisam de informações de temperatura para controlar e monitorar os diversos sistemas integrados. Como se percebe, nesse caso, não é necessário o mecanismo indicador do tipo resistência, pois os sinais são processados e compensados no computador, chegando pronto ao indicador.

b) Medição da temperatura do ar total

Os dados sobre a temperatura externa da aeronave são muito importantes para o piloto e para os computadores que gerenciam o voo, pois, a partir disso, outras informações de controle e de monitoramento de desempenho são corrigidas, compensando-se as variações externas. O processo de obtenção dessas informações não é fácil, em virtude dos efeitos provocados pela mudança de altitude e pelo regime de voo da aeronave, principalmente em velocidades elevadas.

Durante o voo, a temperatura estática do ar muda constantemente, o que demanda a tarefa nada fácil do aferimento de seu valor. A medição da temperatura é relativamente fácil quando a velocidade da aeronave está abaixo de $0,2 \text{ Mach}$. Para tanto, um medidor simples do tipo resistência ou bimetálico é suficiente para fornecer informações relativamente precisas. Entretanto, nas velocidades acima daquele valor, o processo se torna mais complexo em função da fricção, da compressibilidade do ar e do comportamento das camadas limites.

O conceito de temperatura do ar total, em inglês, *total air temperature* (TAT), considera o acréscimo que se verifica na temperatura do ar estático provocado pelo movimento de alta velocidade da aeronave no ar. Esse acréscimo é conhecido como aumento dinâmico. As sondas sensíveis TAT são projetadas para capturar de forma precisa tal valor e transmitir os sinais para a cabine, bem como para os sistemas dos motores e das células da aeronave.

Os circuitos mais simples são integrados por um sensor (Figuras 138 e 139) e por um indicador equipado com um circuito de equilíbrio de resistência interna. O sensor consiste em um dispositivo instalado na parte externa da aeronave, pelo qual atravessa o fluxo de ar do vento relativo. Em seu interior, há um dispositivo de resistência fabricado em liga de platina, o qual recebe o impacto do ar. O valor da resistência varia conforme o fluxo de ar que se choca com o resistor. Quando colocado na ponte do circuito, o ponteiro do indicador se movimenta em resposta ao desequilíbrio causado pelo resistor variável.

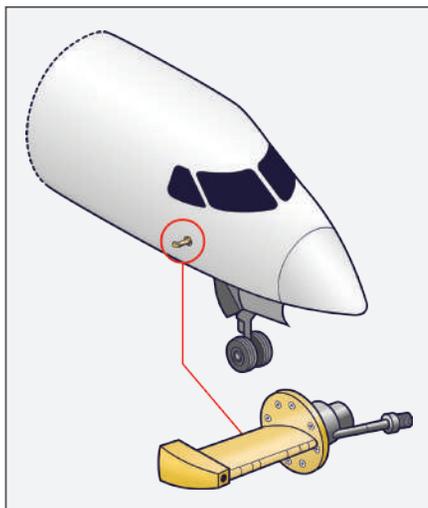


Figura 138 - Localização do sensor de TAT

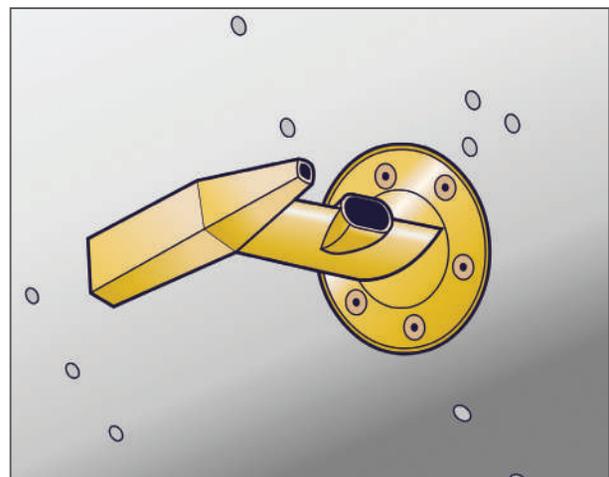


Figura 139 - Sensor de TAT

Em aeronaves mais modernas, equipadas com sistemas totalmente digitais, a correção dos sinais é realizada pelo ADC, que os processa para exibição no painel da cabine ou para a utilização de sistema que requeira a informação de tal temperatura. Em outros casos, mesmo sem o emprego do ADC, a tecnologia de correção e amplificação de sinais é usada para refinar o sinal antes de enviá-lo ao servomotor para ajustar o indicador na cabine. Essas configurações são equipadas com sistemas de alimentação rigorosamente calculado e de monitoramento de falhas. Eles, com frequência, usam leitura do tipo tambor numérico (Figura 140), mas podem utilizar mostradores de LCD (Figura 141). Muitos mostradores de LCD são multifuncionais, capazes de mostrar a pressão estática do ar e a velocidade.

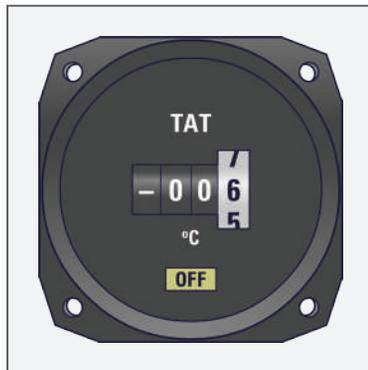


Figura 140 - Indicador analógico de TAT

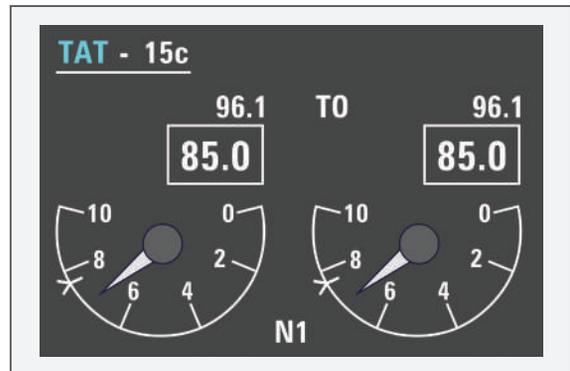


Figura 141 - Indicação digital de TAT

Em face de sua localização na parte externa da aeronave e de seu formato, o dispositivo de sensoriamento da temperatura do ar total está sujeito à formação de gelo, quando exposto a condições propícias para tal. Logo, há a necessidade de se instalar um elemento de aquecimento na estrutura do sensor. Ocorre que o aquecimento da região afeta a indicação da temperatura externa. Portanto, o projeto desse sensor deve ser bem executado para não permitir essa interferência.

Resumindo

A temperatura é um fator relevante no monitoramento e controle de vários fenômenos que ocorrem durante a operação de uma aeronave. Saber a temperatura do ar de admissão do motor, do óleo, do combustível e da cabeça do cilindro é importante para a tripulação estar consciente quanto à situação desses equipamentos durante o voo. Esses são apenas alguns dos vários empregos de indicadores de temperatura no sistema de instrumentos de aeronaves.

Foram explicados tipos de termômetros elétricos, os quais usam as propriedades de certos metais em variar a resistência ou de se dilatar de maneira consistente em relação à mudança de temperatura a que são submetidos. E, ainda assim, foram destacados os termômetros de resistência elétrica que se utilizam da ponte de Wheatstone, cujo princípio básico é o equilíbrio entre um resistor desconhecido e resistências conhecidas.

Foi estudado o funcionamento do radiômetro, dispositivo que se baseia na variação confiável do fluxo de corrente no circuito, dando origem a um termômetro mais estável e preciso relativo aos que utilizam a variação de tensão em uma ponte de Wheatstone.

Ademais, foi explicado o funcionamento dos termopares empregados, principalmente, para mensurar altas temperaturas, tais como a verificada na cabeça do pistão dos motores alternativos e dos gases de escapamento nos motores a turbina.

Em seguida, foram apresentados as principais características e o princípio de funcionamento dos indicadores da temperatura total, que é a temperatura do ar estático acrescentada por qualquer elevação de temperatura causada pelo movimento de alta velocidade da aeronave no ar.

Concluindo, foram vistos, neste capítulo, as principais características e o funcionamento dos termômetros mais usados nas aeronaves, os quais servem de base ao entendimento dos instrumentos que apresentam variações dos tipos apresentados.

Capítulo 5

Instrumentos de indicação direcional

Uma das informações mais importantes em um voo é a direção que se encontra a aeronave. Mantê-la na proa que se deseja é uma preocupação constante do piloto. Para tanto, há uma série de técnicas e instrumentos para auxiliá-lo na navegação, os quais permitem que ele saiba a posição, a direção e a atitude da aeronave, além de outras informações vitais ao voo. A indicação de direção é, pois, uma parte extremamente importante à navegação aérea. A seguir, são abordados alguns instrumentos de indicação de direção magnética.

5.1 Bússola magnética

Em razão de sua grande importância ao voo, é mandatório que todas as aeronaves certificadas disponham de algum tipo de indicador magnético. Essa determinação das autoridades que gerenciam a aviação reflete a importância dos indicadores de direção, ao ponto de exigir um indicador magnético, mesmo nas aeronaves modernas equipadas com sofisticados sistemas aviônicos. Nesse caso, é uma medida de segurança que visa à utilização desse equipamento em caso de falha total dos sistemas de navegação e de voo da aeronave. A bússola magnética é utilizada na navegação desde os primórdios da aeronavegabilidade. É um instrumento muito simples que opera com base no campo magnético da Terra.

O princípio de funcionamento de uma bússola está na característica de os ímãs permanentes se alinharem ao campo magnético da Terra. De fato, se um ímã permanente comum for instalado em um ambiente que o deixe livre para se movimentar, ele se alinha à direção do campo magnético do nosso planeta. Somado a esse fenômeno está o fato de o polo norte magnético ficar próximo ao norte geográfico da Terra (Figura 142). Dessa forma, a direção apontada pelo ímã para o norte magnético pode ser adotada como sendo a do norte geográfico, com a devida compensação. A diferença angular entre essas posições é chamada de declinação magnética (Figura 143).



Aeronave certificada: aeronave que possui certificação, ou homologação, este procedimento consiste na atividade de avaliar e atestar que determinado produto (aeronave ou seu componente) possui as características mínimas que asseguram seu uso seguro para o tipo de operação pretendida.

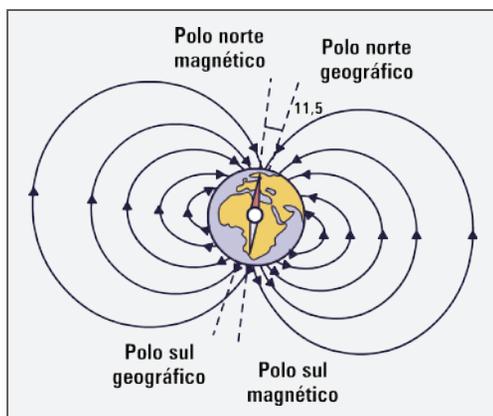


Figura 142 - Polos magnéticos e geográficos da Terra

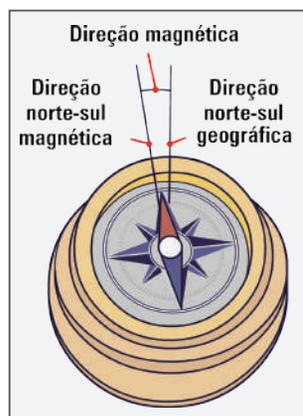


Figura 143 - Declinação magnética em uma bússola comum

Partindo desse princípio, a bússola é construída para que o piloto possa usá-la como referência de orientação direcional durante o voo. A construção da bússola leva em consideração que o ímã precisa se movimentar em um flutuador, fato que requer o emprego de mecanismos para reduzir a fricção e a vibração no ambiente de flutuação do ímã. Assim, o conjunto é montado em uma caixa lacrada, preenchida com um líquido parecido com querosene que amortece a vibração e a oscilação e diminui a fricção. O ímã permanente é posicionado em um flutuador, ficando livre para girar em um plano horizontal. Destarte, os ímãs se alinham ao campo magnético terrestre. A leitura das direções é feita por meio de um limbo de azimutes circular instalado ao redor do ponteiro de indicação. A escala é calibrada em divisões de 5°, do total de 360° do limbo.

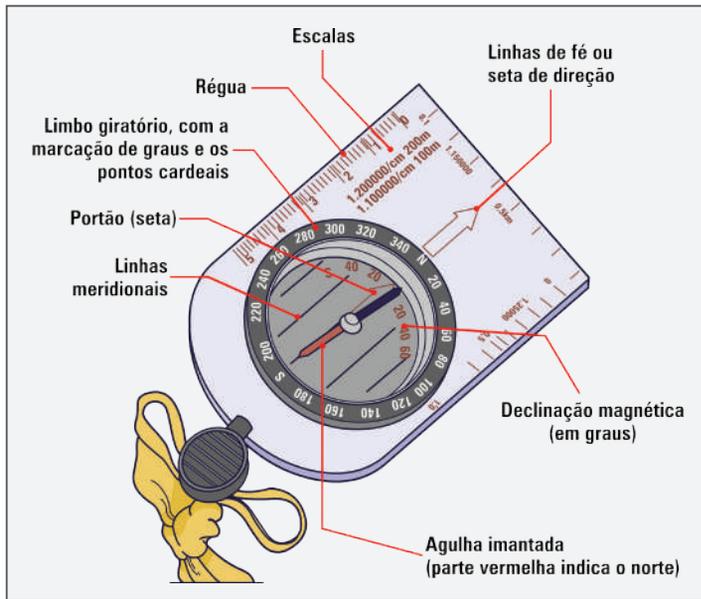


Figura 144 - Bússola magnética cartográfica

A Figura 144 apresenta uma bússola magnética cartográfica com os componentes e as nomenclaturas que facilitarão o entendimento das bússolas empregadas em aeronaves. Nela, é possível observar o limbo ao redor da agulha, a linha de fé, pela qual é realizada a leitura da direção, e o recipiente com líquido para flutuação da agulha.

A presença do líquido que preenche a bússola magnética apresenta alguns efeitos indesejáveis, quando submetido a mudanças de altitude e a variações de temperatura, pois o volume do líquido aumenta e diminui dentro da caixa do instrumento. Para compensar esses efeitos, um fole de diafragma se expande e se contrai com vistas a ajustar o volume do espaço interno da caixa, de maneira que este permaneça sempre cheio.

A Figura 145 apresenta o mecanismo interno de uma bússola magnética. Nela, observa-se o fole de expansão utilizado para compensar a variação de volume do líquido no interior do instrumento. Quando o volume do líquido diminui, o fole se expande. O inverso ocorre quando o volume do líquido aumenta. A Figura 145 também destaca a posição da linha de fé, do limbo, do flutuador e do líquido no interior da caixa do instrumento (área cinza).

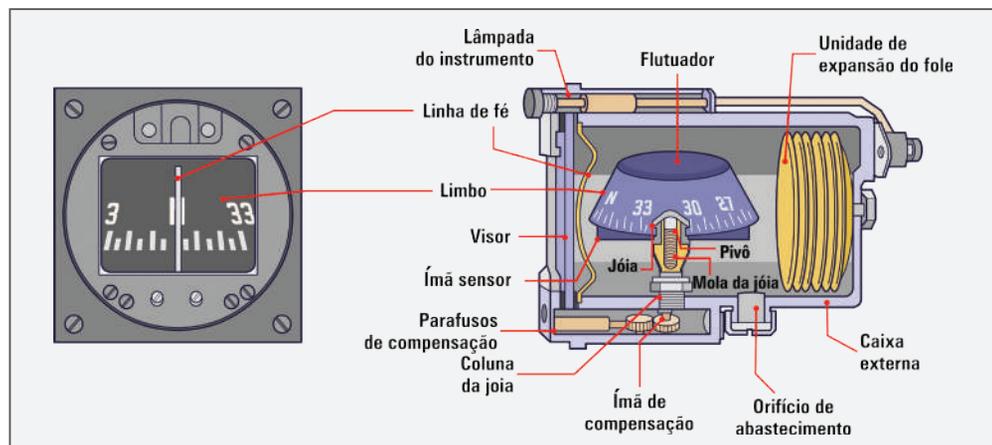


Figura 145 - Mecanismo de compensação da bússola magnética



Limbo: círculo dividido em unidades angulares; as bússolas podem apresentar o limbo graduado para determinação de azimutes ou de rumos.

Azimute: medida de abertura angular cujo valor em graus perfaz horizontalmente um círculo que vai do norte geográfico até a projeção de um alvo com o horizonte. Em navegação, é utilizada no sentido de direção.

A bússola magnética possui algumas limitações que requerem a atenção de seu operador. Um dos seus principais problemas é a possibilidade de interferência na sua indicação, em virtude de fontes de campos magnéticos próximas à bússola. Isso se deve ao fato de o ímã de uma bússola se alinhar não apenas ao campo magnético da Terra, mas, também, ao campo produzido por todas as fontes magnéticas ao redor dela, que podem ser influências magnéticas das estruturas metálicas, ou, principalmente, do sistema elétrico da aeronave. Essa deficiência, chamada de desvio magnético, altera a indicação do instrumento, reduzindo a sua confiabilidade.

Como se percebe, a localização da bússola na aeronave é um fator relevante, bem como a natureza dos materiais empregados na sua construção. O uso de parafusos não ferrosos, a instalação do instrumento longe de fontes de energia elétrica e a ação de torcer o fio que passa pela lâmpada de iluminação da bússola são cuidados básicos para manter o mínimo desvio possível.

Para corrigir o desvio magnético, são instalados dois parafusos de compensação no mecanismo interno da bússola, os quais, ao serem girados, movem pequenos ímãs permanentes, que corrigem a indicação. Eles posicionam pequenos ímãs para contrabalancearem as influências magnéticas locais que agem sobre o ímã da bússola. O desvio nunca deve exceder a 10°. Os parafusos de compensação estão localizados na face do instrumento e são identificados com as marcações N-S, de norte-sul (*north-south*), e E-W, de leste-oeste (*east-west*). A ação de corrigir o desvio magnético é chamada de compensação da bússola. É um procedimento periódico que não pode ser negligenciado.

Outro problema que afeta o funcionamento da bússola magnética tem relação com o fato de o norte magnético se concentrar em determinada porção do globo. Com isso, há alguns lugares no planeta onde a bússola indica o norte geográfico de forma idêntica ao norte magnético, não havendo, portanto, a declinação magnética. Assim, a diferença entre as direções do norte magnético e do geográfico não é constante, chegando a ser zero em alguns lugares do globo. Quando não se atenta para esse fato, verifica-se alguma diferença na indicação da direção, ocorrendo o chamado erro de variação magnética.

Nesse sentido, para evitar tal erro, os mapas dispõem de linhas traçadas nas localizações em que ocorre a variação na declinação magnética. Essas referências são denominadas **linhas agônicas** e elas corrigem a diferença entre a direção do norte magnético e do geográfico.

Quando as linhas sinalizam a mesma variação do desvio magnético, elas são chamadas de **isogônicas**. Para a comparação dos desvios com os pontos cardeais, foi convencionado que o ângulo formado à direita do norte (leste) seria positivo e à esquerda (oeste) negativo. Assim, dependendo da localização da aeronave, deve-se somar ou subtrair graus da indicação magnética para obter a real localização geográfica. A Figura 146 ilustra a posição das linhas agônicas em relação aos pontos cardeais do globo terrestre.

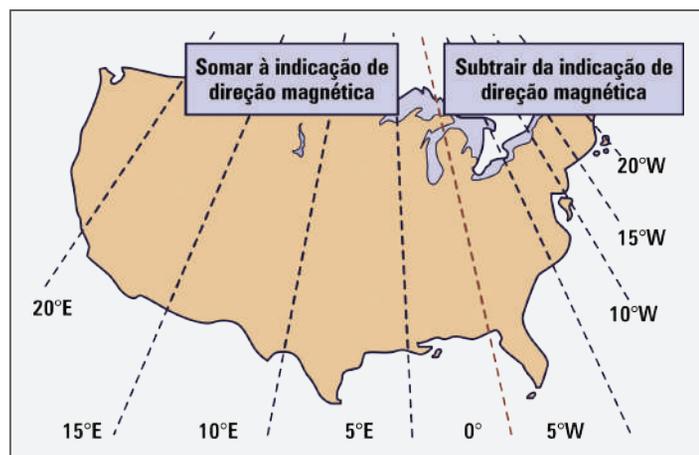


Figura 146 - Linha agônica (0°) e linhas isogônicas



Linha agônica: são linhas que unem os pontos com declinação magnética nula, em um mapa de navegação.

Com vistas a entender determinados comportamentos da bússola magnética, é preciso ter em mente que, no campo magnético da Terra, existem os polos verticais e os arcos magnéticos que se estendem através do Equador horizontalmente ou paralelos à superfície da Terra. Assim, quando uma aeronave sobrevoa a região dos polos, os ímãs da bússola são atraídos para baixo, em direção ao polo, fazendo com que o ponteiro mergulhe no líquido do instrumento, em vez de indicar a direção horizontalmente, como se verifica nas regiões próximas à linha do Equador. Esse comportamento da bússola nos polos magnéticos é conhecido como erro de mergulho.

O movimento do ponteiro para baixo provoca erro na indicação, embora o mecanismo de flutuação da bússola seja lastreado para compensar os efeitos desse fenômeno. Quanto mais próximo a aeronave estiver dos polos magnéticos sul ou norte, mais pronunciados serão os erros de mergulho. Como se vê, o norte magnético não influencia a agulha da bússola somente na horizontal, também o faz na vertical.

O erro de mergulho se manifesta de duas formas. Sendo a primeira chamada de erro de aceleração, pois ocorre em virtude da ação da aceleração da aeronave no líquido que preenche a caixa do instrumento. Assim, quando uma aeronave está voando no trajeto leste-oeste, em voo cruzeiro constante, e passa a acelerar, a inércia do líquido presente no mecanismo de flutuação faz com que a bússola oscile para o norte. De forma contrária, uma rápida desaceleração ocasiona sua oscilação para o sul. A segunda manifestação ocorre quando a aeronave voa em direção ao polo norte e executa uma curva com inclinação. Durante a manobra, o campo magnético puxa para baixo o mecanismo de indicação da bússola e afasta momentaneamente o limbo para longe da direção do giro. O fenômeno oposto ocorre quando a aeronave voa em direção ao sul, a partir do polo norte e executa a mesma manobra. Neste caso, existe um puxão inicial do indicador da bússola na direção do giro. Esses tipos de movimento são chamados de erros de curva.

Outra característica da bússola refere-se à sua leitura. Como se verifica na Figura 147, a bússola magnética comumente utilizada em aeronaves apresenta uma leitura horizontal das indicações de direção, não oferecendo uma visão de 360° de todas as direções possíveis. O cartão-compasso gira sobre o flutuador e a direção é indicada pela linha de fé.

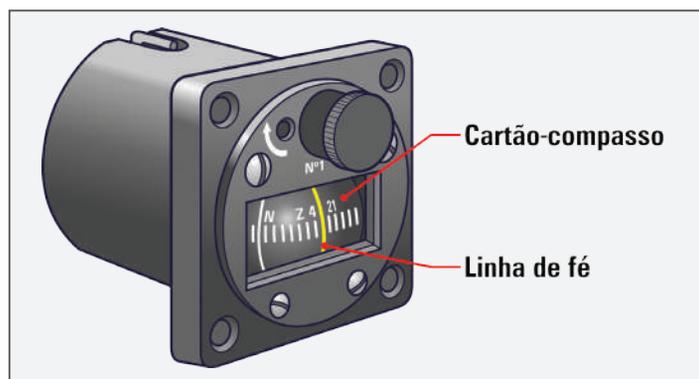


Figura 147 - Bússola magnética com destaque para a linha de fé e o cartão-compasso



Desse modo, se a aeronave estiver voando para o norte e virar para a esquerda, ocorrerá uma constante diminuição dos números indicados no mostrador do instrumento. Mas, antes que se efetue a curva, os números à esquerda do **cartão-compasso** efetivamente aumentarão. Com a curva à esquerda, a bússola continua a ser atraída pelo norte magnético. Como a aeronave está modificando a direção, o instrumento se movimenta para a esquerda, enquanto o flutuador permanece no mesmo lugar. Logo, a leitura do cartão-compasso diminui. Na configuração da bússola magnética de aeronaves, os números à direita da **linha de fé** giram para trás durante a curva para a esquerda, fazendo com que o cartão-compasso gire em sentido oposto ao da curva que se pretende fazer. A Figura 148 exemplifica a leitura de uma bússola de aeronaves.

Cartão-compasso: dispositivo circular ligado ao elemento flutuador da bússola magnética de aviação. Ele é usualmente graduado em radiais de cinco graus. Nele, também são marcados os pontos cardeais.

Linha de fé: linha de referência instalada na face do visor da bússola, empregada para identificar a leitura da bússola.

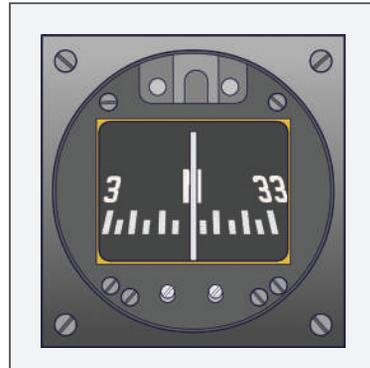


Figura 148 - Cartão-compasso (limbo) na bússola magnética

Isso ocorre porque, do assento do piloto, está-se olhando para a parte de trás da bússola. Mesmo não sendo um grande problema, é mais intuitivo ver os 360° da direção orientada, da forma como estão na carta aeronáutica ou em uma bússola manual.

5.1.1 Bússola magnética vertical

Conforme visto, a bússola magnética, apesar de ser um excelente auxílio à navegação, apresenta uma série de limitações que comprometem a exatidão das indicações de direção. Em razão disso, foram desenvolvidos outros instrumentos direcionais visando a sanar tais limitações. Uma solução interessante foi criada usando-se uma variação da bússola magnética, na qual se elimina a rotação reversa da bússola, por meio da colocação dos principais ímãs indicadores em um eixo, em vez de em um flutuador.

Com efeito, essa configuração exclui as consequências decorrentes das influências no fluido da bússola. A bússola magnética vertical (Figura 149) é uma variação da bússola magnética que, por meio de uma série de engrenagens, permite que seu limbo possa girar em um eixo horizontal. Destarte, a leitura torna-se muito mais intuitiva, pois os números indicadores de proa que se deseja selecionar para uma possível curva ficam orientados corretamente no limbo, ou seja, se a aeronave virar à direita, os números do limbo à direita aumentam; quando virar à esquerda, os do lado esquerdo diminuem, conforme se verifica na Figura 149.



Figura 149 - Bússola magnética vertical



Corrente de Foucault: também chamada de corrente parasita, ela consiste na corrente induzida em um material condutor, relativamente grande, quando sujeito a um fluxo magnético variável.

Outra solução adotada por muitos compassos magnéticos verticais para substituir o mecanismo de flutuação usado na bússola magnética consiste na utilização de um copo de amortecimento, que emprega **correntes de Foucault** (corrente parasita) para amortecer as oscilações. Essa configuração é utilizada nos giroscópios direcionais. Eles são muitos parecidos externamente com a bússola magnética vertical e, normalmente, estão localizados na posição central inferior do painel básico (T) de instrumentos primários de voo. Ambos usam o recurso pictográfico de uma aeronave miniatura como linha de fé para a leitura dos graus do limbo rotativo que fica ao redor dela. Para identificá-los externamente, basta verificar que a bússola magnética vertical não possui botão de ajuste manual encontrado no girodirecional (Figura 150), o qual é utilizado para alinhar o giroscópio à indicação magnética.



Figura 150 - Bússola magnética vertical em sua posição entre os instrumentos primários de voo

5.1.2 Indicação remota da bússola magnética

A bússola magnética tem de ser instalada em local mais longe possível de fontes magnéticas, com o fim de evitar o desvio magnético. Em que pese à possibilidade de compensar essa influência, por meio da compensação da bússola e ajuste da compensação dos ímãs na caixa do instrumento, a instalação remota da bússola magnética mostra-se uma solução mais adequada. O local varia de acordo com o modelo da aeronave, podendo ser na ponta da asa ou no estabilizador vertical, onde houver pouca interferência no campo magnético da Terra.

Acontece que, para se ter a indicação da bússola na cabine, é necessário utilizar um sistema de indicação remota síncro, pelo qual o conjunto de flutuação da bússola magnética possa atuar como um rotor desse sistema. Muitos deles são do tipo sistema de corrente alternada (AC) de sincronismo de dados por ímã permanente. Dessa forma, quando o mecanismo de flutuação da bússola gira para se alinhar ao norte magnético, uma corrente elétrica variada é produzida no transmissor. Esta altera o campo magnético gerado pelas bobinas do indicador na cabine, fazendo com que o ponteiro seja posicionado no mostrador. Tem-se, então, uma indicação de direção relativamente livre de desvios.

5.2 Indicação remota da bússola giromagnética

Outro instrumento muito preciso de indicação de direção chama-se bússola de válvula de fluxo ou bússola de detector de fluxo. Ela utiliza uma combinação engenhosa de giroscópio, de bússola eletromagnética e de sistema de indicação remota, aproveitando as vantagens desses componentes. Em tal equipamento, o indicador de direção do giroscópio é alimentado pela informação da direção magnética de uma bússola localizada remotamente. A bússola utilizada no instrumento, chamada de válvula de fluxo (Figura 151), é formada por uma estrutura com um núcleo principal segmentado circular e muito permeável magneticamente.

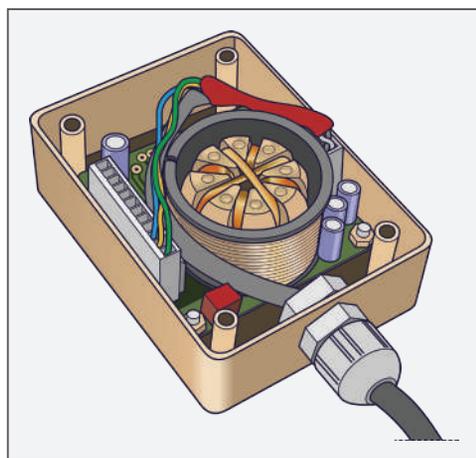


Figura 151 - Núcleo da válvula de fluxo

O núcleo de ferro da válvula recebe o fluxo do campo magnético da Terra e o distribui de forma variável através de segmentos do núcleo, de acordo com o giro da válvula de fluxo (Figura 152) acarretado pelo movimento da aeronave. Os sinais seguem em direção aos enrolamentos das bobinas coletoras, localizadas em cada uma das pernas do tripé do núcleo, que estão posicionadas a 120° de distância entre si.

A distribuição do campo magnético da Terra pelas pernas do núcleo ocorre de maneira que seja única para cada orientação direcional da aeronave. Cada orientação da aeronave produz uma distribuição típica na perna do núcleo.

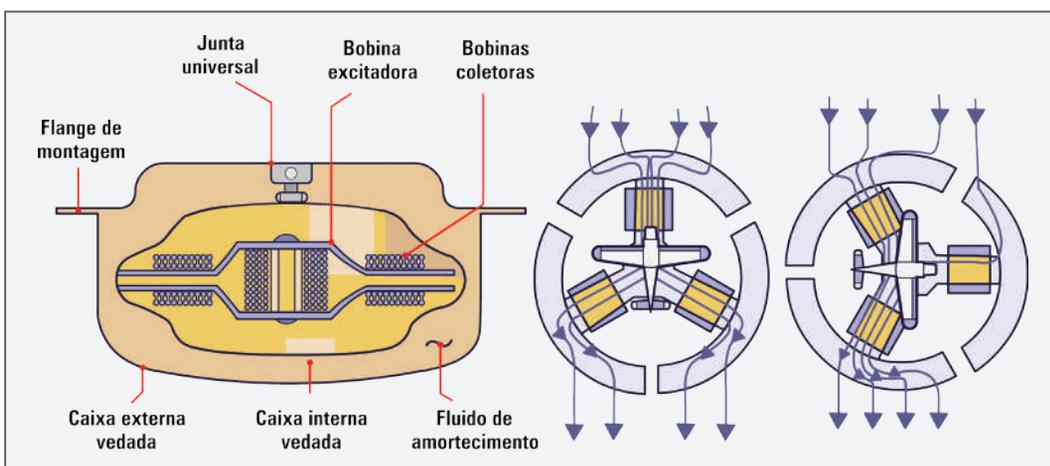


Figura 152 - Funcionamento do sistema de válvula de fluxo

Uma bobina de excitação, energizada por uma corrente AC, é colocada no centro do núcleo. Como o fluxo de corrente AC é zero toda vez que a aeronave muda de direção, o fluxo magnético da Terra é permitido passar pelo núcleo e modificar a posição do campo magnético, variando a direção indicada pelo instrumento. Quando o campo magnético do fluxo da corrente do núcleo chega ao seu pico, novamente o sinal é bloqueado. A indicação de posição permanece no local em que estava. O ciclo é repetido na frequência da corrente AC fornecida pela bobina de excitação. Nesse cenário, quando o valor da corrente é zero, há permissão para o fluxo magnético da Terra fluir pelo núcleo. Quando a corrente atinge o valor de pico, o sinal é bloqueado pelas bobinas captadoras. Durante cada ciclo, uma única tensão é induzida em cada bobina de captação, refletindo a orientação da aeronave no campo magnético da Terra.

A eletricidade que flui em cada uma das bobinas de captação é transmitida pela válvula de fluxo, por meio de fios, para uma segunda unidade, composta de um sistema de corrente alternada (CA) de sincronismo de dados por ímã elétrico, um giroscópio direcional, um amplificador e um estator bobinado triplo, similar ao encontrado no indicador de um sistema sincro. Uma única tensão é induzida no rotor central do estator, que reflete a tensão recebida das bobinas captadoras da válvula de fluxo e as envia por meio de suas bobinas. A tensão é, então, amplificada e usada para aumentar a posição do girodirecional. Este, por sua vez, é ligado ao rotor do sistema corrente alternada (CA) de sincronismo de dados por ímã elétrico, que transmite a posição do giroscópio para uma unidade indicadora localizada na cabine. No indicador, o limbo móvel vertical é girado contra uma linha de fé do tipo miniatura de um avião, que é uma bússola magnética vertical.

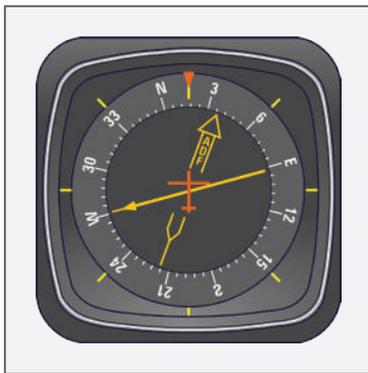


Figura 153 - Indicador radiomagnético (RMI)

Outros recursos de navegação foram incorporados ao instrumento com a integração de auxílios de radionavegação. Como exemplo, tem-se o indicador radiomagnético (RMI) (Figura 153), que, além do indicador de direção da bússola giromagnética, possui dois ponteiros adicionais, um indicando o rumo para uma frequência VHF e faixa omnidirecional (VOR), e outro sinalizando o rumo de um radiogoniômetro automático (ADF). Também é possível a integração do sistema de bússola giromagnética aos sistemas de piloto automático.

5.3 Magnetômetro de estado sólido

Alguns instrumentos de direção utilizam certos semicondutores em seus sensores, os quais reagem ao magnetismo em um nível molecular, produzindo variações nas atividades dos elétrons. Um exemplo de sensor encontrado em muitas aeronaves modernas é o magnetômetro de estado sólido. Esse componente possui a capacidade de medir a intensidade, a direção e o sentido de campos magnéticos em sua proximidade. Portanto, ele não indica somente a direção dos polos magnéticos da Terra, mas, também, o ângulo do campo de fluxo. Além disso, o seu funcionamento não é afetado por oscilações que perturbam a bússola magnética padrão, e, ainda, apresenta algoritmos de processamento integrado, assim como fácil integração com sistemas digitais.

É um equipamento compacto, extremamente preciso, formado por minúsculas estruturas compostas de camadas de semicondutores e não apresenta partes móveis, de acordo com a Figura 154.

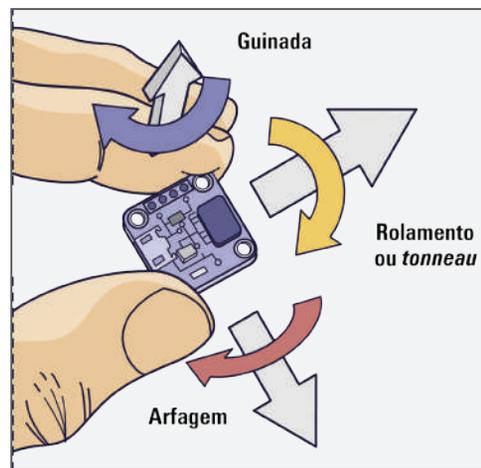


Figura 154 - Magnetômetro de um sistema de indicação de atitude e de direção (AHRS)

5.4 Sistema pictorial de navegação

Inicialmente, é preciso destacar que o termo pictorial significa expressar as ideias por meio de desenhos ou figuras simbólicas que tenham relação com o que se quer representar. Na instrumentação de aeronaves, essa técnica é empregada para tornar a leitura do instrumento mais intuitiva, facilitando a consciência situacional do piloto. O que se busca com essa técnica é que o piloto tenha instintivamente a percepção da atitude e da posição da aeronave, a partir da leitura do comportamento do instrumento. Assim, a interação do piloto com o instrumento é facilitada, e o tempo de reação nos momentos críticos é reduzido.

Apesar de o sistema pictorial mecânico ser considerado primitivo, ele continua a ser usado em alguns instrumentos. As apresentações digitais também fazem uso dessa técnica. No sistema de navegação, é verificada uma contínua apresentação visual da posição da aeronave. O indicador de curso, ou indicador de situação horizontal (HSI), apresenta, de forma pictórica, a posição da aeronave, a localização de determinada radial de VOR ou da trajetória de um pouso por instrumento (Figura 155). As informações apresentadas no instrumento não dão margem a nenhuma dúvida e são captadas em um simples relance pelo piloto. Portanto, o sistema pictorial é uma forma de apresentar a informação de modo mais intuitivo, facilitando a percepção da informação.



Figura 155 - Indicador de curso HSI

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que uma das importantes questões de um voo é o fato de a tripulação saber a direção do ponto em que se pretende chegar e se a aeronave se mantém na rota desejada. Por isso, os indicadores de direção fazem parte dos instrumentos primários de voo. Diante dessa importância, foram apresentados vários instrumentos com funcionamentos diferentes, mas com a mesma função de indicar a direção da aeronave com base no norte magnético da Terra.

Foi abordado o funcionamento da bússola magnética, suas características, limitações e cuidados para mantê-la aferida. Destacou-se a interferência que equipamentos elétricos produzem na indicação da bússola, gerando erros na direção apontada. Daí a razão de se instalar a bússola nas asas ou no estabilizador vertical da aeronave, para que fique afastada das interferências elétricas. Foi visto que, neste caso, há a necessidade de mecanismos de indicação remota, tais como um sistema sincro. Também foram apresentados outros erros de indicação da bússola magnética, tais como o erro de mergulho, erros de aceleração e de curva.

Foram destacados o funcionamento da bússola vertical e as vantagens dela em relação à bússola magnética, com destaque para a visão pictorial da aeronave em miniatura em relação ao limbo do instrumento, no qual há uma escala calibrada em graus. Da mesma forma, foram explicadas as principais características da bússola giromagnética baseada na ação da válvula de fluxo e a evolução representada pela integração de auxílios de radionavegação ao instrumento.

Em seguida, foi apresentado o magnetômetro de estado sólido, construído em estruturas minúsculas que reagem com o campo magnético da Terra a nível molecular, com variação das atividades de elétrons. Essa variação consistente é utilizada para indicar a direção da aeronave.

Ademais, foi abordado o princípio do sistema pictorial de indicação de direção, cuja finalidade é tornar mais intuitiva a apresentação da informação direcional, de maneira a facilitar a percepção situacional da aeronave pelo piloto.

Em suma, foram evidenciados os princípios de funcionamento dos principais instrumentos direcionais da aeronave, os quais servem de base ao entendimento do sistema de indicação de direção da grande maioria das aeronaves.

Capítulo 6

Instrumentos giroscópicos

Instrumentos giroscópicos são aqueles que se utilizam de um giroscópio (Figura 156) para seu funcionamento. Atualmente, os giroscópios mecânicos são empregados em aeronaves de aviação geral e em aeronaves comerciais mais antigas. Três dos seis instrumentos principais de voo usam giroscópios para fornecer aos pilotos informações de voo críticas sobre a proa, a atitude da aeronave e a inclinação do avião durante uma manobra. Em aeronaves modernas, os giroscópios mecânicos foram substituídos pelos giroscópios a laser. Tais instrumentos, além das informações críticas de voo, são particularmente importantes quando a aeronave voa sob regras de voo por instrumentos, em inglês, *instrument flight rules* (IFR).

No giroscópio, existem algumas principais características que o tornam adequado para uso em instrumentos de direção, são elas: a capacidade de rigidez no espaço, quando o seu disco rotor está em movimento, assim como a precessão que se verifica quando o rotor sofre a ação de uma força que tende a retirá-lo da posição de equilíbrio.

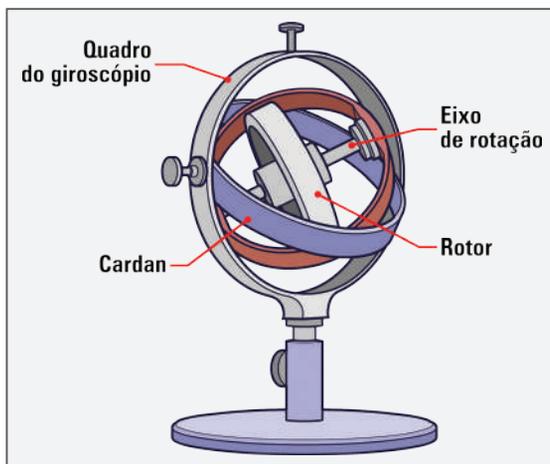


Figura 156 - Giroscópio

O fenômeno da rigidez no espaço, também conhecido como inércia giroscópica, é explicado pela Primeira Lei de Newton, segundo a qual um corpo em movimento tende a se mover em uma velocidade constante e direção, a menos que influenciado por uma força externa. Dessa forma, o rotor, girando dentro de um instrumento giroscópico, mantém uma atitude constante no espaço, desde que nenhuma força externa atue para mudar seu movimento. Essa estabilidade é elevada diretamente em proporção a qualquer aumento da massa ou velocidade do rotor. Como consequência, os rotores giroscópicos em instrumentos de aeronaves são construídos de materiais pesados e concebidos para girar a taxas de 10.000 a 15.000 rotações por minuto (RPM).

A Figura 157 mostra um giroscópio em posição inclinada. Nela, se percebe que o giroscópio se mantém na horizontal, independente da posição da estrutura do instrumento.

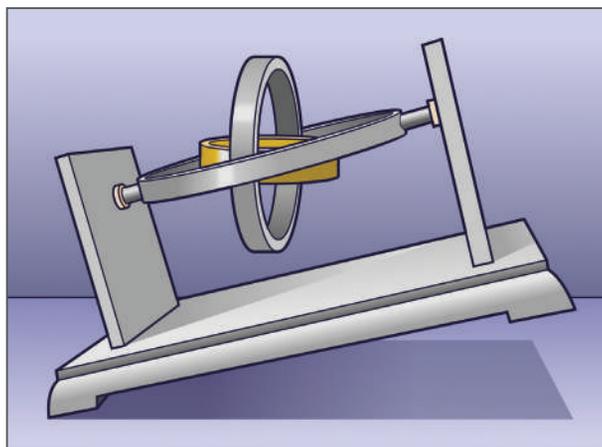


Figura 157 - Giroscópio em posição inclinada

Indicadores de atitude e de rumo usam giroscópios como uma referência imutável no espaço, isto é, uma vez que o rotor permanece girando durante a operação da aeronave, a posição do giroscópio é mantida constante em relação à horizontal ou à direção indicada. O rotor do giroscópio é conservado na mesma posição, mesmo quando as estruturas ao redor são movimentadas. Essa característica permite que a aeronave possa girar em torno do giroscópio, sem alterar a posição do rotor. A atitude ou a direção da aeronave é comparada com o rotor, criando uma referência confiável à realização de manobras, à correção e à manutenção de rotas.

A outra característica é a precessão, que é a inclinação do eixo do rotor, como resultado de forças externas. Quando uma **força defletiva** é aplicada a um rotor giroscópio estacionário (em equilíbrio), este se move na direção da força. No entanto, quando essa força é aplicada no aro do rotor em movimento, ela faz com que o rotor se mova como se a força tivesse sido aplicada a um ponto a 90 graus de distância, em torno do aro, na direção de rotação. Esse movimento de rotação ou de precessão coloca o rotor em um novo plano de rotação que é paralelo à força.

Assim sendo, toda vez que atua uma força defletiva no rotor, o plano de rotação do giroscópio é modificado, ficando paralelo ao sentido de atuação da força que atuou no rotor. Isso permite ao giroscópio determinar uma razão de curva, dependendo da pressão criada por uma mudança de direção. A taxa na qual o giroscópio processa essa modificação é inversamente proporcional à velocidade do rotor e proporcional à força defletiva que age no rotor. Portanto, é possível dizer que a precessão é a força aplicada ao rotor do giroscópio com o fim de incliná-lo.

A Figura 158 ajuda a descrever o movimento de precessão no giroscópio. Inicialmente, é necessário imaginar o movimento rotativo da roda, ela representa o movimento de um rotor no giroscópio. Também é necessário identificar os três planos destacados. O primeiro é o plano de rotação da roda (azul), o segundo é o plano da força aplicada na roda (amarelo), ou seja, o sentido em que a força efetivamente atua na roda, e o terceiro plano é o sentido da ação da precessão (lilás).



Força defletiva: força que altera a direção do movimento para um dos lados; ela muda a posição ou o movimento natural do objeto sobre o qual ela atua.

Com a roda girando, ocorre o fenômeno da rigidez do giroscópio no espaço. Logo, a direção assumida pela roda é mantida constante. Ao aplicar uma força na posição equivalente a 0° grau da circunferência da roda, esta deveria seguir o plano de atuação da força. Entretanto, como ela está girando segundo um giroscópio, a precessão se manifesta, levando a atuação da força para outro ponto distante 90° do plano de aplicação dela, seguindo o sentido de rotação da roda. Portanto, o plano de atuação da precessão fica localizado na posição aproximada de 90° ($0^\circ + 90^\circ$). A roda passa, então, a girar na posição paralela ao plano de atuação da força.

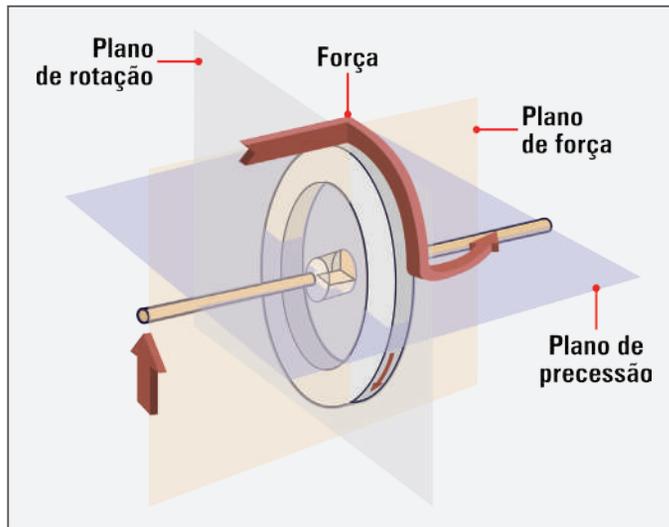


Figura 158 - Fenômeno da precessão giroscópica

A precessão, ou inclinação do rotor do giroscópio, é causada tanto por fricção dentro do giroscópio quanto por manobras das aeronaves, incluindo curvas, aceleração e desaceleração. Ela ocasiona um desvio lento no giroscópio, o que resulta em leituras erradas. Dessa forma, tem-se de realizar regularmente um cheque cruzado entre o indicador de posição, ou o giroscópio direcional, com a bússola magnética e efetivar as correções necessárias.

A Figura 159 exemplifica o mecanismo giroscópico de um horizonte artificial. Mesmo movimentando-se a base, o giroscópio mantém a posição pela ação de sua rigidez no espaço.

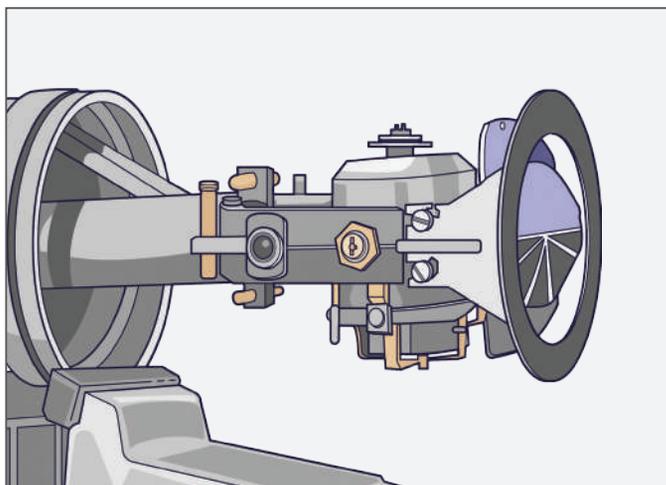


Figura 159 - Giroscópio utilizado no horizonte artificial

6.1 Fontes de alimentação para instrumentos giroscópicos

As fontes de energia para esses instrumentos são variadas. O requisito principal é girar os giroscópios em alta velocidade. Originalmente, eles eram movidos a vácuo. Uma fonte de vácuo puxa o ar por meio do giroscópio, dentro dos instrumentos, para fazer com que o rotor dele gire. Mais tarde a eletricidade começou a ser utilizada como fonte de energia. A armadura de viragem do motor elétrico funciona como um rotor giroscópico. Em algumas aeronaves, a pressão, em vez do vácuo, é usada para realizar o giro. Diversos sistemas e configurações de energia foram desenvolvidos para proporcionar uma operação confiável dos giroscópios.

6.1.1 Sistema de vácuo

Os giroscópios alimentados por este sistema são comuns na aviação. Seu funcionamento ocorre mediante uma corrente de ar direcionada contra o rotor do giroscópio em alta velocidade. A ação é similar a uma roda d'água.

O vácuo é produzido pela **bomba palheta rotativa**. A ação dela consiste em puxar o ar atmosférico para dentro das tubulações do sistema e expulsá-lo para a atmosfera por outra abertura. Desse modo, o ar circula pelas tubulações, passa através dos giroscópios, fazendo girar o seu rotor, percorre a bomba de vácuo e retorna para a atmosfera.

Ao observar a Figura 160, é visível que o ar com pressão atmosférica é sugado pelos filtros e, depois, encaminhado ao instrumento, onde movimentam os rotores dos giroscópios. Uma linha de sucção conduz o ar das caixas dos instrumentos até a fonte de vácuo. O ar, então, é expelido pela bomba até a atmosfera, passando por um separador de óleo, para evitar que a saída do ar seja acompanhada de óleo lubrificante da bomba de vácuo. Tanto um Venturi quanto uma bomba de vácuo são usados para criar o vácuo necessário para girar os rotores do giroscópio.

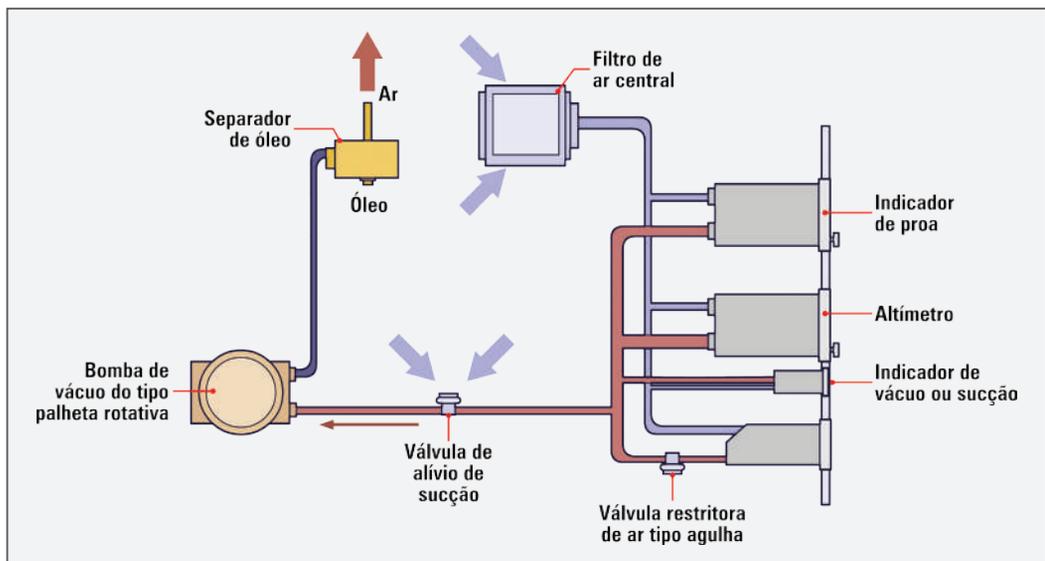


Figura 160 - Sistema de alimentação de vácuo para os instrumentos giroscópicos



Bomba palheta rotativa:
bomba de deslocamento positivo que usa palhetas montadas em um rotor que gira dentro de uma cavidade.

Na operação do instrumento, o vácuo necessário varia entre 3,5 e 4,5 polegadas de mercúrio. Em geral, esse valor é ajustado por uma válvula de alívio de vácuo localizada na linha de suprimento de ar. Alguns indicadores de curva e de inclinação necessitam de um ajuste de vácuo mais baixo. Isso pode ser obtido por intermédio do uso de uma válvula de restrição na linha de alimentação de vácuo do indicador de curva e de inclinação.

6.1.2 Sistema tubo de Venturi

A velocidade do ar passando através de um Venturi (Figura 161) gera sucção suficiente para rodar os giroscópios. Uma linha de abastecimento liga os giroscópios à garganta do Venturi, montado no lado de fora da fuselagem. A baixa pressão do tubo Venturi puxa o ar através dos instrumentos, movimentando o rotor dos giroscópios, e expela o ar por meio do Venturi. Essa fonte de força para os giroscópios é empregada em muitas aeronaves simples e mais antigas.

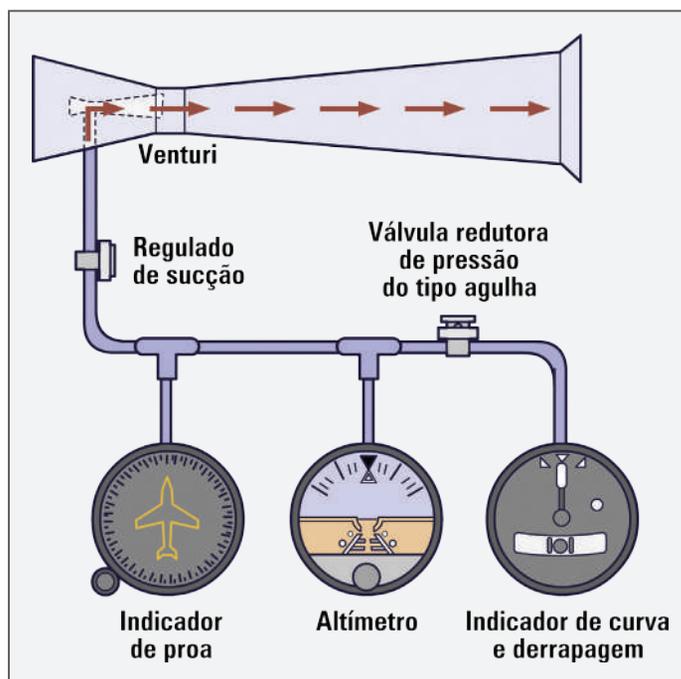


Figura 161 - Sistema Venturi de alimentação dos instrumentos giroscópicos

Cabe lembrar que a pressão baixa neste tubo ocorre em virtude do movimento do ar por meio de uma passagem estreita, ocasionando o aumento da velocidade do ar e a diminuição da pressão na área e criando uma sucção na linha que é ligada à área de baixa pressão. Esse fenômeno é conhecido com princípio de Bernoulli (Figura 162).

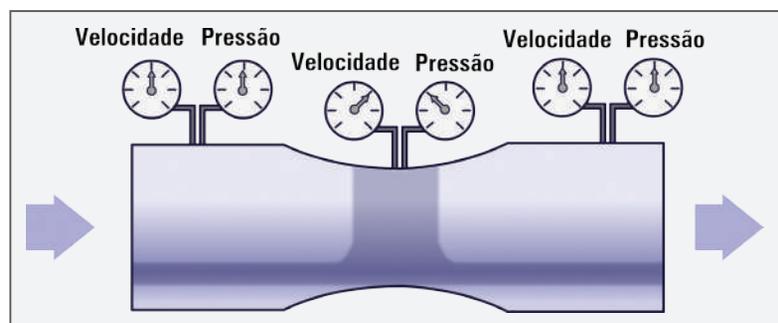


Figura 162 - Princípio de Bernoulli



Princípio de Bernoulli: segundo esse princípio, se a velocidade de uma partícula de um fluido aumenta, enquanto ela se escoar ao longo de uma linha de corrente, a pressão do fluido deve diminuir e vice-versa.

Em suma, ocorre o seguinte: com a ação do tubo, um vácuo é criado na tubulação ligada aos instrumentos giroscópios, fazendo com que o ar atmosférico seja sugado por uma abertura de admissão. Esse ar perpassa um filtro, percorre os rotores dos giroscópios, fazendo-os girar, ultrapassa a tubulação, chega ao tubo de Venturi e, de lá, volta à atmosfera.

Um monomotor leve é equipado com um Venturi de duas polegadas (capacidade de duas polegadas de vácuo de mercúrio) para operar o indicador de curva e inclinação. É possível, também, ele ter um Venturi maior, de oito polegadas, para alimentar os indicadores de atitude e direção (Figura 163). Normalmente, o ar que entra nos instrumentos é filtrado.

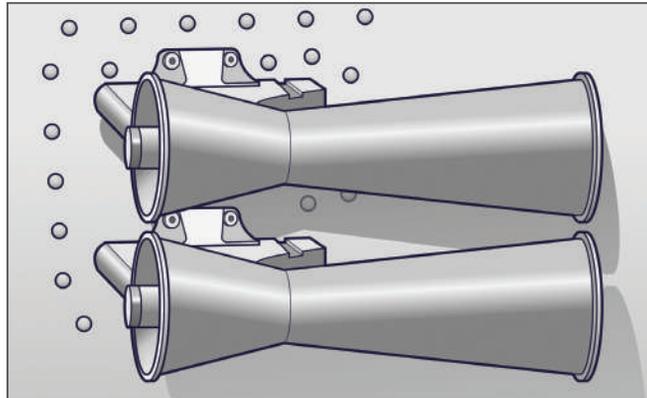


Figura 163 - Tubos de Venturi instalados na aeronave

As vantagens de um Venturi como fonte de sucção são o custo relativamente baixo e a simplicidade de instalação e operação. Ele não requer energia elétrica. Mas existem diversas limitações. O Venturi é projetado para produzir o vácuo desejado em, aproximadamente, 100 mph, em condições padrão, ao nível do mar. Amplas variações de velocidade ou densidade do ar ocasionam flutuação da sucção desenvolvida. O fluxo de ar também é prejudicado pelo gelo que se forma no tubo Venturi. Além disso, como o rotor não atinge a velocidade operacional normal até a decolagem, as checagens operacionais pré-voos dos giroscópios movidos por Venturi não podem ser feitas. Por essas razões, fontes alternativas de potência de vácuo foram desenvolvidas.

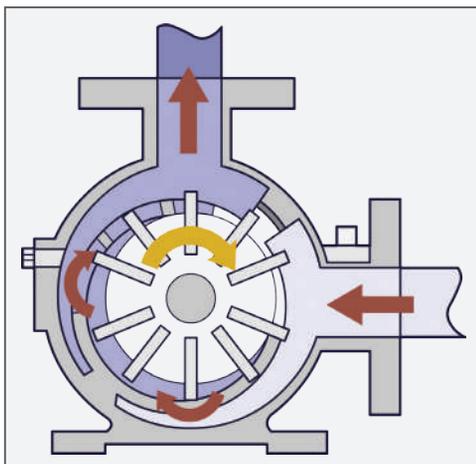


Figura 164 - Bomba de sucção do tipo palheta rotativa

6.1.3 Sistema de bomba de sucção do motor

A bomba de sucção do tipo palheta rotativa, posta em operação pelo motor da aeronave, é a fonte mais comum de vácuo para giroscópios instalados na aviação geral, em aeronaves leves. Ela é acionada mecanicamente pelo motor e utiliza o sistema de lubrificação dele para a sua refrigeração e lubrificação. A Figura 164 ilustra o funcionamento dessa bomba, puxando o ar de um ponto para outro, criando vácuo na linha de entrada e pressão na de saída.

Outra bomba comumente utilizada é a bomba de vácuo seco. Ela opera sem lubrificação externa e a instalação não requer conexão com o fornecimento de óleo do motor, pois não necessita de lubrificação. Ela também não precisa do separador de ar/óleo ou a válvula de retenção (de bloqueio) encontrada em sistemas de bombas que usam o mecanismo de lubrificação do motor da aeronave. Esse tipo de bomba usa palhetas de carbono, que são mais finas em relação às empregadas nas bombas lubrificadas. Essas palhetas sofrem desgastes durante a operação da bomba, ocasionando a liberação de uma espécie de poeira que lubrifica os componentes móveis da bomba.

Em muitos outros aspectos, o sistema de bomba seca e o sistema lubrificado a óleo são idênticos. A Figura 165 mostra o esquema de funcionamento do sistema com a bomba de vácuo seca.

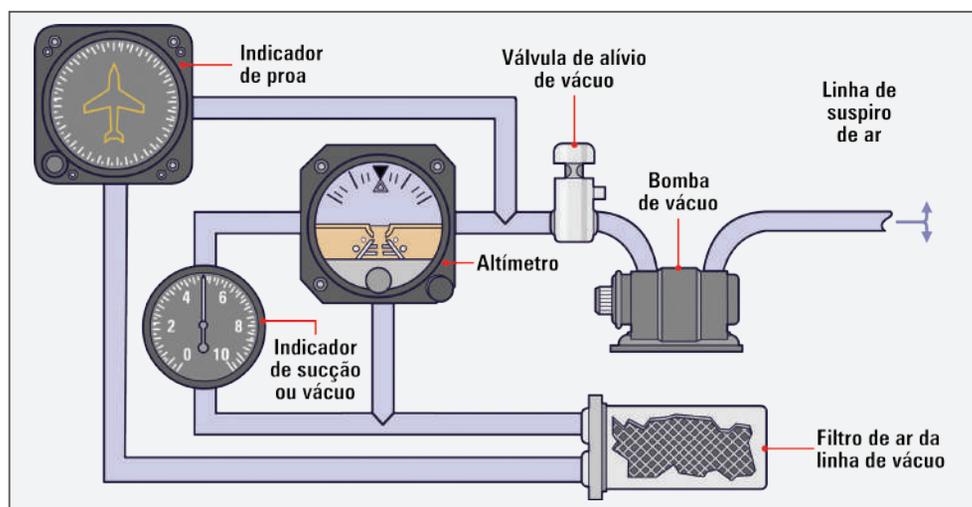


Figura 165 - Sistema giroscópico alimentado por bomba de vácuo seca

Quando uma bomba desenvolve vácuo (pressão negativa), ela também cria uma pressão positiva em sua saída, que é o ar comprimido. Algumas vezes ele é utilizado para operar giroscópios de pressão. Os componentes para os sistemas de pressão são muito parecidos com os de um sistema a vácuo. Outras vezes a pressão desenvolvida pela bomba de vácuo é usada para inflar botas de anticongelamento (*boots*) ou selos infláveis.

Uma vantagem das bombas acionadas pelo motor é seu desempenho consistente, tanto em solo quanto em voo. Mesmo com baixa rotação do motor, elas produzem vácuo mais do que o suficiente para o sistema. Tanto que na linha de sucção há um regulador, que dosa continuamente a sucção correta para os instrumentos operados a vácuo.

A Figura 166 exemplifica uma bomba de vácuo acionada pelo motor, instalada no local.

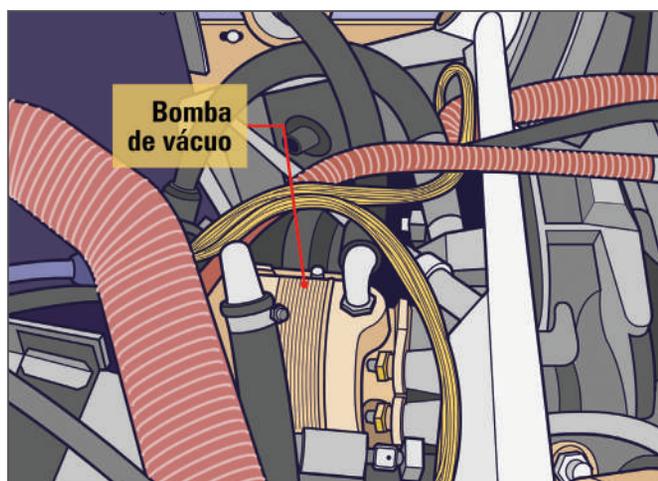


Figura 166 - Posição da bomba de vácuo em motor a explosão

Enquanto o motor funciona, o sistema relativamente simples de vácuo faz girar de forma adequada os giroscópios dos instrumentos, proporcionando indicações precisas. Contudo, uma falha no motor, especialmente em aeronaves monomotoras, deixa o piloto sem informações direcionais ou de atitude em um momento crítico. Para suprir essa deficiência, o indicador de curva e inclinação, em inglês, *turn and bank indicator*, opera com um giroscópio elétrico, que é alimentado por uma bateria durante um curto espaço de tempo. Assim, quando combinado com a bússola magnética da aeronave, informações suficientes sobre a atitude e a direção da aeronave estarão disponíveis.

Em geral, as aeronaves multimotoras possuem sistemas de vácuo independentes para os instrumentos do piloto e do copiloto, movimentados por bombas de vácuo separadas em cada um dos motores. Se um motor falhar, o sistema de vácuo movimentado pelo motor que ainda está operando fornece uma complementação aos giroscópios. Uma válvula de interconexão é instalada para conectar os instrumentos, cujo motor está em pane, com a bomba ainda operacional.

Na Figura 167, é visualizada a presença de duas bombas de vácuo independentes. Também é possível verificar que, em caso de falha em um dos motores, a linha de vácuo do motor em operação alimenta os instrumentos que eram acionados pelo motor em pane.

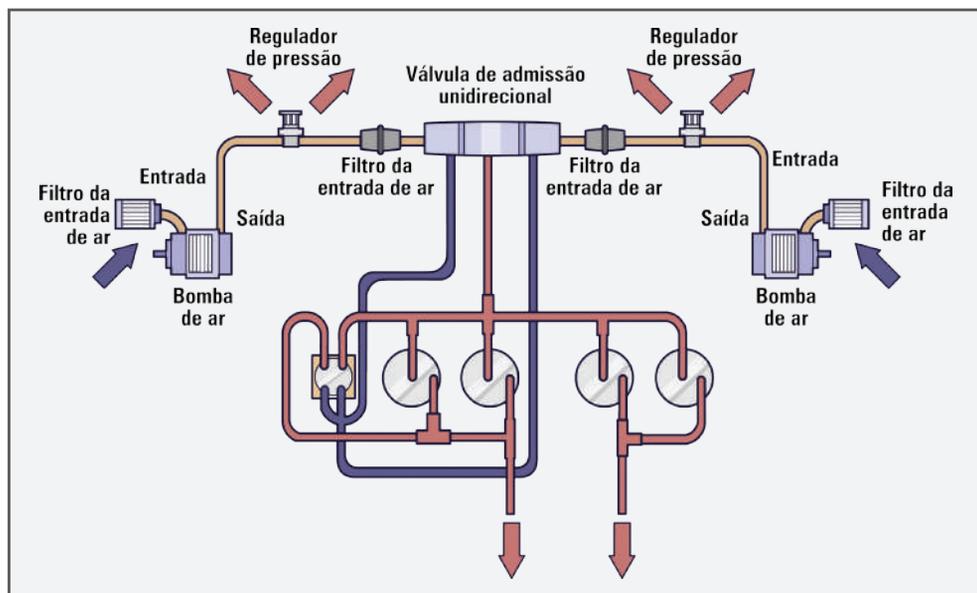


Figura 167 - Sistema de alimentação dos giroscópios a vácuo em aeronaves bimotoras

a) Sistema típico de vácuo alimentado pela bomba do motor

Este tópico será dedicado à abordagem mais profunda sobre o funcionamento de um sistema de alimentação de vácuo para os instrumentos giroscópicos. Para tanto, será utilizado como referência o sistema de vácuo equipado com bomba de palheta rotativa, acionada pelo motor. O funcionamento do sistema e as funções de seus componentes serão destacados.

Nesse sistema, há uma série de componentes que atuam para que o fornecimento correto de vácuo seja disponibilizado aos instrumentos giroscópicos. O esquema apresentado na

Figura 168 permite a visualização da posição de cada componente no circuito e a compreensão do funcionamento do sistema.

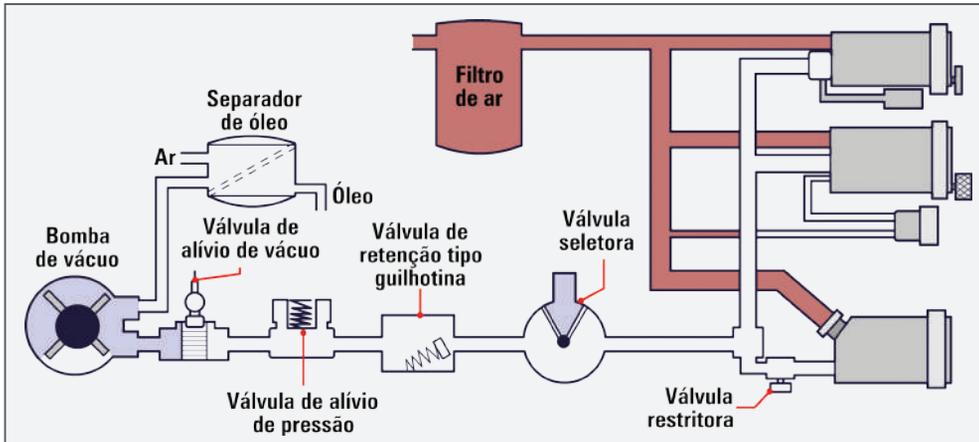


Figura 168 - Esquema do sistema de vácuo e seus componentes

Os principais componentes do sistema serão apresentados na sequência, com as respectivas funções.

- Separador de óleo e ar - nas bombas de vácuo lubrificadas, o ar e o óleo são expelidos através de um separador (Figura 169), que afasta o óleo do ar. O ar é lançado para o exterior e o óleo retorna para o cárter do motor. Quando a bomba é seca, não há necessidade desse componente, conforme se afirmou anteriormente.

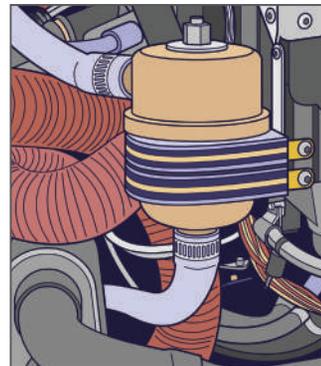


Figura 169 - Separador de ar e óleo

- Regulador de vácuo ou válvula de alívio de sucção - como a capacidade de produção de vácuo pela bomba é maior do que a demanda para a operação dos instrumentos, o regulador ajustável de vácuo (Figura 170) é acertado para disponibilizar a carga de vácuo necessitada pelos instrumentos. O excesso de sucção nas linhas dos instrumentos é alijado por meio de uma válvula de alívio com molas, a qual se abre para a atmosfera.

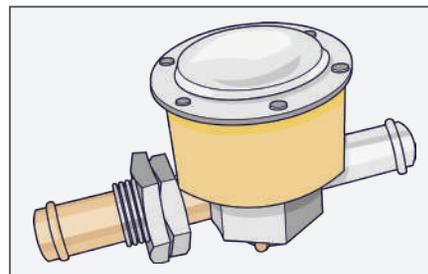


Figura 170 - Regulador de vácuo

- Válvula de retenção unidirecional - previne possíveis danos aos instrumentos por retorno de chama do motor que reverteria o fluxo de ar e óleo da bomba. É um tipo de válvula de sentido único que emprega uma tampa oscilante para controlar o fluxo de fluido. Em sistemas de vácuo de aeronaves multimotoras, ela é usada para isolar uma das bombas, em caso de falha das outras.

O funcionamento dessa válvula consiste na permissão de fluxo apenas em um sentido. Quando o sistema está funcionando normalmente, o fluxo de ar desloca a tampa da válvula, contrariando a tensão da mola que age no sentido de fechar a passagem. No momento em que o fluxo de ar deixa de existir, a mola desloca a tampa contra a parede da válvula, fechando a passagem. Dessa forma, é evitado o fluxo em sentido contrário (Figura 171).

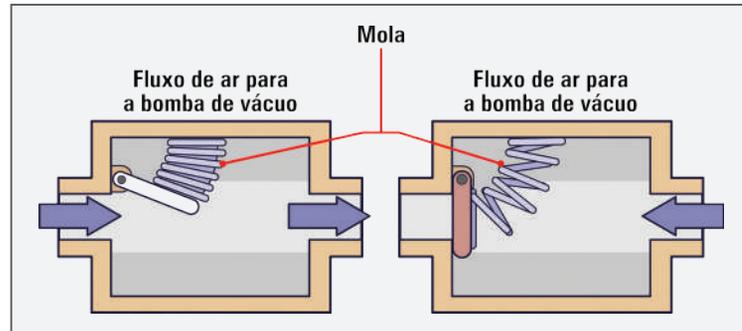


Figura 171 - Válvula de retenção nas posições aberta e fechada

- Válvula de alívio de pressão - como o fluxo reverso de ar da bomba fecha as válvulas de retenção e a de alívio de sucção, a pressão resultante rompe as linhas. A válvula de alívio de pressão alija o excesso de pressão positiva para a atmosfera. A Figura 172 destaca a posição da válvula de alívio na linha de vácuo da bomba.

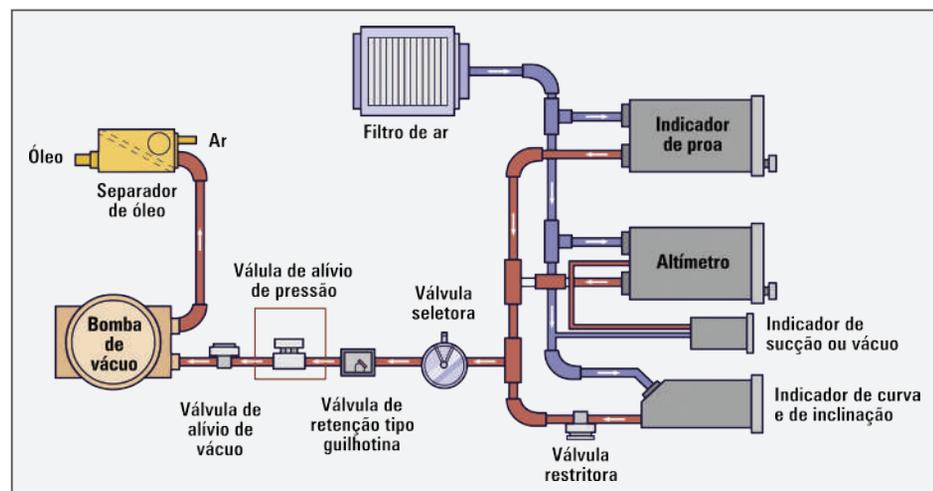


Figura 172 - Esquema do sistema de vácuo

- Válvula seletora - em aeronaves bimotoras equipadas com bombas de vácuo acionadas por ambos os motores, a bomba alternativa é selecionada para fornecer vácuo, no caso de o motor ou da bomba falhar. Nessa situação, a válvula de retenção é fechada para isolar a bomba defeituosa. Na Figura 172, é visto que a válvula seletora é instalada entre os instrumentos e a válvula de retenção. Essa configuração permite que uma fonte alternativa de vácuo seja selecionada e não haja perda de eficiência com fluxo de ar na linha de alimentação da bomba defeituosa, haja vista que a válvula retentora estará fechada.

- Válvula redutora - tendo em vista que o indicador de curva e de inclinação opera com menos vácuo do que o necessário para os outros instrumentos, o vácuo na linha principal deve ser reduzido para uso deste instrumento. Uma válvula redutora de linha executa essa função, mantendo o vácuo constante e reduzido para esse instrumento. Ela é do tipo agulha ou válvula reguladora de mola.
- Filtro de ar - o filtro de ar principal (Figura 173) retém corpos sólidos estranhos do ar que vão em direção aos giroscópios. É um filtro muito importante que requer manutenção regular. O entupimento dele reduz o fluxo de ar e provoca uma baixa leitura no medidor de sucção. Cada instrumento também possui filtros individuais. Nos sistemas sem o filtro principal, que se baseiam nos filtros individuais, o entupimento de um filtro não é detectado, necessariamente, no medidor de sucção.
- Medidor de sucção - medidor de pressão que sinaliza a diferença entre a pressão do sistema e a atmosférica ou da cabine. É calibrado em polegadas de mercúrio. O vácuo demandado pelos instrumentos e os limites mínimo e máximo alteram de acordo com o sistema giroscópico. Se o vácuo fornecido ao sistema está abaixo do valor mínimo apresentado no indicador de vácuo, a demanda dos instrumentos giroscópicos não é atendida, fazendo com que estes girem menos rápido que o suficiente para uma operação confiável. Em muitas aeronaves, o sistema fornece um seletor ligado a uma válvula seletora de sucção, que permite ao piloto verificar o valor do vácuo em diversos pontos do sistema.

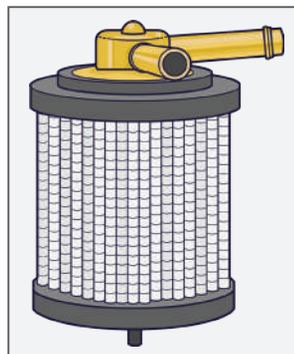


Figura 173 - Filtro principal do sistema de vácuo

Destaca-se que as pressões de vácuo/sucção, abordadas na operação dos sistemas de vácuo, são na verdade pressões negativas, ou seja, abaixo da pressão atmosférica, indicadas em polegadas de mercúrio. O sinal de menos não é apresentado, porque os valores são relacionados ao vácuo, que se subentende ser abaixo da pressão atmosférica.

b) Operação do sistema de vácuo em bimotores

Sistemas de vácuo em aeronaves bimotoras são mais complicados. Eles dispõem de uma bomba de vácuo acionada pelo motor de cada grupo motopropulsor. As linhas de fluxo e os componentes ligados a cada bomba são isolados do sistema da bomba do outro motor, ou seja, cada bomba age como um sistema de vácuo independente.

As linhas de vácuo iniciam a partir de cada bomba e, logo em seguida, recebem uma válvula de alívio de vácuo, uma válvula de retenção e, depois, uma válvula seletora de quatro vias. Esta válvula permite que cada bomba forneça vácuo para o coletor de admissão. Do coletor partem mangueiras flexíveis até os instrumentos operados a vácuo. Para reduzir a carga dos indicadores de curva e inclinação, válvulas de restrição, do tipo agulha, são instaladas nas linhas desses instrumentos, uma na linha do piloto e outra na do copiloto.

Uma linha sai do indicador de curva e de inclinação e vai até o indicador de vácuo (Figura 174). Enquanto outra sai da linha de alimentação dos demais instrumentos giroscópicos e também segue até



Figura 174 - Indicador de vácuo com sinalização da posição principal (verde)

o indicador. Nesse circuito, é instalada uma válvula de seleção de curva e de inclinação, que possui três posições: principal, curva e inclinação à esquerda e curva e inclinação à direita. Na posição principal, o medidor indica o valor de vácuo nas linhas dos horizontes artificiais e giroscópios direcionais. Nas outras, o valor mais baixo do vácuo para os indicadores de curva e de inclinação.

A Figura 175 apresenta um esquema de um mecanismo de vácuo básico para uma aeronave bimotora. Nele, constam os seguintes componentes: duas bombas acionadas pelos motores da aeronave, duas válvulas de alívio de vácuo, duas válvulas de retenção, um coletor do vácuo de admissão, um restritor de vácuo para cada indicador de curva e de inclinação, uma válvula seletora de quatro vias, um medidor de vácuo e uma válvula seletora de curva e de inclinação. O filtro principal e os individuais dos instrumentos não são mostrados. Uma linha de dreno também é instalada no ponto mais baixo do sistema.

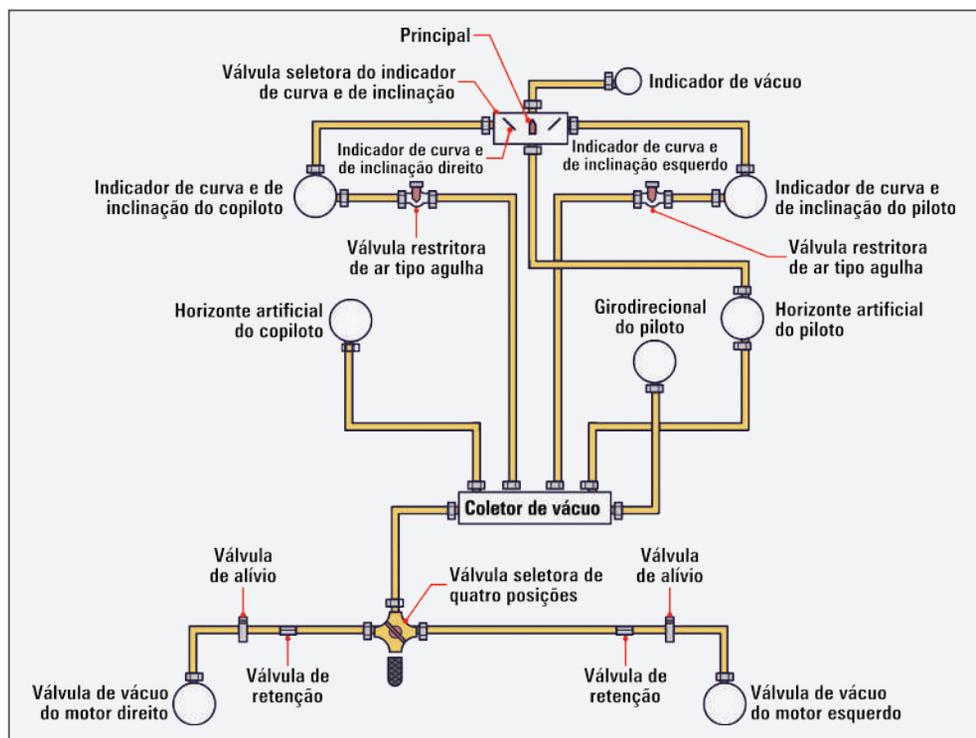


Figura 175 - Esquema do sistema de vácuo em aeronaves bimotoras

6.1.4 Sistema de instrumentos giroscópicos acionados por pressão

Os giroscópios são dispositivos equilibrados por meio de ajustes finos nos **mancais de joia**, os quais devem ser mantidos limpos para garantir o bom desempenho do equipamento. Esse tipo de mancal é similar aos utilizados em relógios, com emprego de rubi. Na Figura 176, são mostrados os mancais que sustentam o rotor do giroscópio e permitem o giro deste com baixo índice de atrito.

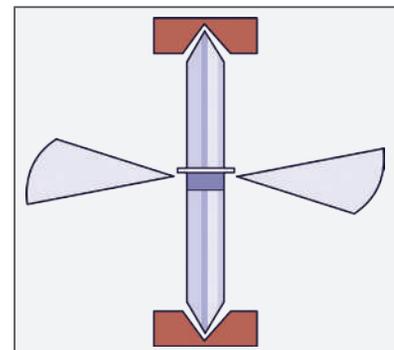


Figura 176 - Mancal tipo joia



Mancal de joia: dispositivo onde se apoia um eixo com liberdade para girar ou oscilar, com pequeno atrito; o apoio é feito de pedra preciosa, como o rubi, por ser resistente e proporcionar baixa fricção.

Quando os primeiros sistemas de vácuo foram desenvolvidos, existiam apenas as bombas lubrificadas a óleo. Mesmo com o uso dos separadores de ar e óleo, as saídas de pressão destas bombas apresentavam traços de óleo e sujeira. Como resultado, preferiu-se extrair ar limpo através dos giroscópios com um sistema de vácuo, em vez de se usar uma bomba de saída de pressão que apresentasse o risco de contaminação. O desenvolvimento de bombas secas autolubrificantes reduziu muito as contaminações de pressão de saída. Isso tornou possível a construção de sistemas de giroscópio à pressão.

Em elevadas altitudes, o uso de giroscópios movidos a pressão é mais eficiente. Os sistemas de pressão são parecidos com os sistemas de vácuo e fazem uso dos mesmos componentes, mas são projetados para pressão, e não para vácuo. Assim, um regulador de pressão (Figura 177) é usado em vez de uma válvula de alívio de sucção. Os filtros são extremamente importantes para evitar danos aos giroscópios. Normalmente, o ar é filtrado na entrada e na saída da bomba.

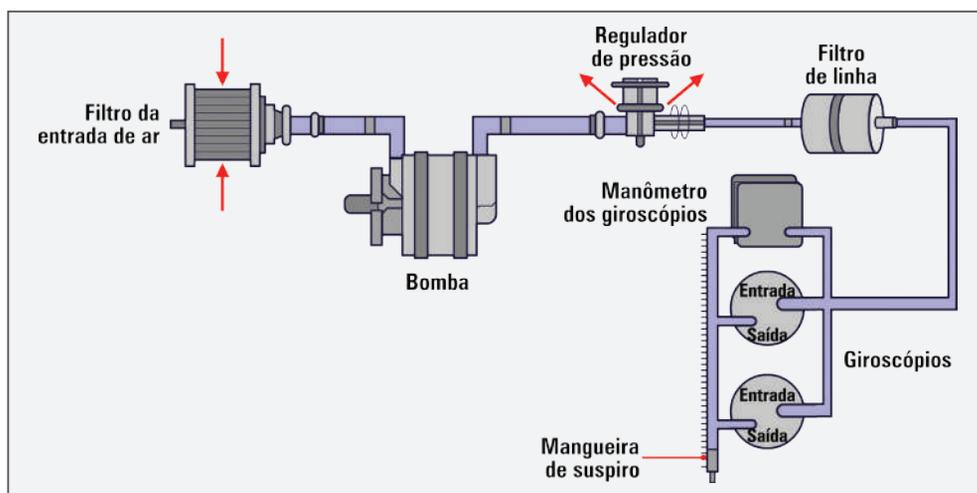


Figura 177 - Sistema de alimentação de pressão para os giroscópios

6.1.5 Sistema de instrumentos giroscópicos acionados eletricamente

Um motor de indução elétrica age como um giroscópio. Esta é a base para os giroscópios movidos a eletricidade, nos quais o rotor é movido por um motor elétrico. Ele tem a vantagem de ser movimentado à bateria por um tempo limitado, caso o gerador ou o motor falhe. Como não há a necessidade de o ar fluir através do giroscópio para girar o rotor, a preocupação com a contaminação é desprezível. Também se reduz o peso, pois não se utilizam bombas, tubulações e componentes do sistema de vácuo.

Em muitas aeronaves monomotoras pequenas, os coordenadores de curva e elétricos são combinados com os indicadores de atitude e com o girodirecional a vácuo, para efeito de redundância. O oposto também é possível. A combinação de ambos os tipos de instrumentos no painel possibilita ao piloto mais opções de fontes de informação. Em aeronaves multimotoras mais complexas, sistemas elétricos redundantes e confiáveis possibilitam que todos os instrumentos giroscópicos sejam alimentados por energia elétrica.



Motor de indução elétrica: motor elétrico construído de tal maneira que se tem dois campos magnéticos giratórios.

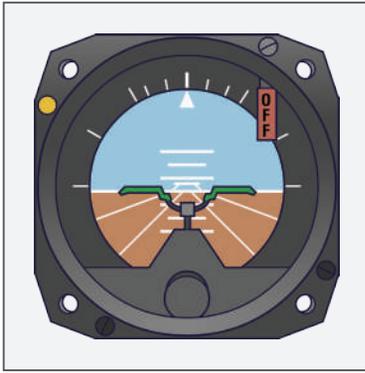


Figura 178 - Horizonte artificial com a inscrição **off**

Nota-se que os giroscópios elétricos apresentam algum tipo de indicação no mostrador, para destacar que o instrumento não está recebendo energia elétrica. Normalmente, isso aparece na forma de uma janela no mostrador com uma bandeira vermelha ou com a inscrição **off** escrita nela. Na Figura 178, é ilustrada a bandeira vermelha com a inscrição **off**, no mostrador do horizonte artificial.

6.2 Princípios dos instrumentos giroscópicos

Como se viu, há uma série de instrumentos de voo que utilizam os atributos giroscópicos para funcionar. Assim, o entendimento sobre como operam esses dispositivos ajuda a compreender a operação dos instrumentos que funcionam baseados nos giroscópios. Em razão disso, a seguir serão apresentadas as principais características dos giroscópios, seus componentes e seu funcionamento.



Junta cardã: também chamada de junta universal, é uma junção de acoplamento de um eixo que transfere o movimento em outra direção sem modificar o sentido de giro; por de dobradiças articuladas entre si, mas que, por meio de um eixo comum a ambas, ortogonalmente posicionado, modifica a direção desse movimento.

6.2.1 Giroscópios mecânicos

Três dos instrumentos de voo mais comuns: o horizonte artificial, o indicador de rumo e o ponteiro de curva do indicador de curva e de inclinação são controlados por giroscópios. Muitos deles utilizam giroscópios mecânicos.

O giroscópio mecânico consiste em um rotor suspenso por um conjunto suporte que dispõe de dois círculos articulados, por meio de **juntas cardã**. Seu funcionamento é baseado no princípio da inércia e nas suas características de rigidez e precessão. O eixo em rotação tem um efeito de memória que guarda direção fixa em relação ao círculo máximo, dispensando as coordenadas geográficas. Portanto, é um ótimo dispositivo para indicar a direção e a atitude da aeronave.

Um giroscópio mecânico é composto de um disco ou rotor com sua massa concentrada ao redor do seu perímetro. O rotor é equipado com rolamentos eficientes que o permitem girar em altíssimas velocidades.

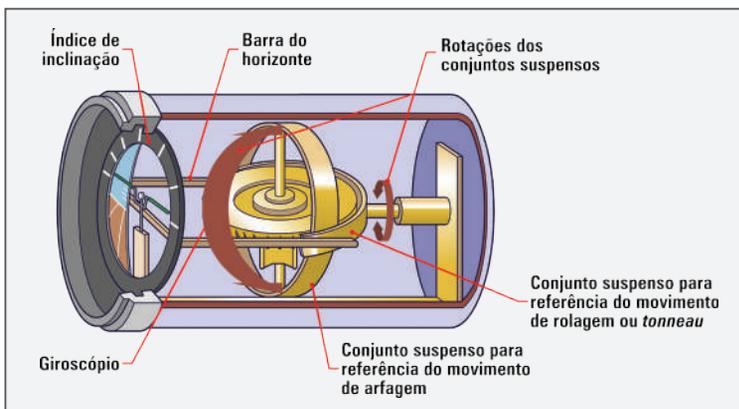


Figura 179 - Horizonte artificial e seus componentes

Na Figura 179, são verificados os dois movimentos do conjunto rotor. Um é o próprio movimento de giro do rotor, enquanto o outro indica o movimento do conjunto rotor no espaço. Essa posição tende a ser mantida durante a operação do rotor, desde que outras forças não atuem nele.

Há diferentes configurações para a montagem do rotor e do eixo, as quais permitem que o rotor gire sobre um ou dois eixos perpendiculares ao seu eixo de rotação. Para suspender o rotor em rotação, o eixo é primeiramente montado em um anel de apoio, conforme a sequência mostrada na Figura 180.

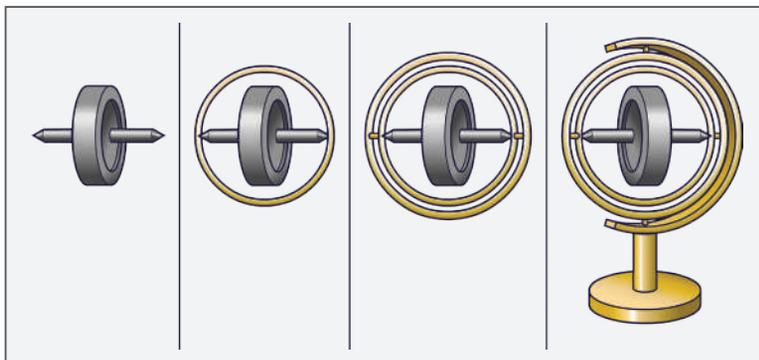


Figura 180 - Sequência de montagem do rotor do giroscópio

Se os suportes forem fixos a 90° , ao redor do anel de apoio, onde o eixo está ligado, tanto o anel de apoio quanto o rotor se movimentam livremente em 360° . Quando o giroscópio é chamado de cativo, a sua configuração somente permite que ele gire em torno de um eixo, que é perpendicular ao eixo de rotação.

Com efeito, é possível que o anel de apoio também seja montado dentro de um anel externo. Os pontos dos rolamentos são idênticos aos suportes mencionados, posicionados a 90° , ao redor do anel de apoio, onde o eixo de rotação está ligado. A ligação dos suportes neste anel externo permite que o rotor gire em dois planos perpendiculares ao eixo de rotação do rotor. O plano em que o rotor gira, devido à sua rotação sobre o seu eixo, não é considerado um plano de rotação do giroscópio.

Um giroscópio com a configuração de dois anéis, mais o suporte de montagem, é chamado de giroscópio livre, porque possui uma configuração que o permite rodar em dois eixos perpendiculares ao eixo de rotação do rotor. Como resultado, o anel de apoio com um giroscópio montado no interior é livre para girar 360° , dentro do anel externo.

A não ser que o rotor de um giroscópio esteja rodando, ele não apresenta as suas propriedades peculiares, é simplesmente uma roda montada sobre os mancais. Quando o rotor é girado em alta velocidade, o giroscópio exibe as suas duas características únicas. A rigidez giroscópica, ou rigidez no espaço e a precessão. A primeira significa que o rotor de um giroscópio livre sempre aponta para a mesma direção, não importando em qual direção a base dele esteja posicionada (Figura 181).

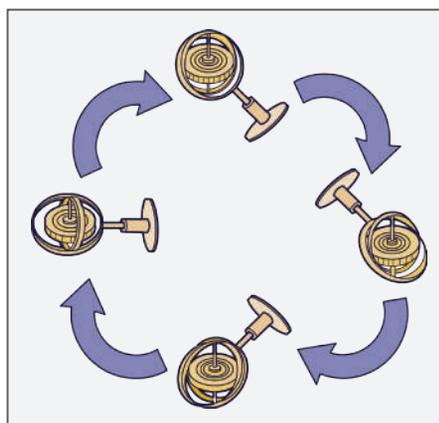


Figura 181 - Posição do rotor (constante)

São alguns fatores de projeto dos quais a rigidez giroscópica depende:

- a) peso - uma massa pesada, para determinado tamanho, resiste a forças perturbadoras mais que uma leve;
- b) velocidade angular - à medida que a velocidade rotacional aumenta, a rigidez e a resistência à deflexão são elevadas;
- c) raio no qual o peso está concentrado - o efeito máximo é obtido de uma massa, quando o seu peso principal está concentrado perto da borda, rodando em alta velocidade;
- d) atrito do rolamento - qualquer fricção no eixo de rotação produz uma força de deflexão no giroscópio. O atrito de rolamento deve ser o mínimo possível para manter reduzida a força de deflexão.

A característica do giroscópio de se manter rígido no espaço é explorada nos instrumentos de indicação de atitude e nos indicadores direcionais que usam giroscópios.

A precessão é a segunda característica importante dos giroscópios. Pela aplicação de uma força no eixo horizontal do giroscópio acontece um fenômeno único. A força aplicada é resistida. Em vez de responder à força movendo-se no seu eixo horizontal, o giroscópio se move, em resposta, no eixo vertical. Dito de outra forma, uma força aplicada no eixo do giroscópio não faz com que o eixo se incline. Ao invés disso, ele responde como se a força tivesse sido aplicada a 90°, na direção de rotação do rotor do giroscópio. Ele gira em vez de se inclinar. Esta característica de precessão é utilizada de forma controlada e previsível nos giroscópios que equipam o indicador de curva e de inclinação.

6.2.2 Giroscópio de estado sólido e sistemas relacionados

A melhoria na apresentação das atitudes das aeronaves e das informações de direção sempre foi um objetivo na aviação. As aeronaves modernas fazem uso de dispositivos direcionais e de atitude fabricados em elementos de estado sólido, altamente precisos, e sem partes móveis. Isso resulta em alta confiabilidade e em baixa manutenção nos componentes do sistema. Há diversos tipos de giroscópios eletrônicos, utilizados para fins variados. A seguir, serão destacados alguns empregados nos sistemas de voo e de navegação.

a) Giroscópio de anel de laser

O giroscópio de anel laser, em inglês, *ring laser gyroscope* (RLG), é amplamente usado na aviação comercial. O princípio de funcionamento do RLG está no tempo que a luz leva para viajar ao redor de uma trajetória circular estacionária não rotativa. A luz leva mais tempo para completar a jornada se a trajetória estiver girando na mesma direção em que ela está se deslocando. Além disso, leva menos tempo para completar a viagem se a trajetória estiver rodando na direção oposta à sua. A trajetória fica mais curta ou mais longa dependendo da rotação do trajeto, isso é conhecido como efeito Sagnac.

Para entender o efeito Sagnac, é preciso imaginar que a luz leva um determinado tempo para percorrer no sentido horário o círculo apresentado na Figura 182, na condição de ele estar parado. Agora é preciso imaginar o movimento da primeira figura, em que o círculo gira no sentido oposto ao da rotação da luz, ou seja, no sentido anti-horário. É necessário perceber que o ponto de saída da luz (traço radial na circunferência) vai

ao encontro dela, encurtando a distância a ser percorrida pela luz. Logo, o tempo gasto por ela para atingir o ponto de partida é menor em comparação ao gasto para percorrer o círculo parado.

Com efeito, é perceptível, na Figura 182, que o círculo se movimenta no mesmo sentido de rotação da luz. Por conseguinte, o ponto de partida vai se afastando da luz, ocasionando o aumento da distância a ser percorrida por ela. Assim sendo, o tempo para atingir o ponto de referência é maior em relação ao círculo estacionário.

Essa variação da distância percorrida pela luz no circuito é adotada como referência para determinar a variação de direção da aeronave.

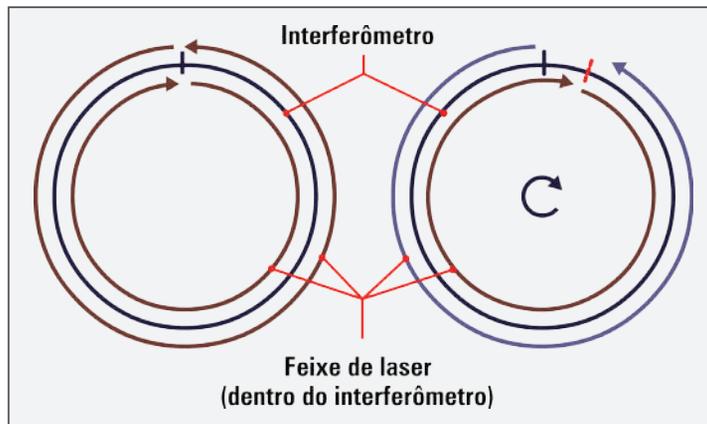


Figura 182 - Efeito Sagnac

O laser é uma luz amplificada pela emissão estimulada de radiação. Ele opera pela excitação dos átomos no plasma para liberar energia eletromagnética, ou fótons. Um giroscópio de anel de laser produz feixes que viajam em direções opostas ao redor de uma cavidade triangular fechada (Figura 183). O comprimento de onda da luz viajando ao redor do circuito é fixo. Conforme o circuito físico do equipamento gira, representado na Figura 182 pela linha de cor preta, acompanhando o movimento da aeronave, o trajeto que o laser percorre fica mais curto ou mais longo. Em outras palavras, conforme a aeronave se movimenta, o equipamento, que está preso à estrutura dela, também sofre esse mesmo tipo de movimento, fazendo com que o laser tenha que percorrer mais rápido ou mais lento o percurso no interior do giroscópio. Os comprimentos de onda de luz se comprimem ou se expandem para completar a jornada ao redor do circuito, conforme este muda seu comprimento efetivo. Como os comprimentos de onda alteram, as frequências também mudam.

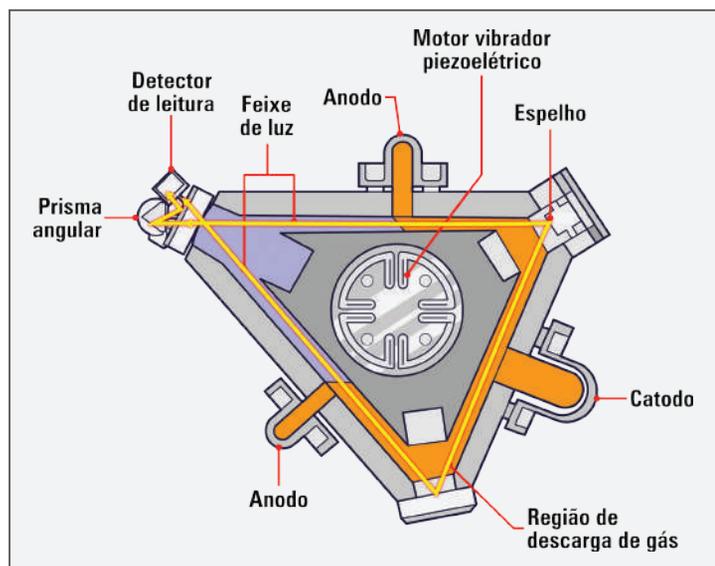


Figura 183 - Componentes do giroscópio de anel de laser

Examinando-se a diferença das frequências entre dois feixes de luz que se movimentam em sentidos opostos, a razão pela qual o circuito foi percorrido pode ser medida. Um motor piezoelétrico vibrador, instalado no centro da unidade, vibra para evitar que o sinal de saída seja bloqueado em baixas velocidades rotacionais. Isso faz com que as unidades instaladas na aeronave produzam um zumbido quando em operação. Esse giroscópio é montado remotamente para que o circuito da cavidade gire ao redor de um dos eixos de voo. A taxa detectada de defasagem entre as frequências dos feixes de laser que viajam em direções opostas é proporcional à taxa em que a aeronave está se movendo em torno deste eixo. Essa diferença de frequência ocorre porque, enquanto um feixe está se movimentando no mesmo sentido de rotação do circuito triangular (Figura 184), o outro se movimenta em sentido oposto. Logo, um feixe levará menos tempo para percorrer o circuito. Essa diferença de tempo é proporcional à mudança de posição do circuito triangular que representa o movimento da aeronave.

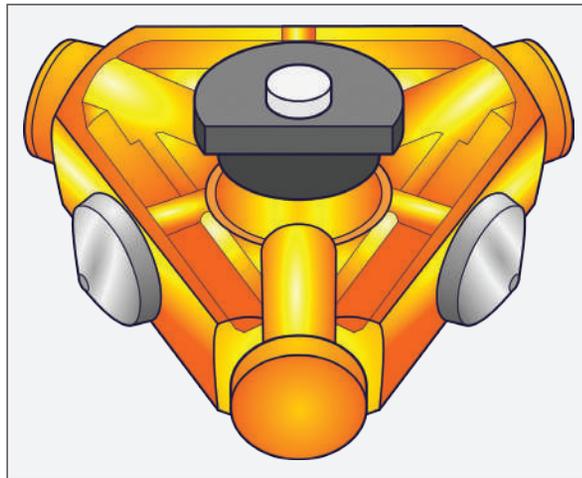


Figura 184 - Giroscópio de anel de laser

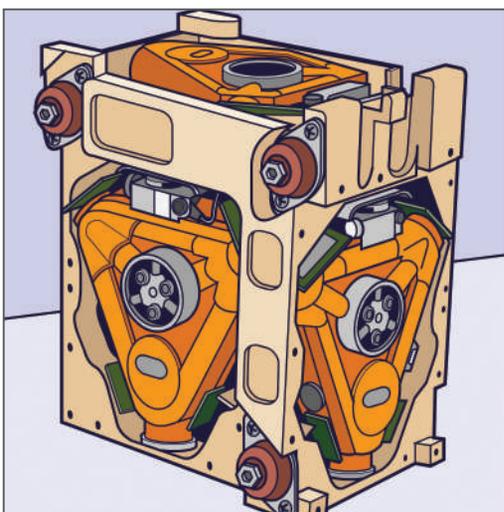


Figura 185 - Giroscópio de anel de laser montados em seu alojamento

Nas aeronaves, há uma unidade de RLG em cada eixo de voo. A saída é usada em instrumentação analógica e em sistemas de piloto automático. É também facilmente compatível para uso em mostradores digitais de computadores ou computadores digitais de piloto automático. Eles são muito robustos e apresentam vida útil bastante longa com pouca manutenção devido à falta de partes móveis. Eles medem o movimento sobre um eixo de forma muito rápida e proporcionam saída contínua. São muito precisos e geralmente considerados superiores aos giroscópios mecânicos.

A Figura 185 mostra um conjunto de giroscópios de anel de laser montados em seu alojamento para instalação na aeronave.

b) Sistema direcional e de atitude baseado em microeletromecânica

Os dispositivos de sistemas microeletromecânicos (MEMS) poupam espaço e peso na aeronave. Mediante o uso de dispositivos de estado sólido MEMS, a confiabilidade é aumentada principalmente devido à falta de partes móveis. O desenvolvimento dessa tecnologia para utilização em instrumentação de aviação foi integrado com o uso dos computadores de dados anemométricos (ADC). É uma tecnologia de baixo custo, que promete se difundir em todas as formas de aviação.

Esses recursos são aplicados em giroscópios que equipam aeronaves pequenas, para aviação geral, assim como em grandes aviões da aviação comercial. Unidades minúsculas baseadas em vibração utilizam a capacitância e a resistência para o sensoriamento. Elas são precisas e confiáveis e apresentam dimensões minúsculas de alguns milímetros de comprimento e largura (Figura 186). Tais unidades estão integradas em um *chip* microeletrônico de estado sólido, projetado para ter um rendimento de saída, após vários processos de condicionamento serem realizados. Os *chips*, que são análogos às pequenas placas de circuitos, são preparados para instalação em um computador dedicado ou em um módulo a ser instalado na aeronave.

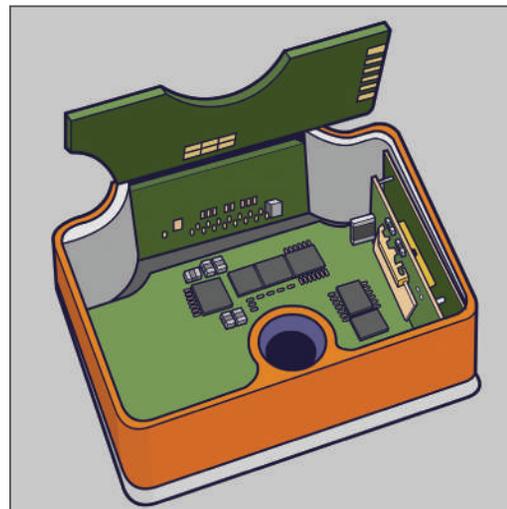


Figura 186 - Giroscópio MEMS

Enquanto um giroscópio mecânico gira em uma aeronave, sua rigidez no espaço é usada para perceber e medir o movimento dela. As bases de operação de muitos giroscópios MEMS são as mesmas, apesar do seu tamanho minúsculo. A diferença é que a vibração ou a oscilação do dispositivo piezoelétrico substitui o disco giratório pesado do giroscópio mecânico. Uma vez em operação, qualquer movimento fora do plano é detectável por microvoltagens variáveis ou capacitâncias percebidas através dos detectores geometricamente organizados. Como as substâncias piezoelétricas apresentam uma relação entre movimento e eletricidade, a estimulação microelétrica coloca um giroscópio piezoelétrico em movimento e produz minúsculas voltagens mediante o movimento no cristal piezoelétrico.

A Figura 187 mostra dois *chips* com tecnologia MEMS, capazes de perceber os três movimentos de voo da aeronave. Como se vê, são dispositivos muito pequenos.

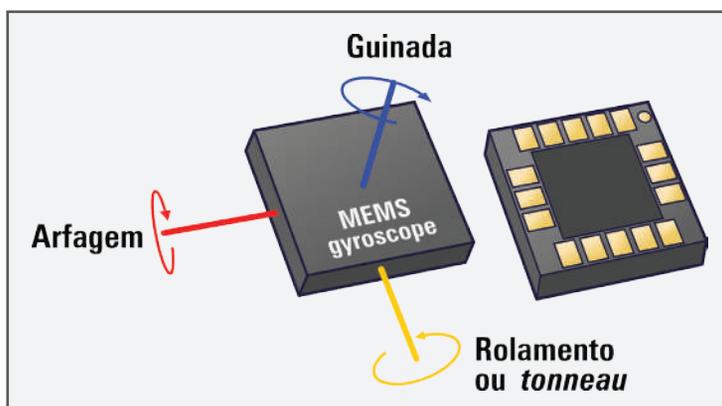


Figura 187 - Chip MEMS utilizado em giroscópio

6.2.3 Outros sistemas direcionais e de atitude

Em aeronaves modernas, os sistemas de referência de atitude e de orientação (AHRS) tomaram o lugar do giroscópio e de outros instrumentos individuais. Enquanto os dispositivos MEMS proporcionam parte da informação de atitude para o sistema, GPS, magnetômetro de estado sólido, acelerômetro de estado sólido e sinais de dados digitais do ar são todos combinados em um AHRS (Figura 188) para processar e entregar informações altamente confiáveis para exibição no painel da cabine.

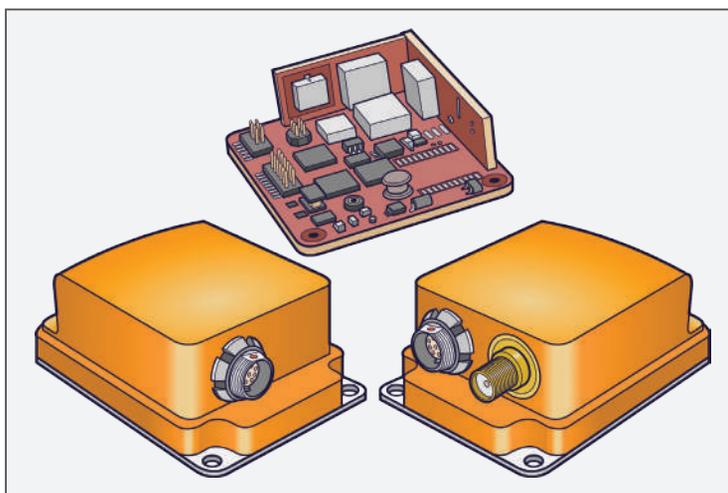


Figura 188 - Circuito do sistema de referência de atitude e de orientação (AHRS)

6.3 Instrumentos giroscópicos comuns

Em virtude da grande variedade de aeronaves, com idades, operações, dimensões, complexidades e finalidades bastante diferentes, percebe-se também uma ampla diversidade de instrumentos giroscópicos. Muitas utilizam os giroscópios mecânicos, mas a tendência é que eles sejam substituídos pelos de componentes de estado sólido, caso seja economicamente viável. Pelo menos nas aeronaves leves e de aviação geral os instrumentos giroscópicos mecânicos operam por bom tempo.

Assim, nos tópicos seguintes, será apresentado o funcionamento dos sistemas giroscópicos mais comuns e dos instrumentos que eles equipam.

6.3.1 Giroscópio de atitude acionado por sucção

O indicador de atitude, ou horizonte artificial, é um dos instrumentos de voo mais essenciais. Ele fornece ao piloto informações sobre os movimentos de arfagem e rolamento que são especialmente importantes quando se está voando sem referências visuais externas. O indicador de atitude opera com um giroscópio girando no plano horizontal. Assim, ele imita o horizonte real através de sua rigidez no espaço.

Quando a aeronave inclina ou gira em relação ao horizonte real, o conjunto de suspensão do rotor do giroscópio permite que ela e o alojamento do instrumento se inclinem e girem ao redor do motor do giroscópio, que permanece paralelo ao solo. A representação horizontal do avião em miniatura é ligada à caixa do instrumento. Uma semiesfera pintada, simulando o horizonte no céu e o solo, é fixada nos anéis de suspensão do rotor do giroscópio. O céu e o solo se encontram no que é chamado de barra do horizonte.

A relação entre a barra e o avião miniatura é a mesma do horizonte e do avião verdadeiros. Escalas graduadas fazem referência aos graus de inclinação e rolamento. Em geral, um botão de ajuste permite que os pilotos variem a altura da barra de horizonte para um nível apropriado.

A Figura 189 demonstra as posições que o horizonte artificial pode indicar. Ao se observar as ilustrações, é necessário ter em mente que o rotor do giroscópio se mantém paralelo ao solo e que a barra está conectada ao instrumento, ou seja, na aeronave. A inclinação da barra pictorial varia diretamente em relação à mudança de inclinação da aeronave. As marcações radiais na parte superior do instrumento sinalizam determinadas inclinações de referência, conforme se observa nesta ilustração:

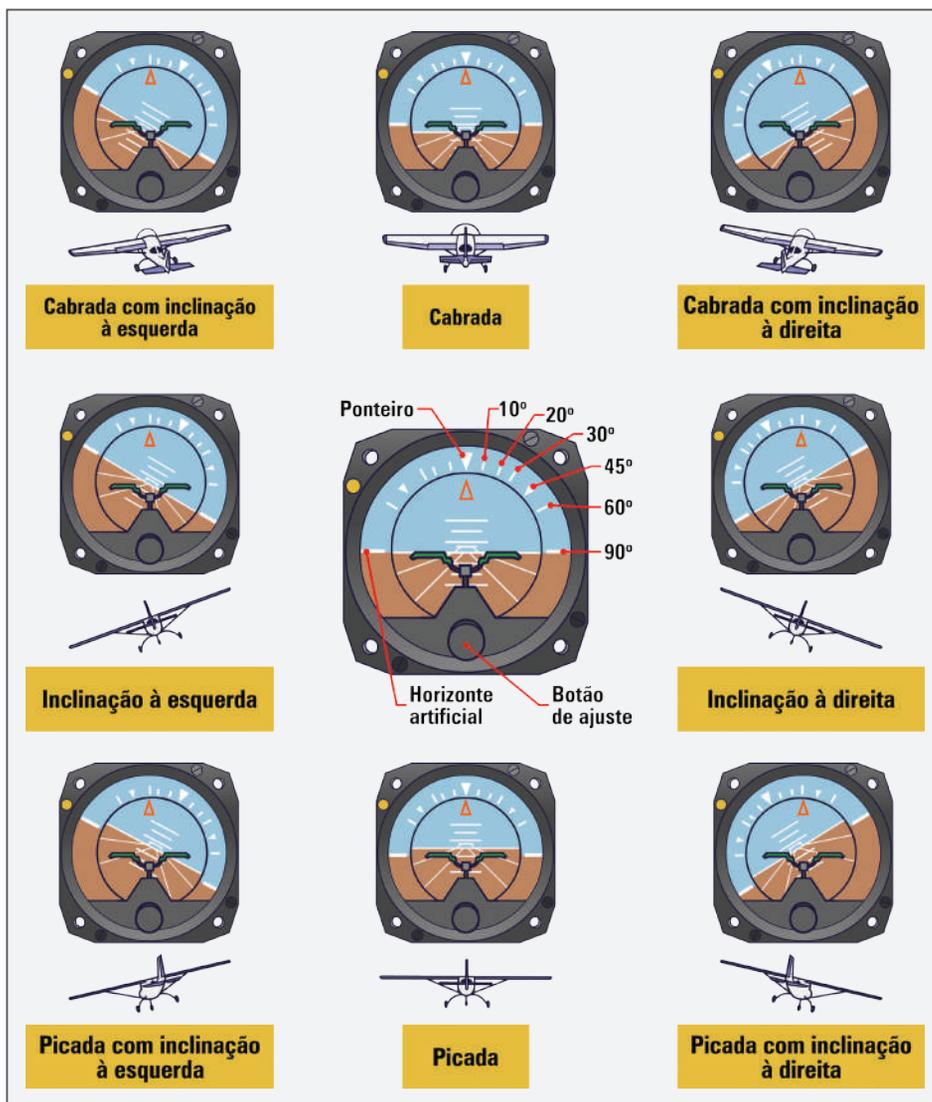


Figura 189 - Posições da aeronave e do horizonte artificial

Para que o horizonte artificial e os instrumentos giroscópicos funcionem corretamente, o giroscópio precisa permanecer na posição vertical, durante todo o voo, inclusive ao longo das manobras comuns de curva e de inclinação da aeronave em torno do rotor. Os rolamentos nesses instrumentos apresentam atrito mínimo, no entanto, mesmo essa pequena quantidade provoca uma restrição aos giroscópios, em função da força de precessão que surge com o atrito. Essa deficiência ocasiona a inclinação do giroscópio.

Com vistas a minimizar tal problema, o instrumento dispõe de um mecanismo de reerguimento, instalado dentro da caixa, o qual aplica uma força no rotor, toda vez que este sai da posição vertical. Essa força atua exatamente no ponto do rotor, fazendo com que este fique na posição vertical.

No caso dos giroscópios a vácuo, a solução é conseguida, utilizando a própria ação do vácuo. Após o ar passar pelo rotor, ele deixa o instrumento em direção à bomba de vácuo, passando por um duto em que são instaladas quatro janelas. Todas essas janelas liberam a mesma quantidade de ar quando o giroscópio está girando no plano vertical. Quando ele gira fora do plano, o ar tende a sair mais por uma janela do que por outra. As ventoinhas evitam que isso aconteça, promovendo mais passagem de ar pelo lado oposto. A força dessa ventilação desigual levanta novamente o rotor do giroscópio. As Figuras 190.A e 190.B ilustram esse processo.

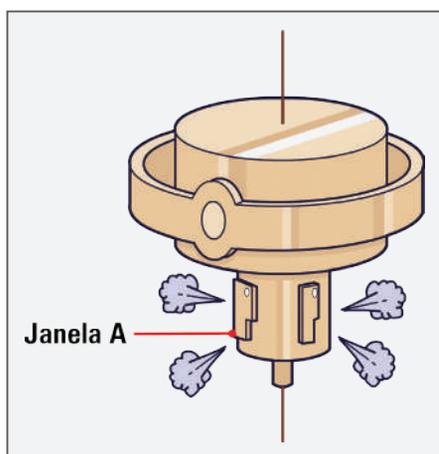


Figura 190.A - Rotor do giroscópio em equilíbrio

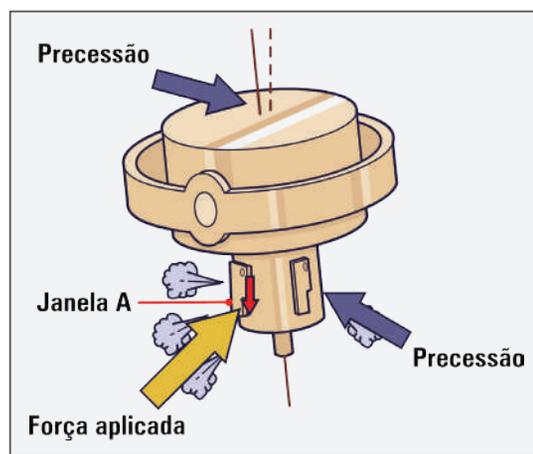


Figura 190.B - Rotor do giroscópio em desequilíbrio pela atuação da força de precessão

Na primeira imagem, é percebido o equilíbrio do rotor, logo, a saída de ar pelas janelas é igual. Na segunda, a precessão age, ocasionando a inclinação do rotor. Essa inclinação faz com que a janela A, localizada na direção, para a qual ele está se inclinando, se abra, conforme se percebe na Figura 190.B. Com a abertura, mais ar sai pela janela A, de modo que uma força atua no exato ponto do rotor que o leva à posição vertical novamente, voltando ao estado de equilíbrio mostrado na Figura 190.A.

Os primeiros indicadores de atitude movidos a vácuo eram limitados em quão longe uma aeronave poderia fazer sua rotação ou inclinação antes de o anel de montagem do giroscópio parar, causando uma precessão abrupta e o tombamento deste dispositivo. Muitos desses giroscópios dispõem de um recurso de bloqueio, usado para erguer o motor do giroscópio

para sua posição normal de operação, antes do voo ou após tombamento. Uma bandeira sinaliza que o giroscópio necessita ser desbloqueado antes do uso. Giroscópios mais modernos são construídos de forma a não tombarem, independente do movimento angular da aeronave sobre seus eixos.

Além do potencial de contaminação introduzido pelo sistema de movimento a ar, existem outras deficiências no desempenho dos indicadores de atitude movidos a vácuo. Alguns são induzidos pelo mecanismo de suspensão. As ventoinhas do pêndulo que se movem para dirigir o fluxo de ar para fora do giroscópio respondem não apenas pelas forças causadas pelo desvio do plano de rotação pretendido. A força centrífuga experimentada durante as curvas também faz com que as ventoinhas permitam uma saída de ar assimétrica através das janelas do giroscópio. O resultado disso é uma exibição incorreta da atitude da aeronave, especialmente em derrapagens e curvas muito inclinadas.

As acelerações e desacelerações abruptas impõem força no rotor do giroscópio. Suspenso em seus anéis de montagens, ele age da mesma forma que um acelerômetro, resultando em falsas indicações de nariz para cima ou para baixo. Os pilotos precisam aprender a reconhecer estes erros e fazer os ajustes necessários.

6.3.2 Indicador de atitude elétrico

Os indicadores de atitude elétricos são muito parecidos com os giroscópios movidos a vácuo. A principal diferença está no mecanismo de movimentação. Dentro dos anéis de montagem desse tipo de giroscópio, um pequeno motor elétrico funciona como rotor. Ele é movimentado por 115 volts, 400 ciclos AC e gira, aproximadamente, a 21.000 RPM.

Muitas características do giroscópio movido a vácuo são compartilhadas pelo giroscópio elétrico. O rotor é orientado no plano horizontal e os anéis de montagem do giroscópio são livres e permitem que a aeronave e a caixa do instrumento girem ao redor do rotor do giroscópio, que permanece rígido no espaço. O avião em miniatura, ligado à caixa de instrumentos, aponta a atitude da aeronave em relação à barra móvel do horizonte atrás dele.

Esse tipo de giroscópio resolve algumas das deficiências dos indicadores de atitude movidos a vácuo. Como não existe ar passando através do indicador elétrico de atitude, não há a necessidade de filtros de ar, de reguladores, de tubulações e de bombas de vácuo. A contaminação por sujeira do ar, nesse giroscópio, não é um problema, o que acarreta, potencialmente, vida mais longa para os rolamentos e menos precessão. Os mecanismos de abertura de correção não são utilizados, então a resposta das ventoinhas à força centrífuga é eliminada.

Ainda é possível que o giroscópio experimente precessão e necessidade de ser reerguido. Isso é feito com ímãs em vez de janelas de ventilação. Um ímã ligado ao topo do eixo do giroscópio gira, aproximadamente, a 21.000 RPM. Ao redor desse ímã, mas não ligado a ele, há uma luva que gira por atração magnética do campo por ele (Figura 191), na faixa de, aproximadamente, 44 a 48 RPM. Na luva, há algumas esferas de aço, que ficam livres para se movimentar ao redor dela. Se a ação da força da gravidade não estiver alinhada ao eixo do giroscópio, as esferas caem para o lado mais baixo. A precessão resultante desse movimento das esferas realinha o eixo na rotação vertical.

Os indicadores de atitude elétricos são travados manualmente por um mecanismo de alavanca e came, para promover rápido erguimento do rotor à posição vertical. Quando o instrumento não está recebendo potência, o suficiente para uma operação normal, uma bandeira indicando **off** aparece na parte superior direita do instrumento.

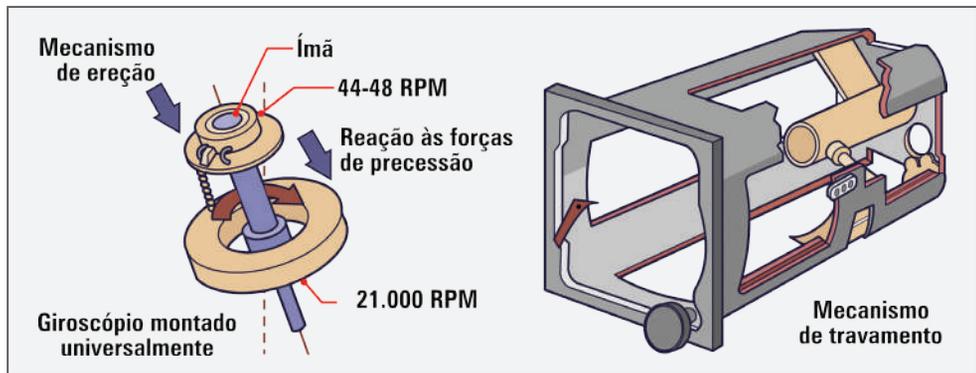


Figura 191 - Mecanismos de reerguimento e de travamento do rotor do giroscópio

6.3.3 Giroscópio direcional

O giroscópio indicador de direção, ou giroscópio direcional, em inglês, *directional gyroscope* (DG), é o principal instrumento para direção. Em função da intensa flutuação da bússola magnética, um giroscópio é alinhado a ela para proporcionar uma indicação de direção mais estável. Os indicadores de direção giroscópicos ficam localizados na posição central do painel básico (T) de instrumentos de voo analógico (Figura 192).



Figura 192 - Instrumentos primários de voo

Um giroscópio direcional movido a vácuo é comum em muitas aeronaves leves. Sua base para operação é a rigidez do giroscópio no espaço. O rotor do giroscópio gira em um plano vertical e fica alinhado à direção para a qual foi ajustado. A aeronave e a caixa do instrumento se movem ao redor do giroscópio rígido. Isso faz com que uma rosa dos ventos vertical, conectada ao conjunto de suspensão do rotor, se mova. A escala do instrumento é calibrada em graus e as marcações são indicadas a cada 30 graus. O nariz de um avião miniatura indica a direção da aeronave.

Os indicadores de direção movidos a vácuo apresentam muitas das questões que envolvem os instrumentos giroscópicos básicos, como o utilizado nos indicadores de atitude. A compensação embutida para precessão é realizada de várias maneiras e um dispositivo de travamento é empregado. Um realinhamento manual periódico, feito pelo piloto, com a bússola magnética, é necessário durante o voo.

6.3.4 Coordenador de curva

Existem dois tipos de indicadores de curva em aeronaves, são eles: o de curva e inclinação, em inglês, *turn and bank indicator* (TB), e o coordenador de curvas, em inglês, *turn coordinator* (TC). Ambos são instrumentos giroscópicos e sinalizam a razão da curva. Entretanto, o coordenador de curva também aponta a razão de rolamento ou giro da aeronave.

O indicador de curva e inclinação possui um mostrador com um ponteiro ou agulha na face do instrumento, enquanto o coordenador de curva tem uma miniatura de aeronave. As Figuras 193.A e 193.B exemplificam, para comparação, os dois instrumentos.



Figura 193.A - Indicador de curva e de inclinação



Figura 193.B - Coordenador de curva

Nenhum desses instrumentos fornece uma indicação direta do ângulo de inclinação. Para isso, é necessário o valor da velocidade da aeronave e a razão da curva para calcular o ângulo de inclinação, ou ter um indicador de atitude.

Atualmente, são percebidos mais e mais painéis equipados com sistemas eletrônicos de instrumentos de voo (EFIS), nos quais o coordenador de curva original e o indicador de curva e inclinação são usados como instrumentos reserva, em caso de falha.

Muitas aeronaves utilizam o coordenador de curvas. Nele, o rotor do giroscópio é inclinado em mais de 30°. Dessa forma, ele responde não apenas ao movimento sobre o eixo vertical, mas, também, ao de rolamento sobre o eixo longitudinal. Esse recurso é útil porque é necessário girar a aeronave para virá-la sobre seu eixo vertical. A indicação de rolamento do instrumento, assim, é o alerta mais precoce possível sobre a alteração de um voo nivelado em linha reta.

6.3.5 Indicador de curva e derrapagem

O indicador de curva e derrapagem também é chamado de indicador de curva e inclinação (TB) ou indicador de pau e bola. Ele mostra a correta execução de uma curva, durante a inclinação da aeronave e aponta o movimento em relação ao eixo vertical (guinada). A maioria dos instrumentos desse tipo está localizada abaixo do indicador de velocidade, no painel básico (T) de instrumentos primários de voo analógicos, logo à esquerda do indicador de direção.

Esse indicador, na verdade, são dois dispositivos separados na mesma caixa: um ponteiro de indicador de curva e uma esfera do indicador de derrapagem, por isso, é conhecido como pau e bola. O ponteiro é operado por um giroscópio que pode ser movimentado a vácuo, pressão de ar ou eletricidade. A esfera é um dispositivo completamente independente. Ela é uma ágata redonda, ou uma esfera de aço, em um tubo de vidro cheio com um fluido de amortecimento. Ela se move em resposta à ação da gravidade e à força centrífuga verificada nas curvas.

Existem diferentes modelos de indicadores de curva. Todos eles informam a razão na qual a aeronave está virando uma curva. Por exemplo: três graus por segundo fazem com que a aeronave execute uma volta de 360° em dois minutos ($360/3 = 120$ segundos). Tal manobra é considerada uma curva padrão. É possível essa razão ser indicada por meio de marcações no lado esquerdo e direito do ponteiro, que, normalmente, repousa na posição vertical.

Algumas vezes não existem marcações e a largura do ponteiro é usada como um dispositivo de calibragem. Nesse caso, a largura do ponteiro de deflexão vertical é igual a três graus por segundo (razão de curva padrão, realizada em dois minutos). As aeronaves mais rápidas tendem a fazer curvas mais lentas, dessa forma, o indicador possui graduações ou marcações que sinalizam curvas de quatro minutos. Em outras palavras, a largura do ponteiro, ou o alinhamento com a marcação de graduação, neste instrumento, indica que a aeronave está realizando a curva a 1,5° por segundo e que a manobra completa de 360° dura quatro minutos. É comum a identificação na face dos instrumentos informando se o indicador é de dois ou de quatro minutos, conforme se vê nas Figuras 194 e 195.



Figura 194 - Indicador de curva e de derrapagem com calibragem de dois minutos

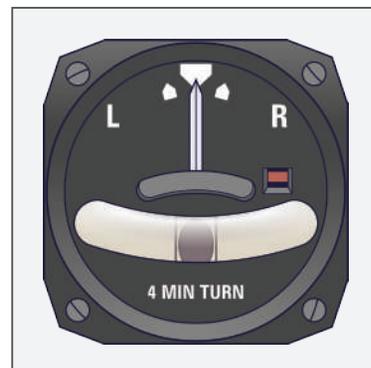


Figura 195 - Indicador de curva e de derrapagem com calibragem de quatro minutos

O ponteiro de curva aponta a razão na qual uma aeronave está virando em relação ao seu eixo vertical. Isso é feito usando-se a pressão de um giroscópio para inclinar um ponteiro. O giroscópio gira em um plano vertical, alinhado ao eixo longitudinal da aeronave. Quando a aeronave gira em relação ao seu eixo vertical, durante uma curva, a força experimentada pelo giro do giroscópio é exercida sobre o eixo vertical.

Em virtude da precessão, a reação do rotor do giroscópio é efetivada a 90°, além da atuação da força defletiva sobre o giroscópio, na direção do giro. Isso significa que a reação da força ao redor do eixo vertical é o movimento ao redor do eixo longitudinal da aeronave (Figura 196). Isso provoca a inclinação da parte superior do rotor para a direita ou para esquerda. O ponteiro é conectado por meio de um dispositivo de ligação, que produz a inclinação deste para a direção oposta, indicando a direção da curva da aeronave. Dessa forma, a curva da aeronave sobre seu eixo vertical é indicada em um eixo longitudinal do mostrador. Isso é intuitivo ao piloto quando observa o instrumento, porque o ponteiro sinaliza a mesma direção da curva.

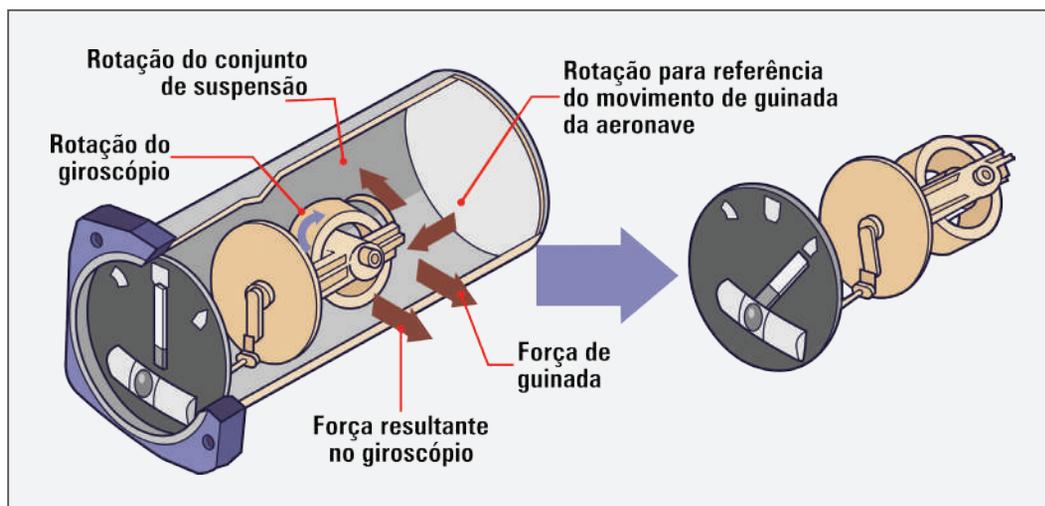


Figura 196 - Reação do mecanismo do rotor durante uma curva à direita

O indicador de derrapagem (esfera), que faz parte do instrumento, é um **inclinômetro**. A esfera se movimenta ao sabor da força da gravidade durante voo reto e nivelado. Assim, ela descansa na parte mais baixa de um vidro curvo entre as faixas de referência. Quando uma curva é iniciada e a aeronave está inclinada, tanto a gravidade quanto a força centrífuga da curva agem sobre a esfera. Se a curva é coordenada ela permanece no lugar. Se houver uma **curva derrapada**, a força centrífuga será maior que a gravidade na esfera e essa se move para fora da curva. Durante uma **curva glissada**, há mais inclinação do que a necessária para realizar a curva e a gravidade agindo na esfera é maior do que a força centrífuga. Esta, então, se move no



Inclinômetro: instrumento utilizado para medir ângulos de inclinação e elevação.

Curva derrapada: curva plana, com falta de inclinação nas asas, como se o piloto estivesse tentando fazer a curva usando apenas os pedais.

Curva glissada: curva feita com asas muito inclinadas, como se o piloto estivesse tentando fazê-la usando só os *aileron*s, esquecendo-se de executar o movimento de cabragem.

vidro curvado em direção à parte interna da curva.

As Figuras 197.A, B e C exemplificam os mostradores do indicador de curva e de derrapagem durante as manobras de curva coordenada, com derrapagem e com glissagem. Nelas, também se observa a posição do leme da aeronave durante as manobras, pois o acionamento a mais ou a menos dessa superfície de comando gera derrapagem ou glissagem na curva.

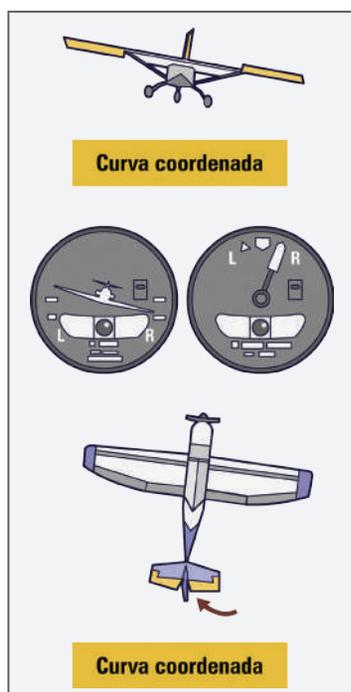


Figura 197.A - Curva coordenada

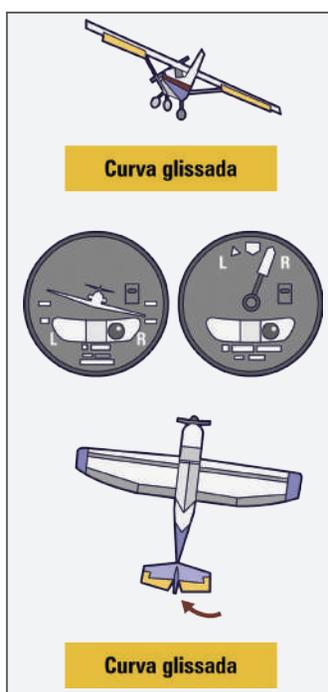


Figura 197.B - Curva com derrapagem

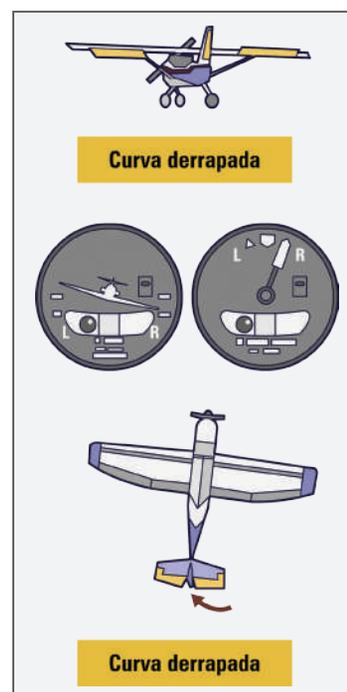


Figura 197.C - Curva com glissagem

Com frequência, a fonte de alimentação para o giroscópio indicador de curva e de derrapagem é elétrica, enquanto os indicadores de direção são movidos a vácuo. Isso permite uma operação limitada com bateria se os sistemas de vácuo ou energia elétrica falharem. As informações direcionais e de atitude do indicador de curva e inclinação, combinadas com os dados dos instrumentos de *pítot*-estático, permitem a operação contínua em caso de emergência na aeronave.

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que os equipamentos giroscópicos são muito importantes para o voo das aeronaves, uma vez que três dos seis instrumentos primários de voo usam giroscópicos para fornecer aos pilotos informações de voo críticas sobre a atitude, o rumo e a razão de curva e de derrapagem da aeronave.

Foram estudadas as principais características de um giroscópio que o tornam adequado para uso em instrumentos de atitude. Entre elas, está sua capacidade de rigidez no espaço, em virtude da rotação de seu disco, a despeito dos movimentos da aeronave em torno do eixo do

rotor do giroscópio e da precessão, que é a inclinação do eixo do rotor, como resultado da ação de forças externas no rotor.

Foram abordadas as várias fontes de energia que alimentam os giroscópicos, tais como o vácuo, a pressão de ar e a energia elétrica. Além dos giroscópicos de estado sólido, que utilizam componentes eletrônicos. Também foi destacado que há limitações nos giroscópios mecânicos, como, por exemplo, a tendência de precessão em virtude da fricção dos rolamentos do rotor e que tal deficiência foi contornada por soluções distintas nos sistemas a vácuo e no elétrico.

Foi destacado que as aeronaves modernas fazem uso de dispositivos direcionais e de atitude formados por componentes de estado sólido, altamente precisos e sem partes móveis, tais como o giroscópio de anel laser. Foi dito que o princípio de funcionamento desse giroscópio se baseia na característica de a luz levar mais tempo para completar um mesmo circuito se a trajetória estiver girando na mesma direção em que a luz está se deslocando. E leva menos tempo para completar a jornada se a trajetória estiver rodando na direção oposta à da luz. A trajetória fica mais curta ou mais longa dependendo da rotação do trajeto, isso é conhecido como efeito Sagnac.

Nesse contexto, viu-se que os sistemas microeletromecânicos (MEMS) poupam espaço e peso na aeronave e que, através deles, a confiabilidade é aumentada principalmente devido à falta de partes móveis, além de sua utilização na instrumentação de aviação integrada com o uso dos computadores de dados anemométricos (ADC).

Por fim, foi salientado que, nas aeronaves modernas, os sistemas de referência de atitude e de orientação (AHRS) tomaram o lugar do giroscópio e de outros instrumentos individuais. Ademais, nesse sistema, os dispositivos MEMS proporcionam parte da informação de atitude, que se junta às informações do GPS, do magnetômetro de estado sólido, do acelerômetro de estado sólido e dos sinais de dados digitais do ar para serem combinadas e processadas no AHRS.

Capítulo 7

Sistema de piloto automático

O sistema de piloto automático (PA) é formado por equipamentos que permitem corrigir desvios de rota e de atitude, assegurando a manutenção da aeronave na rota desejada sem intervenção da tripulação. As aeronaves mais antigas utilizam uma série de aparelhos mecânicos para transmitir informações a um computador de bordo, possibilitando a navegação sem o comando do piloto. Nos aviões mais modernos, são empregados equipamentos e sensores eletrônicos, que se comunicam com os computadores, permitindo a realização de muito mais tarefas do que manter o avião na rota selecionada.

Os sistemas de PA mantêm a atitude da aeronave e a direção, de modo que, se por algum motivo ela for deslocada de sua rota ou de sua atitude, eles a retornam à condição determinada pelo piloto. Os sistemas de piloto automático são capazes de manter a aeronave estabilizada lateral, vertical e longitudinalmente.

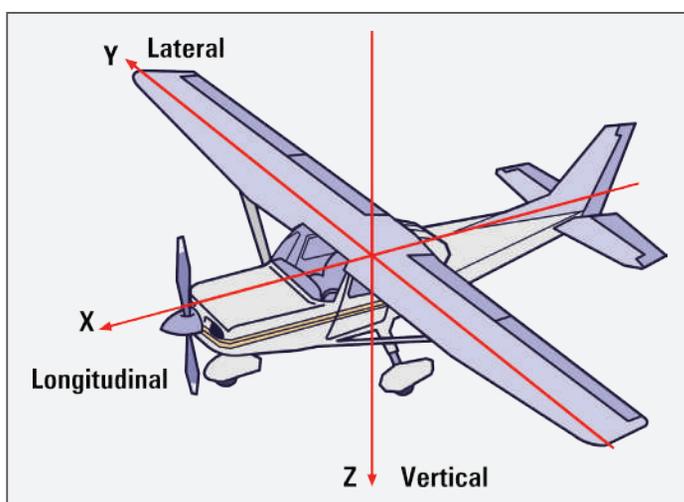


Figura 198 - Três eixos de referência de voo das aeronaves

O foco principal desse sistema é reduzir a carga e a tensão de trabalho, além da fadiga da tripulação por controlar uma aeronave em voos longos. Normalmente, há dois modos de operação dos sistemas PA: automático e manual. No primeiro, o piloto seleciona a atitude e a direção desejadas para determinado trecho do voo, e o piloto automático assume o comando da aeronave, movendo as superfícies de controle para atingir e manter os parâmetros selecionados. No segundo, o piloto seleciona cada manobra e faz pequenas intervenções em um controlador do piloto automático. O sistema move as superfícies de controle da aeronave para realizar a manobra.

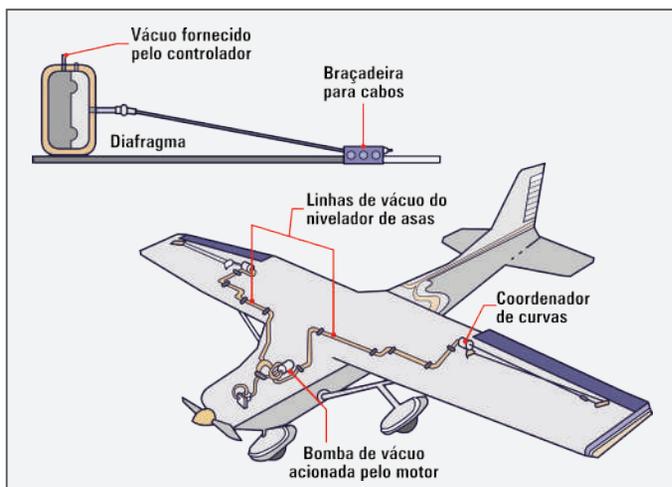


Figura 199 - Sistema nivelador de asas em uma aeronave leve

Existe uma variedade de sistemas, com maior ou menor quantidade de recursos, de maneira que há aeronaves equipadas com PA que gerencia de um a três eixos de controle do avião. Nas aeronaves leves, se verifica o piloto automático de um eixo, que gerencia o eixo lateral, por meio de acionamento dos *aileron*s. Esse sistema é conhecido como nivelador de asas, pois, ao controlar o movimento de rolagem, ele mantém as asas da aeronave niveladas, de acordo com a Figura 199.



Aileron: partes móveis dos bordos de fuga das asas de aeronaves que servem para controlar o movimento de rolamento da aeronave.

Os sistemas de dois e de três eixos são encontrados em aeronaves de todos os tamanhos. O de dois eixos controla os *aileron*s e os profundores, enquanto o de três eixos controla os *aileron*s, os profundores e o leme de direção. As Figuras 200.A, B e C relacionam os movimentos da aeronave às superfícies de comando que as dão origem. O PA atua nessas superfícies para manter e corrigir a atitude da aeronave.

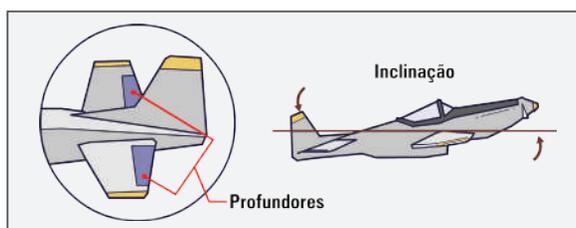


Figura 200.A - Profundores e movimento de arfagem

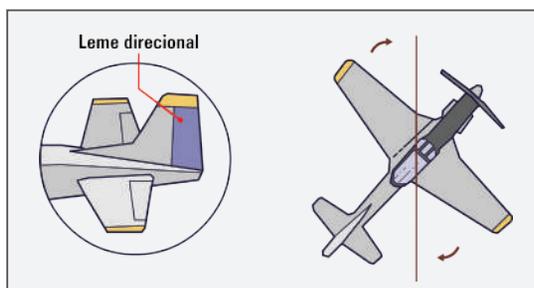


Figura 200.B - Leme de direção e movimento de guinada

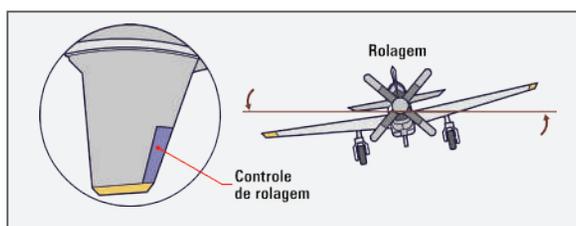


Figura 200.C - Ailerons e movimento de rolagem ou *tonneau*

Mesmo nos sistemas mais simples que equipam aeronaves leves, é comum a integração das funções de navegação. Os pilotos automáticos estão cada vez mais complexos, não apenas comandando as superfícies de controle, mas, também, outros parâmetros de voo. Algumas pequenas aeronaves modernas de alto desempenho, assim como da categoria de transporte, dispõem de sistemas de piloto automático sofisticados, conhecidos como sistema de controle de voo automático, em inglês, *automatic flight control systems* (AFCS). Esses sistemas de três eixos vão muito além de manobrar a aeronave. Eles a controlam em subidas, descidas, cruzeiro e aproximação para o pouso. Alguns sistemas integram uma função de manete de potência automático que controla o empuxo do motor, tornando o pouso com piloto automático possível.

A integração de sistemas permitiu a incorporação de mais controles automáticos confiáveis ao sistema de gerenciamento de voo. O emprego de computadores permite a programação antecipada de todo o perfil do voo, cabendo ao piloto a tarefa de supervisionar a execução. Um computador do sistema de gerenciamento de voo (Figura 201), em inglês, *flight management system* (FMS), coordena quase todos os aspectos de voo, incluindo o piloto automático, o sistema de manete de potência automático, a seleção da rota de navegação, os esquemas de gerenciamento de combustível, e muito mais. Como se conclui, o piloto automático passou a ser um subsistema de um sistema maior de automação, que é o de gerenciamento de voo.

Nas aeronaves modernas, o piloto automático é, na verdade, um sistema de controle de voo automático, em inglês, *automatic flight control system* (AFCS), que faz parte dos aviônicos de uma aeronave. Esse sistema, além de permitir o controle do voo, dispõe de sistemas eletrônicos para comunicação, navegação, prevenção de colisões e condições climáticas. Sistemas de PA avançados fazem muito mais que isso, realizando até manobras altamente precisas, como pousar uma aeronave em condições de visibilidade zero.



Figura 201 - Sistema de gerenciamento de voo (FMS) dual
Fonte: Agência Força Aérea Brasileira / © Sgt. Bruno Batista

7.1 Bases para a operação do piloto automático

Com vistas a entender o funcionamento básico do piloto automático, é preciso ter em mente que ele se utiliza de parâmetros para conduzir a sua ação. Se os parâmetros estão de acordo com a atitude selecionada para o voo, ele não age, pois significa que a aeronave está com a atitude e a direção desejadas. Porém, se o sistema recebe parâmetros diferentes, ele considera a informação como um erro, e age para que esse erro seja corrigido. Assim, a operação de um sistema de piloto automático é, basicamente, a correção de erros, que representa as ações do PA para que a aeronave retorne à atitude determinada pelo piloto. Nesse cenário, quando uma aeronave não executa a condição selecionada, diz-se que ocorreu um erro, o qual tem de ser corrigido automaticamente pelo piloto automático. Para tanto, há duas formas básicas de os pilotos automáticos modernos executarem essa tarefa, uma é baseada na posição e a outra, na razão de movimentos da aeronave. A primeira forma atua para manter determinada posição atribuída à aeronave pelo piloto, enquanto a segunda monitora as alterações dos comandos de voo, agindo de forma contrária para que a atitude de voo anterior seja retomada.

O sistema baseado na posição manipula os controles das superfícies de comando, de forma que qualquer desvio da atitude desejada seja corrigido. Essa tarefa é executada por meio da memorização da atitude desejada da aeronave e a movimentação das superfícies de controle de modo que a aeronave retorne à atitude selecionada, quando ocorrem desvios. No sistema baseado na razão dos movimentos da aeronave, são utilizadas as informações sobre o movimento desta para acionar as superfícies de controle em oposição à razão de variação que causou o erro. A maioria das aeronaves grandes usa esse sistema de piloto automático. Aeronaves pequenas usam ambos. A Figura 202 ilustra o funcionamento do controle do leme de direção pelo sistema de piloto automático. Nela, vê-se que o processador recebe informações tanto dos sensores quanto do piloto, a partir das quais atua nos servos do leme para manter a atitude selecionada.

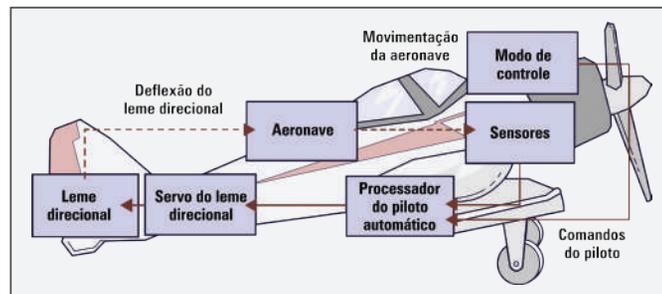


Figura 202 - Comando do piloto automático para o leme de direção

7.2 Componentes do sistema

Os sistemas de piloto automático são compostos de quatro grupos principais de componentes (Figura 203), divididos segundo a função desempenhada. Eles são os elementos de sensoriamento, de computação, de saída e de comando. Muitos sistemas avançados de piloto automático dispõem do quinto elemento, chamado de *feedback*, o qual consiste na utilização de sinais de

correção pelos elementos de saída para informar ao piloto automático sobre o andamento da operação de correção de atitude conduzida por ele. Esse processo será explicado mais adiante.

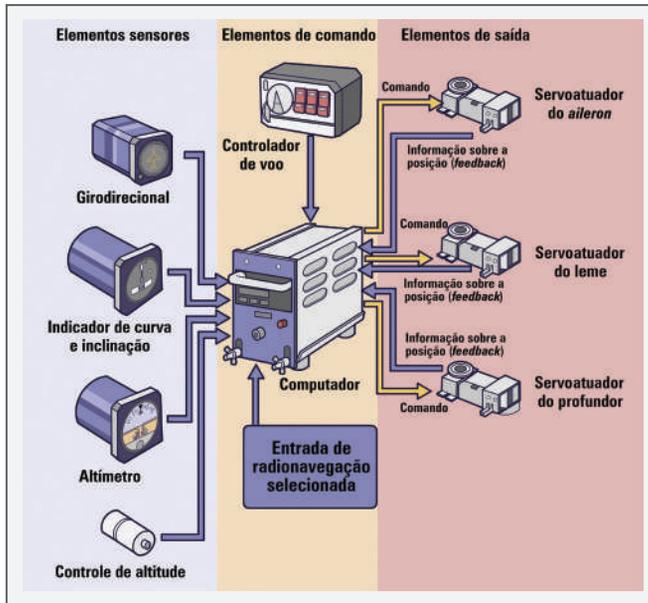


Figura 203 - Componentes do piloto automático

7.2.1 Sensores do sistema

Uma das etapas mais importantes para o controle automático da atitude de uma aeronave é o monitoramento dos movimentos dela para que o processador do piloto automático possa gerenciar a atitude selecionada pelo piloto. Para tanto, o sistema é equipado com giroscópio direcional e de atitude, com coordenador de curva e com controle de altitude, os quais exercem a função de sensores do sistema de piloto automático. Assim, eles percebem os movimentos da aeronave e os transmitem sob a forma de sinais elétricos para o computador do sistema, que processa as informações e, automaticamente, providencia as ações corretivas necessárias a manter a aeronave em voo, conforme planejado. Os sensores dos giroscópios localizados remotamente na aeronave acionam o servomotor do indicador no painel da cabine, assim como fornecem sinais de entrada para o computador do piloto automático.

As aeronaves modernas são equipadas com sistemas digitais de piloto automático que usam uma série de sensores fabricados com diferentes tipos de semicondutores. Tais sensores são caracterizados pela elevada confiabilidade, pequenas dimensões e baixíssimo peso. Os giroscópios de sistema microeletromecânico (Figura 204), em inglês, *micro electromechanical system* (MEMS), são utilizados isoladamente ou acompanhados por acelerômetros e magnetômetros de estado sólido. Diversos sensores de entrada estão localizados em uma mesma unidade, ou em unidades separadas, interligadas por um barramento de dados digitais, pelos quais circulam as informações do sistema. A navegação da informação também é integrada, através de uma conexão de barramento de dados digitais para os computadores aviônicos. Destaca-se que os pilotos automáticos baseados na razão dos



MEMS: sistema microeletromecânico; dispositivos formados pela integração de elementos mecânicos, sensores, atuadores e eletrônica em uma pastilha comum de silício, com a tecnologia de microfabricação.

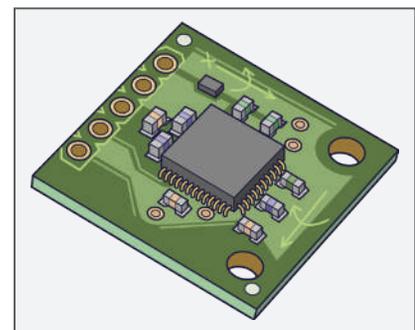


Figura 204 - Giroscópio MEMS

movimentos podem não usar giroscópios, o que faz com que os sensores de estado sólido sejam mais adequados para esse sistema.

7.2.2 Computador e amplificador

O elemento de computação de um piloto automático pode ser analógico ou digital. Sua função é interpretar os dados fornecidos pelos elementos sensores, integrar comandos e entradas de navegação, além de enviar sinais para os elementos de atuação para movimentar os controles de voo, com o fim de manter a aeronave na direção e na atitude desejadas. Um amplificador é utilizado para reforçar o sinal dos sensores antes do processamento, caso necessário, e para uso dos dispositivos de saída, tais como os servomotores. O amplificador e os circuitos associados são o computador de um sistema de piloto automático analógico. A informação é manipulada em canais correspondentes ao eixo de controle para o qual os sinais são destinados (por exemplo: canal de arfagem, canal de rolamento ou canal de guinada).

Nos sistemas digitais, o núcleo do sistema de controle de voo automático consiste em um computador com vários processadores de alta capacidade de processamento que reúnem as informações requeridas para controlar a aeronave. Os processadores se comunicam com os sensores localizados nas principais superfícies de controle. Nessa configuração, o computador recebe os dados de entrada fornecidos pelos sensores, efetua complexos cálculos, comparando-os com o conjunto de modos de controle, e gera os sinais de saída para acionar os atuadores das superfícies de controle de voo. Esse conjunto de modos é a configuração de voo inserida pelo piloto no sistema. Nele há um modo de controle que define a altitude em que a aeronave precisa ser mantida assim como a velocidade, a direção e o percurso a serem cumpridos.

7.2.3 Elementos de saída do sistema

Esses elementos são representados pelos servomotores que recebem os sinais processados pelo computador para acionar uma determinada superfície de comando. Eles são dispositivos independentes para o acionamento de cada um dos canais de controle que integram o sistema regular de controle de voo.



Fly-by-wire: tipo de controle das superfícies móveis de um avião por computador, permite que qualquer modificação da direção e do sentido de uma aeronave feita pelo piloto seja filtrada e repassada para as superfícies móveis: *aileron*, profundor e leme; com ele, é possível aumentar a velocidade de reação e de manobra de uma aeronave ou impedir que o piloto ultrapasse os limites da célula.

Os atuadores são acionados tanto pelos comandos do piloto quanto pelos do PA. Quando este é ligado, os atuadores respondem aos seus comandos, em vez de responder exclusivamente ao do piloto. De qualquer forma, os servos do piloto automático devem permitir movimentos livres da superfície de comando quando o piloto automático não estiver sendo utilizado.

São vários os tipos de servomotores utilizados pelos sistemas de PA. A aplicação de cada tipo depende do método pelo qual as superfícies de comando de voo são movimentadas. Em algumas aeronaves, esse acionamento é feito por meio de cabos de aço, enquanto em outras é realizado hidraulicamente. Nos sistemas movimentados a cabo, são usados servomotores elétricos ou eletropneumáticos. Nos operados por energia hidráulica, por seu turno, são empregados os servos eletro-hidráulicos. Nas aeronaves com recursos *fly-by-wire*, também são empregados os mesmos atuadores para realizar manobras manuais ou por intermédio do piloto automático.

Existem dois tipos básicos de servomotor elétrico utilizados nas aeronaves, cujas superfícies de controle de voo são acionadas por meio de cabos de aço. Um deles dispõe de um motor conectado ao eixo de saída do servo, por meio de engrenagens de redução (Figura 205.A). Esse motor gira, repousa e inverte o sentido em resposta aos comandos do computador do piloto automático. O outro tipo usa um motor de rotação constante ligado ao eixo de atuação do servo, por meio de duas embreagens magnéticas (Figura 205.B). Estas são dispostas de maneira que, enquanto uma estiver energizada, transmitindo a potência de torque do motor para movimentar o eixo de atuação do servo em uma direção, a outra, ao ser energizada, movimentará o eixo na direção oposta.

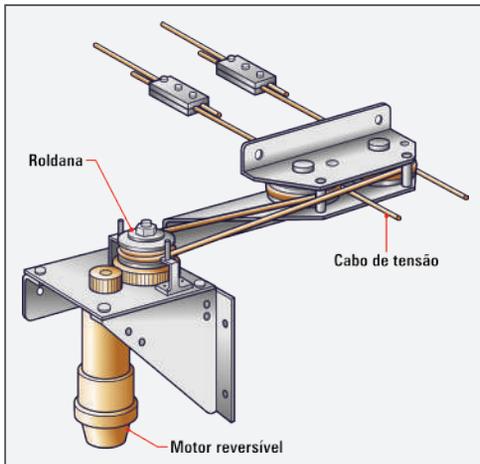


Figura 205.A - Motor reversível com engrenagens de redução

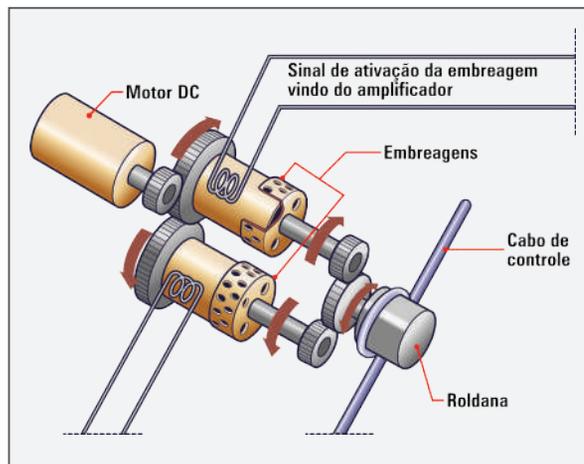


Figura 205.B - Motor de rotação constante ligado ao eixo de atuação por meio de duas embreagens magnéticas

Os servos eletropneumáticos também são usados em alguns sistemas de PA para movimentar superfícies de controles de voo, acionados por meio de cabos. Eles são controlados por sinais elétricos do amplificador do piloto automático e movimentados por uma fonte de pressão de ar apropriada. A fonte pode ser uma bomba de vácuo ou ar sangrado da turbina. Cada servo é composto de um conjunto de válvula eletromagnética e um conjunto de ligação de saída. A Figura 206 explicita um motor eletropneumático utilizado para acionar os atuadores de superfície de comando.

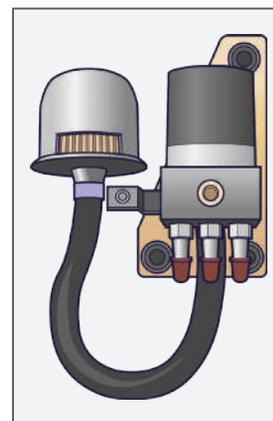


Figura 206 - Motor eletropneumático para acionamento de atuadores

Aeronaves com sistema de controle de voo acionado hidraulicamente dispõem de servos eletro-hidráulicos, os quais têm à disposição válvulas de controle que direcionam a pressão do fluido, segundo a necessidade de se movimentarem os atuadores das superfícies de comando. Tais válvulas são acionadas por meio de sinais do computador do piloto automático. Quando este não está funcionando, os servos permitem que o fluido hidráulico circule

livremente no sistema de controle de voo para a execução das operações normais. As válvulas do servo incorporam transdutores de acompanhamento (*feedback*) para atualizar o piloto automático sobre o progresso da operação durante a correção de erros.

7.2.4 Elementos de comando

À vista do exposto anteriormente, o piloto automático controla o voo da aeronave a partir dos dados selecionados pelo piloto. Dessa forma, o sistema dispõe de uma unidade de comando que faz a interface homem/computador, permitindo que os comandos desejados pelo piloto cheguem ao computador que gerencia o PA. Essa unidade de comando é chamada de controlador de voo (Figura 207) e varia de acordo com a complexidade do sistema de piloto automático.

Ao serem selecionadas as funções desejadas, o piloto faz com que o controlador envie sinais de instruções ao computador do piloto automático, habilitando-o a ativar os servos apropriados para realizar os comandos. A unidade de comando oferece uma série de programações, entre as quais o piloto escolhe aquela que melhor atenda ao voo. Assim, ele seleciona o nível de voo, as subidas, as descidas, a direção ou outra determinada manobra. Muitas aeronaves fazem uso de diversos auxílios de radionavegação, que são selecionados para emitir comandos diretamente do computador do piloto automático.



Figura 207 - Controlador de voo de sistema de piloto automático simples

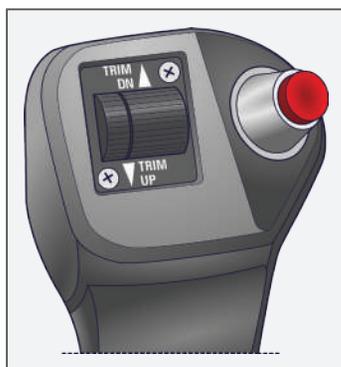


Figura 208 - Interruptor (vermelho) de desconexão do piloto automático

O controlador dispõe de um interruptor para ligar e desligar o sistema de PA. Entretanto, na maioria das aeronaves, há um botão de desconexão de PA localizado no manche (Figura 208). Esse comando é disponibilizado para que o piloto possa assumir o controle da aeronave, caso haja alguma ocorrência anormal com o voo. Esse recurso é muito importante, haja vista que determinadas falhas impõem sérias cargas de aceleração à tripulação e dificultam a ação do piloto para acessar o painel. Esse interruptor é facilmente acionado pela pressão do dedo polegar.

7.2.5 Elementos de realimentação de informação

Tendo em vista que o sistema de piloto automático atua sobre as superfícies de comando de voo para atingir a atitude desejada, logo, ele precisa diminuir a correção do movimento da superfície, quando essa atitude for quase atingida. Se isso não for feito, o sistema continuamente executará correções. Em outras palavras, o acionamento da superfície de comando de voo deve ser efetivado de maneira que ele seja reduzido suavemente até atingir a posição desejada. Caso contrário, a superfície de controle ultrapassa a posição desejada, fazendo com que uma nova correção seja realizada.

Diante desse cenário, o computador do PA precisa ser informado sobre a variação da posição da superfície de controle, no período em que ele aciona os servomotores, para que possa modificar gradativamente a posição dessas superfícies. Essa informação é disponibilizada por meio da geração de diversos sinais elétricos de *feedback*, ou de realimentação de informação, que reduzem progressivamente a mensagem de erro (posição da superfície diferente da prevista no PA) ao piloto automático para que a correção contínua não aconteça.

Para entender o funcionamento do sistema de acompanhamento ou *feedback*, é apresentado este exemplo hipotético: o computador do PA precisa manter o leme de direção durante determinado tempo em 5° à direita. Ele emite sinais para o atuador mover o leme até atingir esse ângulo. À medida que o atuador age, movendo o leme, sinais de erros gradativos são transmitidos ao computador. Seria, resumidamente, da seguinte maneira: a primeira mensagem de *feedback* seria a de ângulo do leme em 2° (erro); em seguida, ângulo do leme em 4° (erro); e a última mensagem da operação, ângulo do leme em 5° (confirma). Nesse momento, o computador para de enviar sinais para o atuador, que mantém a sua posição.

A tarefa de enviar tais mensagens de acompanhamento é desempenhada por transdutores instalados nos atuadores das superfícies de comando de voo, ou nas unidades servo do piloto automático. À medida que a posição da superfície muda, os transdutores a informam ao computador do PA. A realimentação de informação (*feedback*) completa um ciclo até a conclusão do movimento da superfície de comando. Nesse período, o sinal elétrico de acompanhamento percorre o circuito para informar a situação da operação acionada pelo piloto automático.

A Figura 209 ajuda a compreender a operação apresentada. Nela, observa-se que o sinal que deu origem à ação do computador foi transmitido pelo instrumento giroscópico da aeronave. A aeronave se afastou da atitude selecionada no PA. Logo, o sinal foi interpretado como erro pelo computador, levando-o a acionar o atuador.

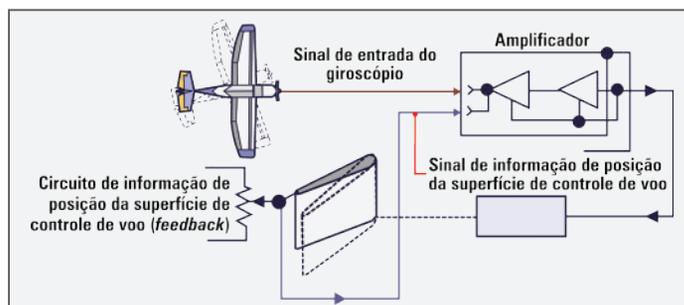


Figura 209 - Esquema básico de funcionamento de um sistema de PA analógico com sinais de *feedback*

7.3 Funções do piloto automático

Neste tópico, as informações sobre o funcionamento do sistema serão aprofundadas, com o fim de apresentar uma visão mais detalhada sobre a função de cada componente no sistema de PA. Em face da grande variedade de sistemas, serão apresentadas as principais funções de um piloto automático analógico simples. A maioria dos pilotos automáticos dispõe de muito mais recursos, porém muitos fundamentos de operação são similares.

O sistema de piloto automático comanda a aeronave por meio de sinais elétricos produzidos em unidades giroscópicas sensoras. Essas unidades estão conectadas a instrumentos de voo, que indicam a direção, a velocidade angular da curva e os movimentos de inclinação e de arfagem. Se houver mudança na atitude de voo ou proa magnética, sinais elétricos são produzidos no giroscópio e transmitidos ao computador/amplificador do piloto automático. Nele, os sinais são usados para controlar as operações dos servomotores. Há um servo para cada um dos três canais de controle. Ele converte sinais elétricos em força mecânica para movimentar a superfície de controle de voo, em resposta aos sinais corretivos ou ao comando do piloto. Cabe lembrar que, nos sistemas de PA analógicos, existe um canal de controle para cada um dos eixos de movimento da aeronave.

O canal do leme recebe dois sinais que determinam quando e o quanto o leme deve se movimentar. O primeiro sinal é um de curso, derivado do sistema de bússola. Durante o tempo em que a aeronave mantiver a direção magnética, na qual estava, no momento em que o piloto automático foi acionado, nenhum sinal será desenvolvido. Entretanto, qualquer desvio da atitude da aeronave faz com que o sistema da bússola envie um sinal para o canal do leme que é proporcional ao deslocamento angular da aeronave em relação à direção selecionada. Ou seja, ao acionar o PA em voo, ele mantém o regime de voo vigente no momento em que foi ligado.

O segundo sinal é o de variação, que fornece informações sobre qualquer movimento que a aeronave esteja realizando em torno de seu eixo vertical. Essa informação é dada pelo giroscópio do indicador de curva e inclinação. Quando a aeronave tenta sair do curso, o giroscópio de variação de direção desenvolve um sinal proporcional ao tamanho do deslocamento. Os dois sinais são enviados ao canal do leme do amplificador, onde são combinados e sua potência aumentada. Salienta-se que o sistema adotado como referência é analógico, equipado com amplificador, em vez de computador.

O sinal amplificado é, então, enviado ao servo do leme, que movimenta o leme na direção adequada para retornar a aeronave ao direcionamento magnético selecionado. Com o movimento da superfície do leme, um sinal de *feedback* é produzido, opondo-se ao sinal de entrada. Quando os dois sinais são iguais em magnitude, o servo para de se movimentar. Quando a aeronave chega ao seu curso, o sinal de curso atinge o valor zero e o leme retorna para a posição aerodinâmica pelo sinal do *feedback*.

O canal do *aileron* recebe seu sinal de entrada do transmissor localizado no horizonte artificial. Qualquer movimento da aeronave em seu eixo longitudinal faz com que a unidade

de sensoramento do giroscópio desenvolva um sinal para corrigir o movimento. Esse sinal é amplificado, a fase detectada e enviado ao servo do *aileron*, que movimenta as superfícies de comando do *aileron* para corrigir o erro. Com o movimento das superfícies de controle, o sinal de *feedback* aumenta em oposição ao sinal de entrada. Quando os dois sinais se equivalem em magnitude, o servo para de se movimentar. Como os *ailerons* estão aerodinamicamente deslocados, a aeronave agora começa a se movimentar em direção ao nível de voo, com o sinal de entrada se tornando menor, o sinal de *feedback* passa a movimentar as superfícies do *aileron* de volta à posição aerodinâmica. Quando a aeronave tiver retornado à atitude de voo nivelada, o sinal de entrada será novamente zero.

Os circuitos do canal do profundor são similares àqueles do canal do *aileron*, com a exceção de que este detecta e corrige mudanças na atitude de arfagem da aeronave.

Resumindo

Neste capítulo, estudou-se o sistema de piloto automático, cuja função principal é controlar a aeronave sem que o piloto esteja diretamente manobrando os comandos. Tal sistema permite reduzir a tensão de trabalho e a fadiga no controle de uma aeronave em voos longos.

Foi explicado que esse sistema comanda a aeronave em relação a um, dois ou três eixos de movimento. Os sistemas que controlam apenas um eixo atuam somente nos *ailerons* e são conhecidos como sistemas niveladores de asas, normalmente, encontrados em aeronaves leves. Os de dois eixos atuam nos *ailerons* e profundores. Por fim, os que controlam três eixos atuam nos *ailerons*, nos profundores e no leme de direção.

Foi destacado que o sistema de piloto automático analógico comanda a aeronave por meio de sinais elétricos produzidos em unidades giroscópicas sensoras, conectadas a instrumentos de voo, que indicam a direção, a velocidade angular da curva e os movimentos de inclinação e de arfagem. Isso de maneira que, se houver qualquer mudança na atitude de voo ou na proa magnética, sinais elétricos são produzidos no giroscópio, enviados para o computador/amplificador do piloto automático e usados para controlar a operação dos servomotores.

Em seguida, foi explicitado que o princípio básico para a operação de um sistema de piloto automático é a correção de erro, de modo que, quando uma aeronave não executa a condição desejada de voo, o PA corrige automaticamente o erro e restaura a atitude de voo selecionada pelo piloto.

Em síntese, abordaram-se algumas aeronaves modernas de alto desempenho, as quais dispõem de sistemas de piloto automático sofisticados, de três eixos, conhecidos como sistema de controle de voo automático, em inglês, *automatic flight control systems* (AFCS). Esses sistemas controlam a aeronave em subidas, descidas, cruzeiro e aproximação para o pouso, e, em alguns outros sistemas, a função de manete de potência automático, que controla automaticamente o empuxo do motor, tornando possível o pouso por meio do piloto automático.

Capítulo 8

Sistema de controle e gerenciamento de voo

Uma das tarefas mais desgastantes para um piloto é o monitoramento dos parâmetros dos motores e das informações dos diversos sistemas, principalmente os ligados ao voo e à navegação. Atribuir essa tarefa a sistemas eletrônicos retira da tripulação grande carga de trabalho. Isso é possível com a integração de diversos sistemas gerenciados por computadores que monitoram todos os outros e gerenciam o voo automaticamente. Sem dúvida, é um grande avanço verificado na aviação.

8.1 Sistema automático de controle de voo

De acordo com o capítulo anterior, a principal tarefa dos primeiros pilotos automáticos era estabilizar a aeronave e mantê-la na atitude de voo e no rumo desejados. Com a evolução dos equipamentos aeronáuticos, especialmente com a incorporação de tecnologias eletrônicas e computacionais, permitiu-se a integração de diversos sistemas. O piloto automático passou a contar com muitos recursos e diversos sistemas integrados em um único equipamento, constituindo, assim, o sistema automático de controle de voo, em inglês, *automatic flight control system* (AFCS). Atualmente, não é privilégio das aeronaves de alto desempenho contar com um AFCS, como fora no passado. Com a evolução e expansão da tecnologia digital, é possível encontrá-lo em aeronaves de diversos tipos e tamanhos.

Entre os avanços que vão além dos sistemas comuns de piloto automático estão:

- a extensão da programabilidade;
- o nível de integração dos auxílios à navegação;
- a integração do diretor de voo e do sistema de manete de potência automático;
- a combinação dos elementos de comando de todos esses sistemas em uma única interface integrada de controle humano de voo.

O nível de integração proporcionado por um AFCS permite a atuação do sistema de manete de potência automática em sincronia com o diretor de voo e com os sistemas gerenciados pelo piloto automático. Essa integração possibilita o pouso automático da aeronave, pois a potência desta é modificada em sincronia com as ações de aproximação efetivadas pelo sistema de piloto automático, com base nos sinais de auxílio de aterragem, tais como os do *glide slope* e do localizador ILS. Os recursos dependentes do manete de potência automática não são comuns em aeronaves pequenas de aviação geral produzidas com AFCS.

A Figura 210 mostra o painel de controle de um sistema de controle de voo. Por meio dele, vários sistemas integrados são comandados, tais como diretor de voo, piloto automático, sistema de manete de potência automática e auxílios de navegação.

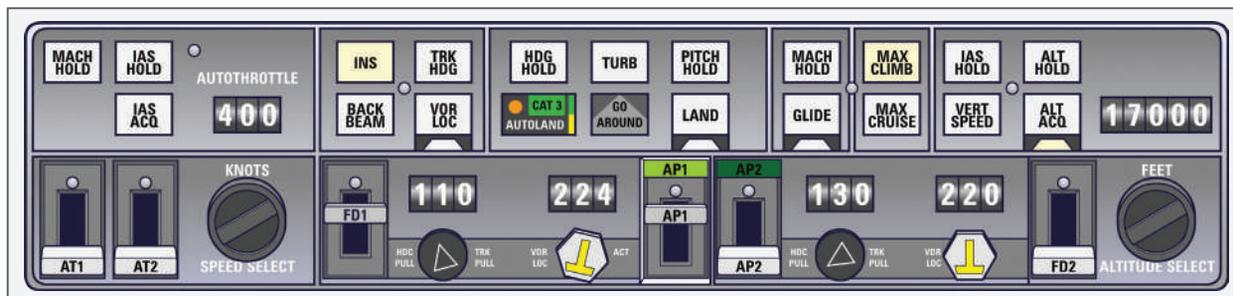


Figura 210 - Painel de controle de um sistema automático de controle de voo

Os AFCS da aviação geral moderna são completamente integrados com o sistema de referência de proa e de atitude, em inglês, *attitude heading and reference systems* (AHRS), e auxílios de navegação. Eles também contêm moderna arquitetura de computadores para o piloto automático que é um pouco diferente dos sistemas analógicos. Isso porque, enquanto nestes há um computador central responsável por gerenciar todas as atividades, no AFCS, as funções são realizadas por diversos computadores inter-relacionados, além de serem incluídos servos inteligentes que realizam alguns cálculos de correção de erro. Esses servos se comunicam com os computadores aviônicos dedicados e com as unidades de computadores de indicação no painel de controle, não existindo um computador central de piloto automático.

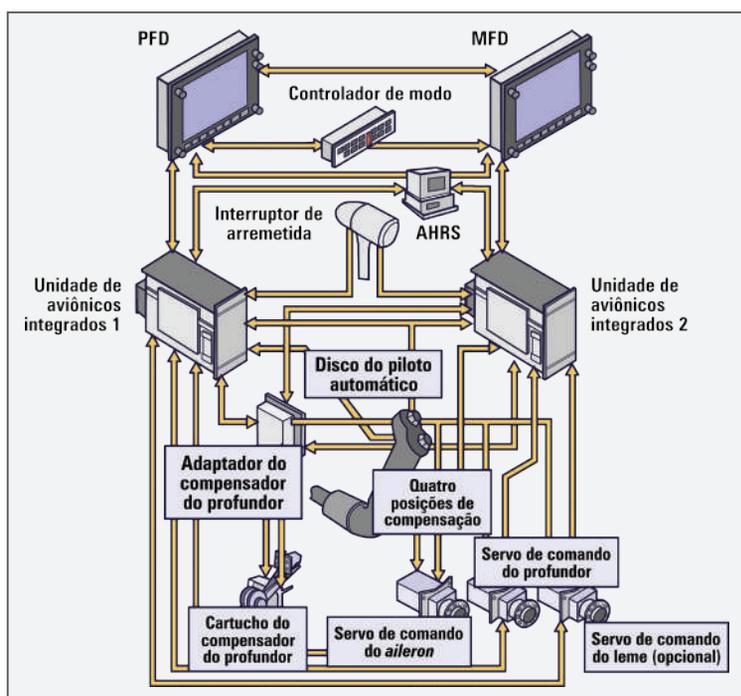


Figura 211 - Sistema automático de controle de voo para aeronaves do tipo geral

O sistema prevê a integração dos sistemas de piloto automático e de diretor de voo. Ele é composto, normalmente, de dois computadores de controle de voo interligados, um piloto automático de três eixos, unidades de compensadores automáticos, uma unidade controladora e vários servos e atuadores. A Figura 211 exemplifica o esquema de relacionamentos entre os componentes do sistema.

O sistema funciona da seguinte maneira:

- o computador de controle de voo, responsável por comandos de orientação de voo para o piloto automático, recebe as seleções de modo de voo feitas pelo piloto no painel do controlador, assim como as informações fornecidas pelos sensores dos sistemas de dados anemométricos, de navegação, de referência de atitude e de

direção, do radioaltímetro e dos sensores de posição superfície de comando de voo;

- o piloto automático fornece os sinais de controle para os servomotores das superfícies de comando de voo (*aileron*, profundores e leme de direção), conforme a necessidade para manter o voo segundo selecionado pelo piloto.

Em suma, o computador de controle de voo recebe a missão atribuída pelo piloto e a executa utilizando as informações recebidas dos sensores dos sistemas gerenciados. Para tanto, ele delega parte da missão ao piloto automático.

Nas aeronaves com piloto automático de dois eixos, o diretor de voo indica aos pilotos os comandos de direção a serem executados, os quais são apresentados por meio de uma barra de comando do diretor de voo, no monitor primário de voo (PFD). Esses comandos fornecem orientação visual para o piloto guiar manualmente a aeronave, tal como definido pelos modos selecionados de operação. Isso ocorre porque, nos sistemas de pilotos automáticos de dois eixos, os movimentos do leme de direção não são automatizados.

8.2 Sistema diretor de voo

É o sistema que mostra ao piloto o rumo a ser mantido, por meio de barras no seu indicador, localizado no monitor primário de voo. Ele, ainda, recebe informações dos comandos de piloto automático, do sistema de gerenciamento de voo (FMS) e marcações de navegação VOR/ILS. É um sistema de instrumentos equipados com componentes eletrônicos que calculam e apontam a atitude necessária da aeronave para atingir e manter uma condição de voo pré-selecionada. As indicações de comando fornecidas pelo computador facilitam sobremaneira a tarefa do piloto em manter a aeronave na proa correta, basta seguir a barra do diretor de voo.

Nesse sistema, todos os sensoriamentos e cálculos são feitos automaticamente, mas o piloto controla o avião e executa as manobras seguindo os comandos exibidos na tela do PFD. Logo, diz-se que o sistema diretor de voo é um piloto automático sem os servos. Ele não controla o voo, mas orienta o piloto como proceder. É certo que, em vez de orientar o piloto, ele fornece as informações a um piloto automático de três eixos para que este assuma o comando do voo. Nesse caso, tem-se um sistema automático de controle de voo. Dessa forma, ele integra o sistema de controle automático de voo ou equipa aeronaves que não possuem pilotos automáticos de controle total. Muitos sistemas de piloto automático permitem a opção de ligar ou de desligar a indicação do diretor de voo.

A informação do diretor de voo é mostrada nos instrumentos que exibem a atitude da aeronave. O processo é realizado com uma técnica de referência visual, semelhante à representação pictorial mecânica empregada no horizonte artificial analógico. Um símbolo representando a aeronave é encaixado em uma barra de comandos, posicionada pelo diretor de voo na localização apropriada para a manobra que será realizada. Os símbolos empregados para representar a aeronave e a barra de comando variam de acordo com o fabricante.

Nas Figuras 212 e 213, vê-se que a barra do diretor de voo é uma referência a ser seguida pela aeronave, representada por outra barra. Na Figura 213, a referência amarela é a barra do diretor de voo, e a rosa representa a aeronave. Basta alinhar as duas barras para posicionar a aeronave com a atitude e o rumo selecionados previamente.

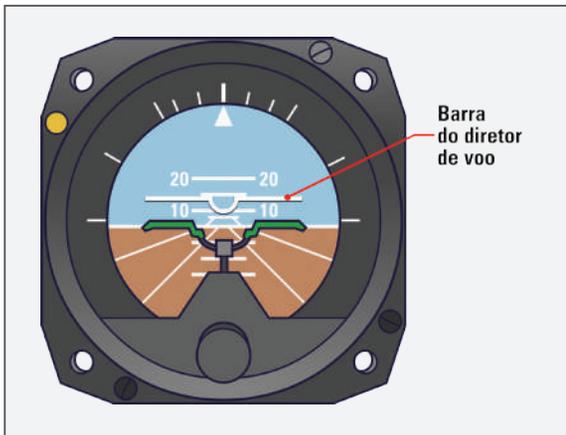


Figura 212 - Indicação da barra do diretor de voo no indicador de atitude analógico



Figura 213 - Indicação da barra do diretor de voo (amarela) no indicador de atitude digital

O instrumento que apresenta os comandos do diretor de voo é conhecido como indicador do diretor de voo, em inglês, *flight director indicator* (FDI), ou indicador de atitude e diretor de voo, em inglês, *attitude director indicator* (ADI), ou, ainda, indicador eletrônico de atitude e diretor de voo, em inglês, *electronic attitude director indicator* (EADI). Também é chamado de horizonte artificial com diretor de voo. Esse elemento de exibição combina os outros componentes primários do sistema diretor de voo, como um piloto automático, que consiste em elementos de sensoriamento, um computador e um painel de interface.

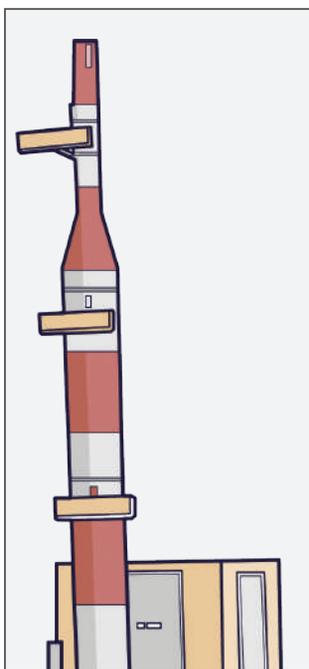


Figura 214 - Antena de glide slope

A integração de recursos de navegação no indicador de atitude é extremamente útil. O diretor de voo contribui para esta utilidade, indicando ao piloto como manobrar o avião para navegar no curso desejado. A seleção da função VOR no painel de controle do diretor de voo liga o computador ao receptor do farol omnidirecional. O piloto seleciona o curso desejado, e o diretor de voo apresenta a atitude de inclinação necessária para interceptar e manter o curso selecionado. As tarefas de consideração do efeito do vento de deriva na aterragem e dos cálculos do ângulo de interceptação dos sinais de auxílio de navegação são realizadas automaticamente.

Os sistemas diretores de voo variam em complexidade. Muitos possuem recursos para manter ou selecionar a altitude, conservar a arfagem, entre outros. Entretanto, tais sistemas são projetados para oferecer a maior assistência durante a fase do voo de aproximação por instrumentos. Os sinais do *glide slope* (Figura 214) e do localizador ILS (Figura 215) são transmitidos através dos receptores para o computador e apresentados como indicações de comando. Isso permite que o piloto manobre o avião para uma aproximação ideal da pista de pouso usando o sistema de diretor de voo. Essas referências indicam as posições ideais (horizontal

e vertical) para o alinhamento à cabeceira da pista durante o pouso. Mediante esse balizamento e a referência da aeronave fornecida pelo diretor de voo, é possível saber se a aeronave está à esquerda ou à direita do alinhamento com a pista (localizador), ou acima ou abaixo da rampa ideal para atingir a cabeceira da pista (*glide slope*).

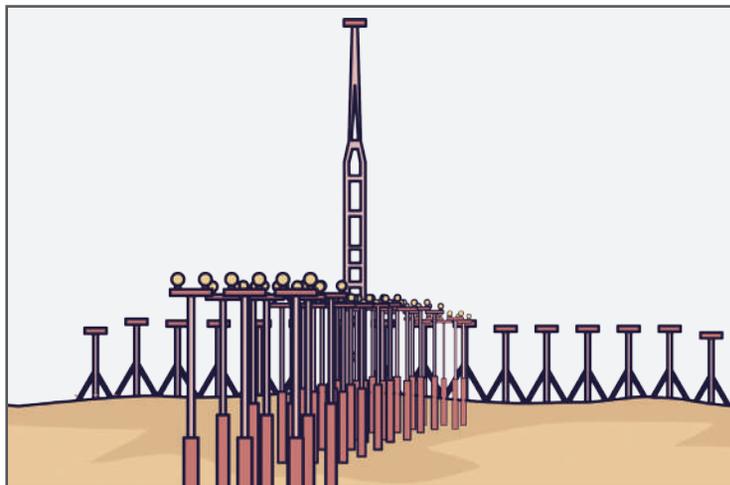


Figura 215 - Antenas localizadoras

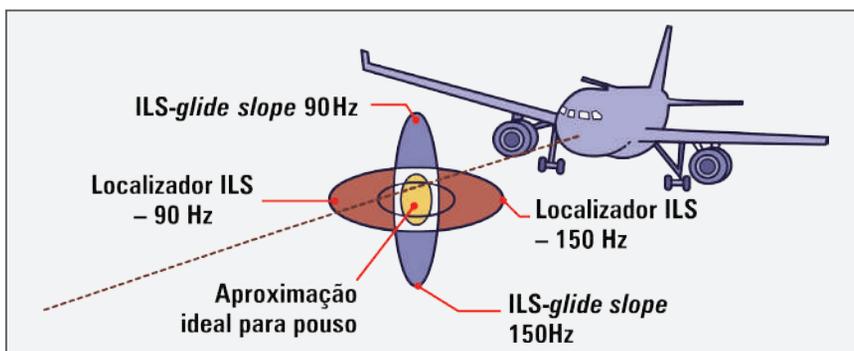


Figura 216 - Referências de ILS e *glide slope* para o pouso da aeronave

Com a função de altitude constante acionada, o nível de voo é mantido durante as manobras de *curva de procedimento* ao longo da aproximação. A função altitude constante é desligada automaticamente quando o sinal *glide slope* for interceptado. Uma vez dentro da área do localizador ILS, os sinais de comando do diretor de voo são mantidos em uma condição centrada ou zero. A interceptação do sinal provoca uma indicação para baixo do indicador de comando de arfagem. Qualquer desvio do caminho correto do *glide slope* ocasiona uma indicação de comando de voar para cima ou para baixo no painel. O piloto precisa apenas manter o símbolo do avião ajustado na barra de comando. As figuras a seguir apresentam as referências do *glide slope* e do localizador ILS no indicador do diretor de voo analógico (Figura 217) e no PFD (Figura 218). Na primeira imagem, são destacadas as janelas de indicação de interceptação dos sinais do *glide slope* (GS) e do localizador ILS (NAV). Na segunda, percebe-se que é intuitiva a ação de alinhamento da aeronave com a referência horizontal (*glide slope*) e



Curva de procedimento: manobra executada por uma aeronave, durante o segmento de aproximação inicial, que consiste em uma curva, a partir do rumo de afastamento, seguida de outra, em sentido contrário, de modo a permitir que a aeronave intercepte e prossiga ao longo do rumo de aproximação final ou intermediária.

com a vertical (localizador ILS). Na indicação em questão, é possível verificar que a aeronave está levemente à esquerda da referência do *glide slope*.



Figura 217 - Indicação do *glide slope* e do localizador ILS no diretor de voo analógico

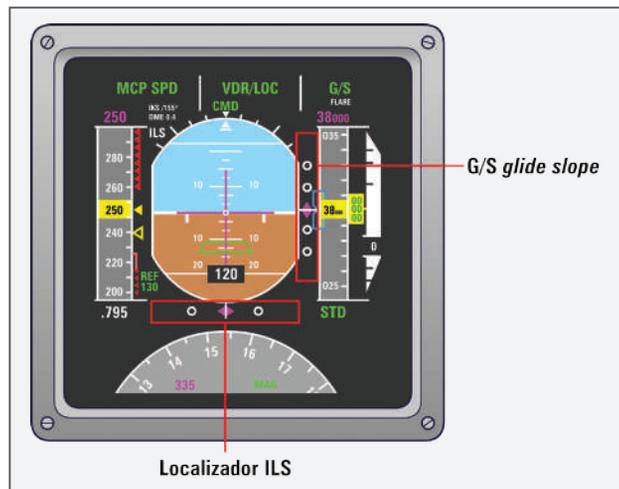


Figura 218 - Indicação do localizador ILS e do *glide slope* no PFD

8.3 Instrumentos eletrônicos

A introdução de tecnologias eletrônicas nos diversos sistemas das aeronaves, principalmente nos de controle e de navegação, proporcionou mudanças consideráveis na maneira de se pilotar uma aeronave. Sistemas foram integrados e computadores passaram a ter capacidades de controlar inteiramente o voo de uma aeronave. Sem dúvida, ficou mais fácil e seguro voar. A evolução das tecnologias empregadas na aviação proporcionou mudanças significativas na apresentação da instrumentação de voo da maioria das aeronaves em operação. A maior delas, sem dúvida, foi a introdução de sistemas de instrumentos eletrônicos, os quais substituíram muitos instrumentos eletromecânicos complexos. No lugar de uma infinidade de mostradores semelhantes a relógios vieram as telas coloridas, que são manipuladas em um mesmo monitor. Aliás, nesses sistemas, é possível a troca de imagens entre as unidades de visualização no caso de falhas de exibição. Ou seja, as telas são exibidas em outro monitor.

Para apresentar as informações ao piloto, o sistema de instrumentos de voo eletrônicos (EFIS) usa tubos de exibição de raios catódicos movidos por um gerador de sinais. As cabines de vidro (*glass cockpit*) utilizam monitores com tecnologia LCD.

Há vários sistemas de instrumentos eletrônicos em uma aeronave. Entre eles são citados o sistema eletrônico de instrumentos de voo, o sistema de alerta da tripulação e indicação do motor, o sistema de monitoramento eletrônico centralizado da aeronave, e outros. A Figura 219 apresenta a localização dos monitores desses sistemas no painel da aeronave.

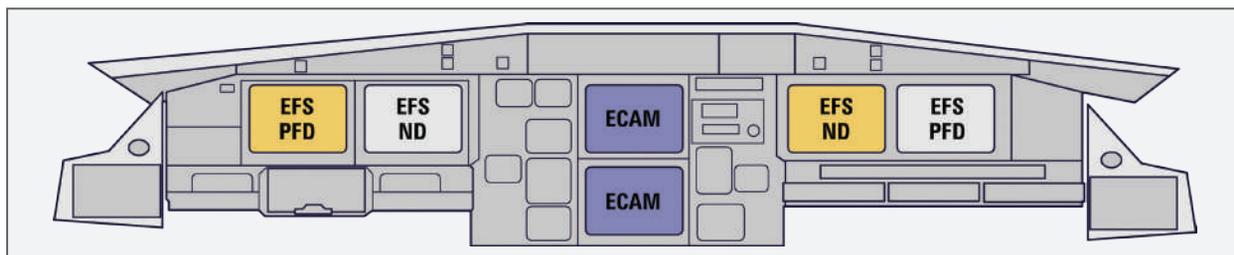


Figura 219 - Localização básica dos monitores no painel digital de uma aeronave

O sistema de instrumento eletrônico (EIS) permite que a tripulação de voo configure o *layout* dos instrumentos no painel, possibilitando a transferência manual da tela de voo primária (PFD) para a tela de navegação (ND) e, ainda, da tela secundária de acompanhamento eletrônico centralizado da aeronave (ECAM) para a de navegação (ND). Além disso, o sistema transfere automaticamente as telas quando o PFD ou o ECAM primário falhar. O PFD é automaticamente transferido para a tela correspondente de ND, com o monitor secundário de ECAM usado para a exibição do ECAM primário. O sistema também transfere automaticamente a informação primária do ECAM para a tela de ND, caso ocorra uma pane dupla do sistema de exibição de ECAM.

Toda essa versatilidade proporcionada pelos recursos eletrônicos é apenas uma amostra da revolução verificada nas cabines das aeronaves com a incorporação dos aviônicos. As cabines de vidro são um reflexo dessa revolução.

Nos tópicos seguintes, serão apresentados alguns dos principais sistemas eletrônicos encontrados em aeronaves modernas.

8.3.1 Indicador de atitude e diretor de voo eletrônico (EADI)

O EADI é uma versão avançada do indicador de atitude elétrico. Além de exibir a atitude da aeronave, são apresentados diversos outros parâmetros situacionais de voo. Os mais notáveis desses parâmetros são os que se relacionam com os instrumentos de aproximação e com a barra de comando do diretor de voo. Na tela do instrumento, também consta a indicação dos sistemas ativos, tais como o AFCS e os sistemas de navegação.

O conceito básico de um EADI é apresentar todos os dados relacionados à situação de voo de forma reunida, visando a facilitar a observação por parte do piloto. A maioria deles é exibida em diferentes telas, dependendo da preferência do piloto e da fase do voo. Eles variam conforme o fabricante e o modelo da aeronave, entretanto, a maioria exibe o mesmo tipo de informação. A Figura 220 apresenta uma série de informações em uma tela do EADI.

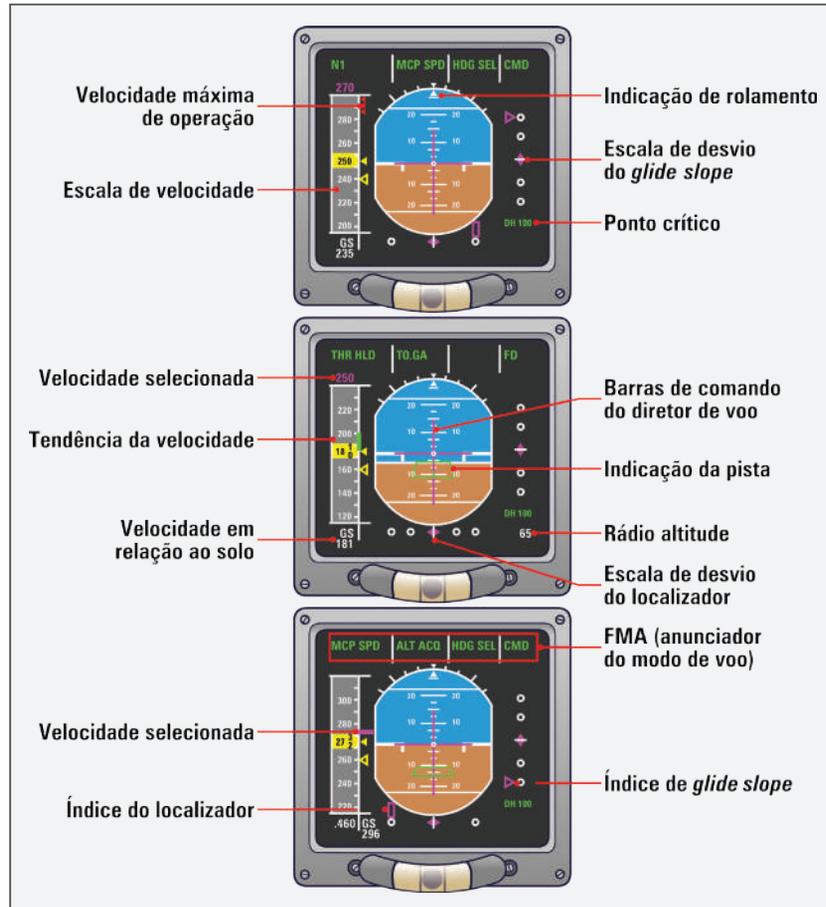


Figura 220 - Indicações no EADI



Figura 221 - Tela primária de voo com o EADI na parte superior e o EHSI na inferior

Os EADI são acondicionados em um único instrumento ou ser parte de um sistema de instrumentos de exibição eletrônica. Eles exibem as informações no meio do painel de instrumentos. O EADI é o instrumento de voo primário usado para informações sobre atitude da aeronave durante o voo por instrumentos e, especialmente, durante a aproximação por instrumentos. É quase sempre acompanhado por um indicador de situação horizontal eletrônico (EHSI) localizado logo abaixo do painel de exibição (Figura 221).

8.3.2 Indicador eletrônico de situação horizontal (EHSI)

O indicador eletrônico de situação horizontal, em inglês, *electronic horizontal situation indicator* (EHSI), é uma versão evoluída do indicador de curso, também chamado de indicador de situação horizontal (HSI), que nasceu do giroscópio direcional ou girodirecional. Este último incorpora informações de direção para dois auxílios de navegação diferentes, assim como a direção da aeronave. O EHSI vai muito além disso. O seu propósito principal é exibir o máximo de informações de navegação úteis. Ele fica localizado no painel de instrumentos, diretamente abaixo do EADI.

A Figura 222 mostra um indicador do EHSI, no qual constam as informações de direção em uma tela, enquanto, na outra, são apresentadas a rota e as condições meteorológicas.



Figura 222 - Indicador eletrônico de EHSI

Em combinação com o computador de gerenciamento de voo e um controlador de visualização, o EHSI exibe as informações nos modos PLAN, MAP, VOR ou ILS, podendo variar de acordo com o fabricante do instrumento. O piloto seleciona o modo mais útil para determinada fase de voo, que vai desde o planejamento de navegação até a aproximação para pouso por instrumentos. O modo PLAN mostra um mapa fixo da entrada do plano de voo, incluindo todos os auxílios de navegação selecionados para cada segmento do voo e o aeroporto de destino. O modo MAP apresenta a aeronave contra um mapa móvel detalhado de fundo. Nesse modo, são exibidos os auxílios de navegação ativos e inativos, assim como outros aeroportos e outros pontos de rota. Informações de radares meteorológicos são selecionadas para serem mostradas na tela como fundo. O EHSI apresenta informações de navegação durante todo o curso, e o modo MAP é utilizado durante a maior parte do voo.

Alguns HSI representam o tráfego de outras aeronaves quando integrados com o sistema anticolisão de tráfego, em inglês, *traffic collision avoidance system* (TCAS).

Diferente do HSI padrão, o EHSI mostra apenas a parte pertinente da rosa dos ventos. O anúncio do modo ativo e as características selecionadas aparecem com outras informações pertinentes, tais como a distância e o tempo de chegada ao próximo ponto de rota, os



TCAS: em inglês, *traffic collision avoidance system*; pequeno conjunto de equipamentos eletrônicos de bordo, que constitui um sistema de segurança de voo, é incorporado às aeronaves com o objetivo de evitar colisões aéreas com outras aeronaves.

designadores dos aeroportos, a direção e a velocidade do vento, etc. Há muitas apresentações diferentes da tela do EHSI, que variam de acordo com o fabricante. Na Figura 223, é mostrada uma das apresentações da tela do EHSI e suas indicações.

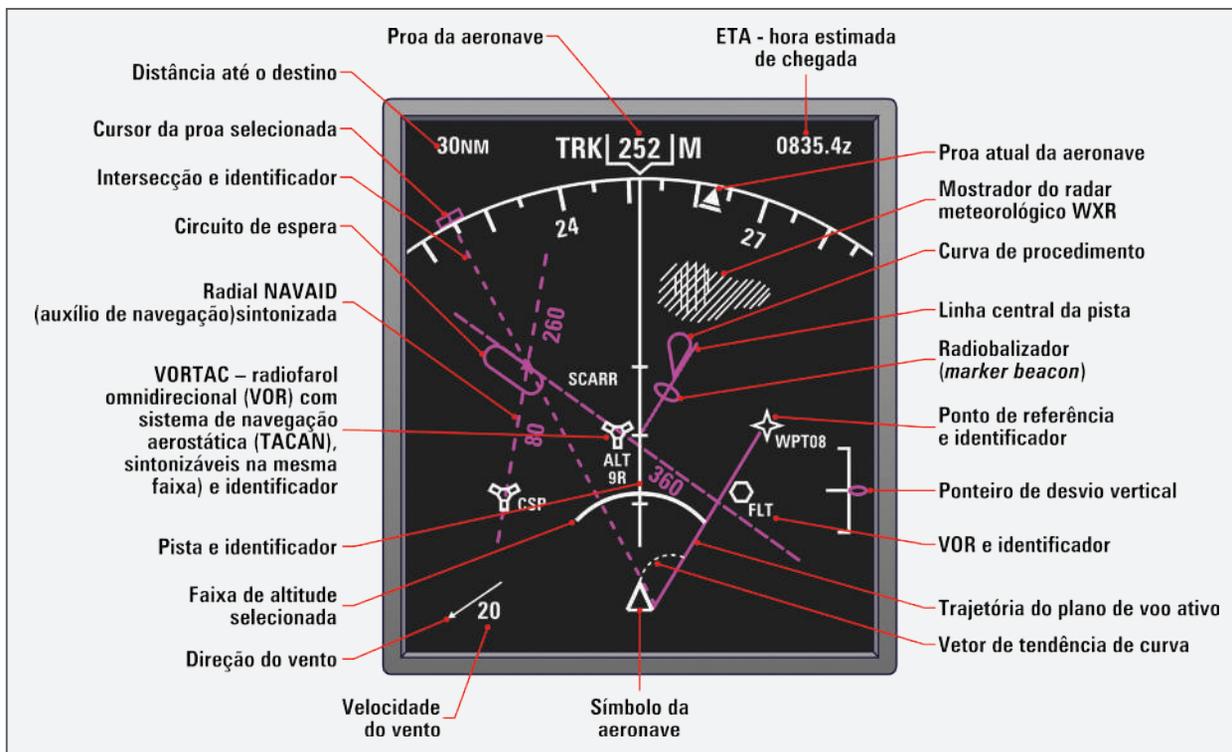


Figura 223 - Informações apresentadas em um EHSI no modo MAP

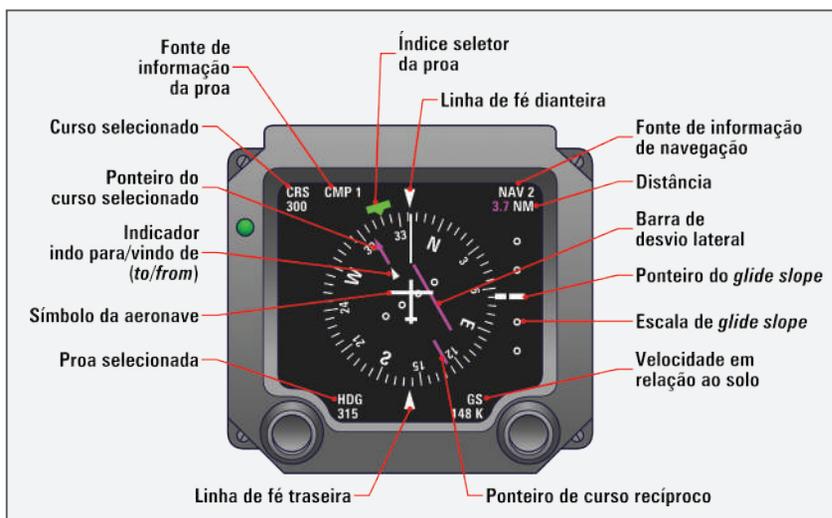


Figura 224 - Informações apresentadas em um EHSI no modo aproximação

A tela do modo VOR do EHSI apresenta o foco mais tradicional de um VOR selecionado, ou outras estações de navegação utilizadas durante determinado segmento do voo. A informação de onde vem e para onde vai a aeronave e a distância envolvida são apresentadas no formato padrão. Outros dados também são exibidos.

O modo ILS do EHSI mostra a aeronave em relação aos assistentes de aproximação ILS e seleciona a pista com níveis de detalhamento variáveis (Figura 224).

Com essa informação exibida, o piloto não precisa consultar dados de aproximação do aeroporto, fato que lhe permite dedicar total atenção na tarefa de guiar a aeronave.

8.4 Sistema eletrônico de informação de voo

Grande parte da tarefa desempenhada pela tripulação em um voo depende de informações fornecidas por variadas fontes. De fato, a tripulação necessita saber como se encontra o funcionamento do motor, as condições meteorológicas, a atitude da aeronave, o cumprimento da rota planejada, entre muitas outras. Nessas atividades, são percebidas duas fases. Uma é relativa ao fornecimento da informação à tripulação, a qual é tarefa da instrumentação na cabine. A outra fase é o gerenciamento dessas informações, que levam a ações ou não, dependendo da situação. Contudo, há sempre a necessidade de monitoramento desses dados para verificar se é preciso adotar alguma atitude por parte da tripulação. Como se vê, é uma atividade contínua e desgastante, principalmente em voos longos e em aeronaves com painéis complexos. Quanto mais complexa a aeronave, mais informações são necessárias.

Diante desse quadro, uma das preocupações da indústria aeronáutica consiste em criar sistemas que possam desempenhar a função de monitoramento e gerenciamento dos sistemas, poupando a tripulação dessa tarefa e reduzindo a quantidade de indicadores na cabine. Essas atividades são apropriadas para o uso de computadores. Ao se comparar os painéis analógicos de grandes aeronaves com os atuais, percebe-se que essa mudança permitiu a redução considerável do número de instrumentos no painel, e, principalmente, garantiu a concentração do piloto focada à pilotagem.

As gerações de aeronaves com instrumentação moderna, conhecida como cabine de vidro, representam o progressivo esforço da indústria aeronáutica em integrar sistemas e informações, além de aumentar o grau de automatismo dos sistemas de gerenciamento de voo. A presença de monitores na instrumentação da cabine é apenas um indicador desse processo, pois o mais importante é a quantidade e a qualidade das informações produzidas por computadores que substituem os indicadores analógicos individuais. Além disso, os computadores e seus sistemas monitoram os processos e componentes durante a operação da aeronave, de um modo que vai além da capacidade humana, apresentando as informações de maneira clara e intuitiva. Sem dúvida, os sistemas eletrônicos de informação aliviam sobremaneira o piloto do estresse de ter que fazer todo esse trabalho, atualmente, colocado sob a responsabilidade dos computadores e sistemas.

Outros pontos a serem destacados são as vantagens que a utilização de componentes eletrônicos oferece às aeronaves, em virtude da confiabilidade, do baixo peso, das reduzidas dimensões que vão ao encontro das necessidades de um projetista de aeronaves. Quando se observa a presença de microprocessadores, barramentos de dados e monitores de LCD na aeronave, é possível dimensionar o quanto se poupou de espaço e de peso em relação aos modelos analógicos. A tendência é que novos sistemas e arquitetura de computadores venham no futuro equipados com componentes menores e mais eficientes que os atuais.

8.4.1 Sistema eletrônico de instrumentos de voo (EFIS)

A instrumentação das aeronaves se mostrou uma área adequada para a incorporação de recursos eletrônicos, tanto que os instrumentos de voo foram os primeiros a adotar a tecnologia de computadores e a empregar telas planas e mostradores multifuncionais, em inglês, *multifunctional displays* (MFD). Os EFIS empregam geradores específicos de sinais para alimentar duas telas independentes localizadas no centro dos instrumentos de voo. O indicador de atitude e o giroscópio direcional são substituídos por tubos de raio usados para exibir as indicações do indicador de atitude e diretor de voo eletrônico (EADI) e do indicador eletrônico de situação horizontal (EHSI). Esses instrumentos aprimorados operam juntamente com instrumentos elétricos e mecânicos com integração limitada. A tecnologia EADI e EHSI representa um grande avanço para a aviação, reduzindo a carga de trabalho e proporcionando mais segurança com a integração das informações de navegação. Na Figura 225, é visível a presença do EHSI em um monitor de tubo de raios catódicos, próximo ao painel central.

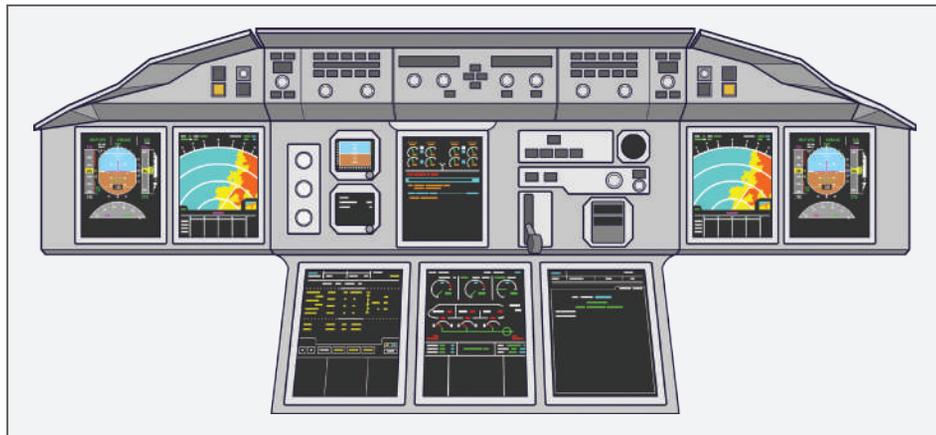


Figura 225 - EFIS em posição de destaque no painel de uma aeronave comercial

O conceito de sistema eletrônico de instrumentos de voo não é fruto da era digital, haja vista que os primeiros exemplares utilizavam tecnologia analógica. Nos dias atuais, além das aeronaves modernas, é verificada a presença de EFIS com tecnologia digital em aeronaves antigas, que foram submetidas a processos de atualização da instrumentação.

Nesse sistema, os geradores de símbolos recebem informações dos equipamentos de atitude e de navegação. E, por intermédio de um controlador do monitor, o piloto seleciona os vários modos e as características da tela. Normalmente, os sistemas são independentes e específicos para piloto e copiloto. Um terceiro gerador de símbolos reserva permanece disponível para assumir a operação caso as duas primeiras unidades falhem.

Cabe destacar que a exibição visual do EFIS é produzida pelo gerador de símbolo (ou computador de processamento de exibição). Este recebe entradas de dados do piloto, dos sinais dos sensores e das seleções de formato EFIS feitas pelo piloto. Na verdade, esse gerador executa outras funções além de gerar símbolos. Ele dispõe de instalações de monitoramento, de um gerador de gráficos e de um *driver* de vídeo. Os sinais de entrada vindos dos sensores e dos controles chegam a ele através de barramentos de dados e são verificados quanto à validade. Os dados são processados e o *driver* gerador de gráficos produz os sinais de entrada para as unidades de exibição.



Driver: software que permite que o computador se comunique com o hardware ou com os dispositivos. Sem ele, o hardware conectado ao computador não funciona corretamente.

A Figura 226 exibe um esquema básico de funcionamento do EFIS. Nele, percebe-se a presença de três geradores de símbolos, sendo um de reserva, que é acessado pelo piloto ou pelo copiloto.

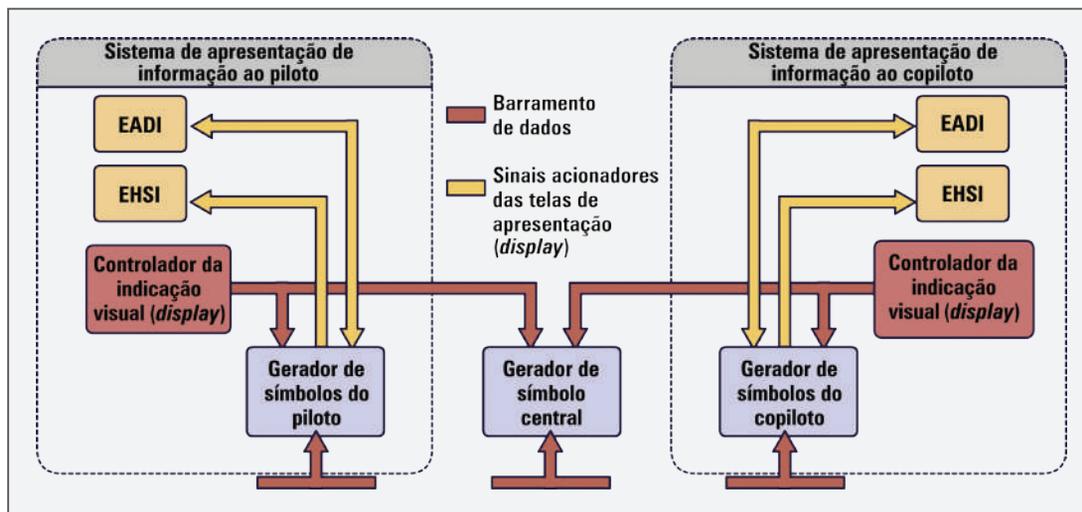


Figura 226 - Diagrama simplificado de um sistema EFIS

Uma característica marcante das chamadas cabines de vidro é a concentração enorme de informações em um mesmo monitor, as quais são acessadas por meio de telas. Além disso, em uma mesma tela, são apresentadas várias informações por meio de uma representação eletrônica. Quando se observa o painel de uma aeronave moderna, é possível reconhecer que a apresentação do EFIS confere destaque às informações do indicador de direção e atitude (ADI) e do indicador de curso (HSI) na tela de informações primárias de voo. Essa apresentação é parecida com a dos instrumentos de voo nos painéis analógicos. Em virtude de seu maior tamanho e capacidade sobre os mostradores tradicionais, é permitida a integração de mais dados dos instrumentos de voo. Na maioria dos sistemas EFIS, a apresentação do instrumento inclui uma escala de velocidade da aeronave à esquerda do campo de atitude, e outras duas à direita, sendo uma para a indicação de altitude e outra para a razão de subida. Na maioria das representações do EADI, encontra-se um inclinômetro, que faz parte do coordenador de curva. Dessa forma, o EFIS concentra a apresentação de todos os instrumentos básicos de voo na tela do monitor primário de voo. Na Figura 227, é perceptível na tela do PFD a indicação de velocidade, altitude, razão de subida, direção de voo, derrapagem e atitude da aeronave.

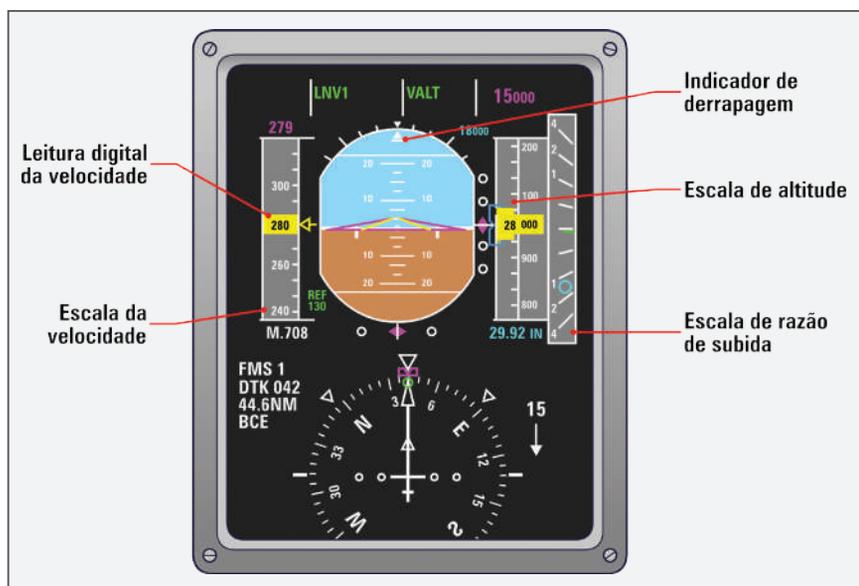


Figura 227 - Tela do PFD com suas indicações

Essa apresentação é parecida com a dos instrumentos de voo nos painéis analógicos. Em virtude de seu maior tamanho e capacidade sobre os mostradores tradicionais, é permitida a integração de mais dados dos instrumentos de voo. Na maioria dos sistemas EFIS, a apresentação do instrumento inclui uma escala de velocidade da aeronave à esquerda do campo de atitude, e outras duas à direita, sendo uma para a indicação de altitude e outra para a razão de subida. Na maioria das representações do EADI, encontra-se um inclinômetro, que faz parte do coordenador de curva. Dessa forma, o EFIS concentra a apresentação de todos os instrumentos básicos de voo na tela do monitor primário de voo. Na Figura 227, é perceptível na tela do PFD a indicação de velocidade, altitude, razão de subida, direção de voo, derrapagem e atitude da aeronave.

8.4.2 Monitor eletrônico centralizado da aeronave (ECAM)

Conforme destacado, uma parte da carga de trabalho de um piloto em todas as aeronaves consiste no contínuo monitoramento dos instrumentos de voo, das condições fora da aeronave, do funcionamento adequado do motor e dos sistemas da aeronave. Somada à pilotagem da aeronave, essa tarefa é extremamente estressante em grandes aviões de transporte, dado o grande número de indicadores. O sistema do monitor eletrônico centralizado da aeronave, em inglês, *electronic centralized aircraft monitor* (ECAM), foi projetado para auxiliar essa tarefa.

O princípio de operação dos sistemas de monitoramento consiste em acompanhar o funcionamento de determinado sistema e avisar a tripulação sobre alguma falha. Ele vai além, agindo para solucionar a falha ou diminuir os efeitos ou informar ao piloto qual a atitude a ser tomada. No caso do ECAM, ele realiza o monitoramento automático das tarefas para o piloto. Quando um problema é detectado, ou acontece uma falha, o mostrador primário, juntamente com um aviso sonoro e visual, alerta o piloto sobre o problema. Ele, ainda, apresenta no monitor a ação que precisa ser tomada para a situação, assim como as medidas sugeridas para sanar a falha.

Inicialmente, os sistemas de monitoramento contemplavam apenas os sistemas da célula da aeronave, de modo que os parâmetros dos motores continuavam a ser apresentados na cabine por indicadores analógicos tradicionais. Os modelos mais novos dispõem de indicadores para o motor e para os sistemas da célula.

Com efeito, são destinados dois monitores de CRT, ou de LCD, para o ECAM. O monitor esquerdo ou superior, dependendo do *layout* do painel, exibe as informações sobre o estado do sistema e quaisquer avisos relacionados a ações corretivas em caso de falha. Isso é feito no formato de uma lista de verificação. Essa lista é uma sequência de ações que permitem corrigir a falha, da mesma forma como se faz nas pesquisas de pane. O monitor da direita, ou inferior, exibe as informações do sistema de acompanhamento, de uma forma pictórica, tal como um diagrama de sistema.

A Figura 228 apresenta o *layout* comum dos monitores de ECAM no painel central da cabine. Nessa configuração, os monitores de ECAM estão na vertical. O monitor superior informa os parâmetros do motor e as mensagens de alertas, em inglês, *engine warning display* (E/WD), e o inferior apresenta as informações dos sistemas, em inglês, *system display* (SD).



Figura 228 - Telas do ECAM no painel (monitores centrais)

Os monitores do ECAM são alimentados por geradores de símbolo separados. As entradas de dados da aeronave são alimentadas em dois computadores de aviso. Estes processam a informação e a repassam para os geradores de símbolo, a fim de apresentá-las nos monitores (Figura 229).

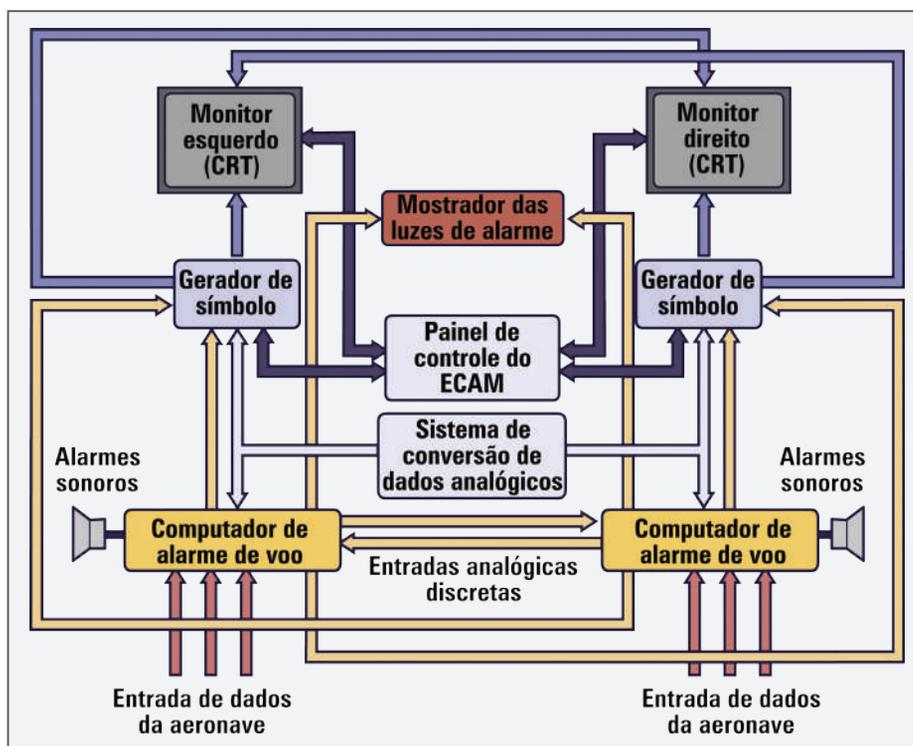


Figura 229 - Diagrama do sistema ECAM

Como é característica dos sistemas eletrônicos de instrumentos (EIS), os monitores de ECAM concentram muitas informações, organizadas por meio de telas que são selecionadas pelo piloto e copiloto. Há quatro modos básicos de operação do sistema ECAM: fase de voo, consulta, falha relacionada e manual. O modo fase de voo é o mais usado. As fases de voo indicadas no instrumento são: pré-voo, decolagem, subida, cruzeiro, descida, aproximação e pós-aterissagem. Os modos consulta e falha relacionada aparecem automaticamente quando a situação requerer.

No momento em que o modo consulta é mostrado no monitor primário, o monitor secundário automaticamente exibe o sistema esquemático com valores numéricos. O mesmo acontece com o modo falha relacionada, que tem precedência sobre todos os outros modos, independentemente de qual modo esteja selecionado no momento da falha.

A apresentação das informações é usada nas telas para conferir graus de importância às mensagens. Ela segue a codificação de cores padrão utilizada em instrumentos analógicos, quais sejam:

- vermelho - indica que a situação exige ação imediata;
- alaranjado (ou âmbar) - designa que o assunto requer atenção, mas nenhuma ação é necessária;
- verde - aponta operação normal;

- branco - cor utilizada em títulos e observações;
- azul (ciano) - indica as ações a serem executadas ou limitações a serem respeitadas;
- roxo (magenta) - aponta mensagens especiais.

Os modos de exibição são selecionados por intermédio de um painel de controle ECAM separado, localizado no painel do pedestal. Como se percebe na Figura 230, no painel há botões de comandos que permitem ao piloto acessar as telas dos sistemas desejados.

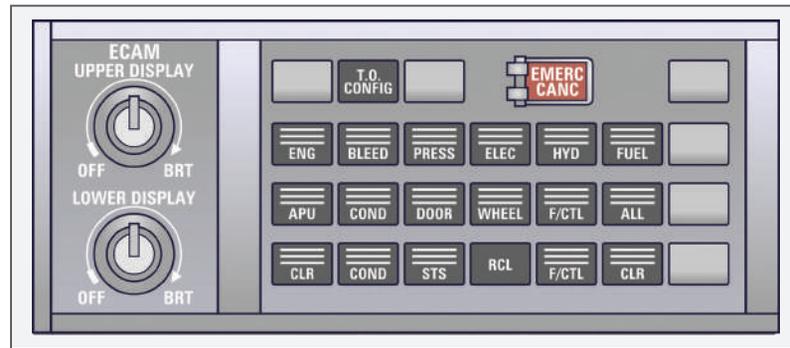


Figura 230 - Painel de controle de um ECAM

O modo manual de um ECAM é selecionado apertando-se um dos botões de exibição sinóptica (resumida) do painel de controle. Isso permite a exibição de diagramas do sistema (Figura 231). Um sinal de falha ou evento-consulta cancela essa visualização.

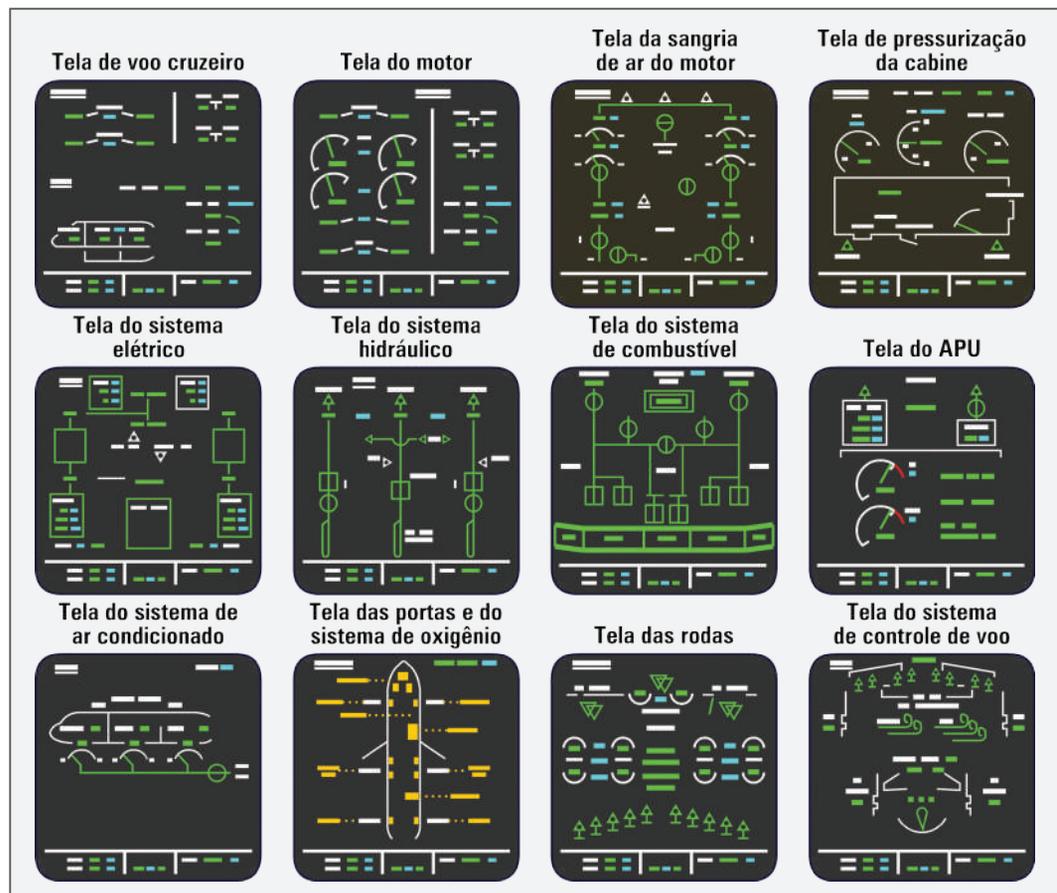


Figura 231 - Telas do ECAM, no modo manual

O ECAM possui o recurso de checar o seu funcionamento por meio de um sistema de autoteste de seus computadores. Esse procedimento ocorre durante a inicialização do sistema, tal como o ocorre no procedimento de *boot* dos computadores pessoais. Os geradores de símbolo também são testados. Quando se necessita realizar a checagem durante o processo, o painel de manutenção permite a realização de teste sob demanda, por meio de um botão com a inscrição BITE (Figura 232), localizado no painel de testes do ECAM. A utilização de autoteste é comum em sistemas de monitoramento e sistemas de aeronaves.

Nesse painel, todas as entradas do sistema para os computadores de alerta são testadas em relação à continuidade, assim como as entradas e saídas do sistema de dados do conversor analógico. Qualquer falha dos sistemas individuais será listada no mostrador primário. Falhas nos computadores dos sistemas de alerta e geradores de símbolo aparecem no painel de manutenção. É necessário seguir as instruções do fabricante quando se for testar o ECAM e os sistemas relacionados.

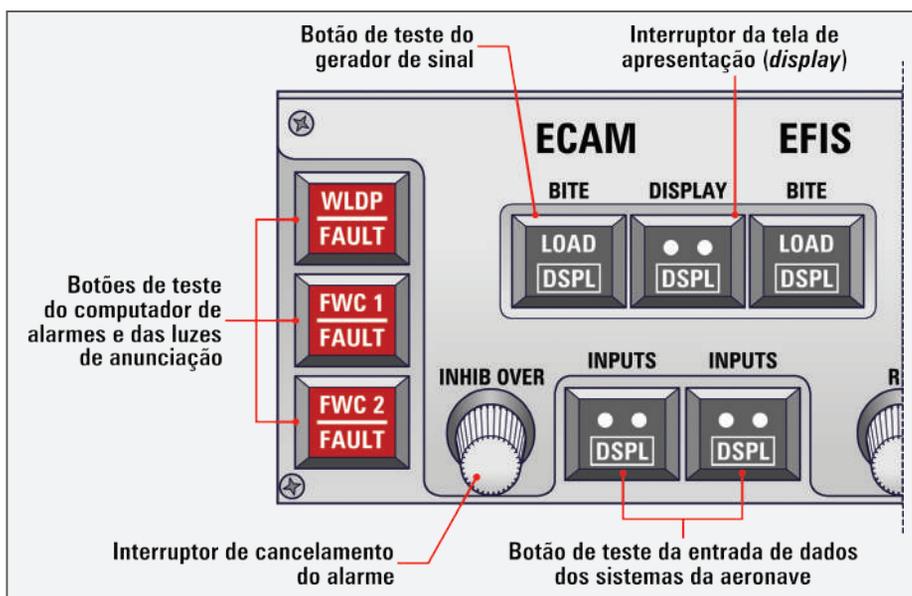


Figura 232 - Painel de manutenção do ECAM

8.4.3 Sistema de alerta da tripulação e indicação do motor (EICAS)

O sistema de alerta da tripulação e indicação do motor, em inglês, *engine indicating and crew alerting system* (EICAS), foi desenvolvido por uma fabricante de aeronaves de transporte americana com o mesmo propósito do ECAM, produzido por uma fabricante de aeronaves europeia. Assim, ele realiza muitas funções idênticas às do sistema ECAM, cuja função principal consiste no monitoramento dos sistemas da aeronave para o piloto. Todos os EICAS exibem os parâmetros dos motores e dos sistemas de célula. Os indicadores tradicionais não são utilizados, a não ser uma combinação de instrumentos do motor para o caso da falha

total do sistema. Normalmente, os controles do EICAS ficam localizados na parte superior do painel do pedestal (Figura 233).

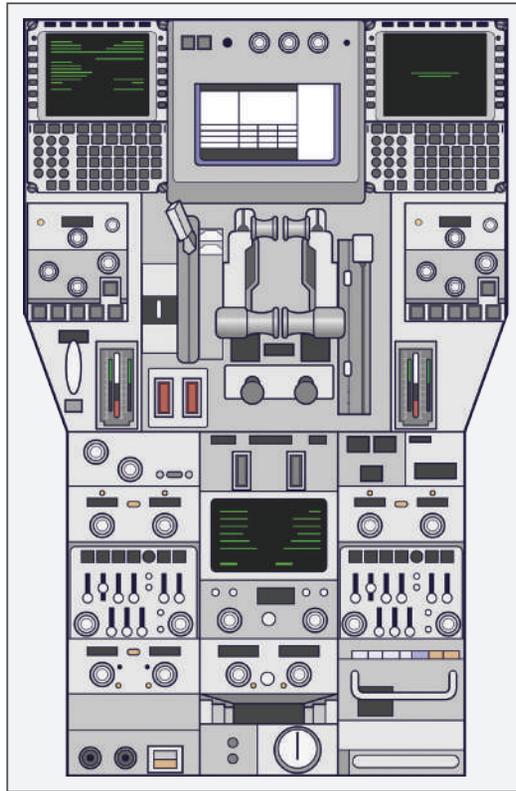


Figura 233 - Controles do EICAS no painel do pedestal de uma aeronave comercial

Algumas pequenas diferenças entre os dois sistemas são citadas, como, por exemplo: no ECAM as informações são invariavelmente apresentadas em formato de lista de verificação e de esquema, enquanto o EICAS não necessariamente apresenta esse formato. No ECAM, durante alguma falha, aparece na tela a indicação da ação corretiva. No EICAS não há função similar. No ECAM, as indicações de panes ou erros aparecem na tela e, após resolvidas, desaparecem dela. No EICAS, em caso de falha, o instrumento aparece na tela com a indicação pertinente. O piloto deve interpretar o significado da leitura (Figuras 234.A e 234.B).

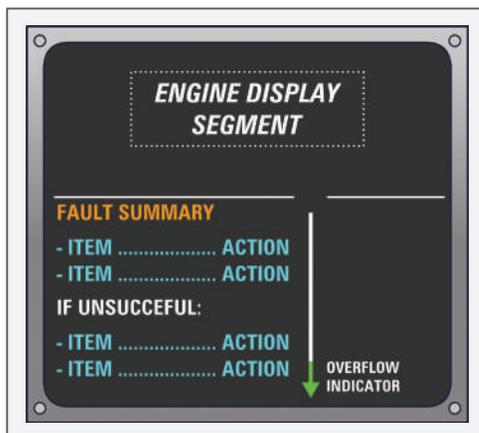


Figura 234.A - Tela do ECAM com mensagem de erro e ações pertinentes

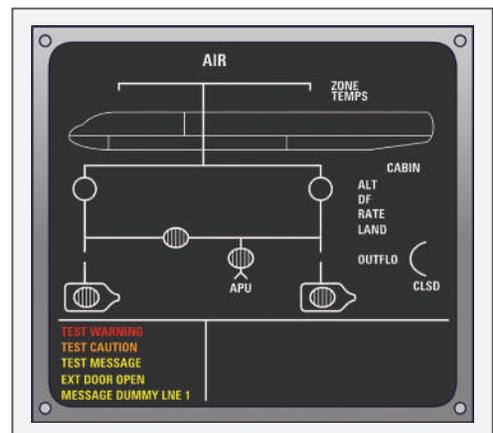


Figura 234.B - Tela do EICAS apresentando a leitura do instrumento de indicação

O EICAS também dispõe de dois monitores e dois computadores, com um painel de seleção de tela. Ambos os monitores recebem informação do mesmo computador. O segundo computador atua como reserva, entrando em operação em caso de falha do principal. Os dados analógicos e digitais vindos do motor e dos sistemas da célula são monitorados continuamente. O sistema é equipado com luzes e sinais sonoros de alerta.

A Figura 235 mostra o esquema de funcionamento do EICAS, no qual é possível verificar o circuito dos barramentos de dados para alimentar os computadores principais e o reserva com as informações geradas pelos sensores. Também é possível verificar quais tipos de mensagens geram alertas na cabine.

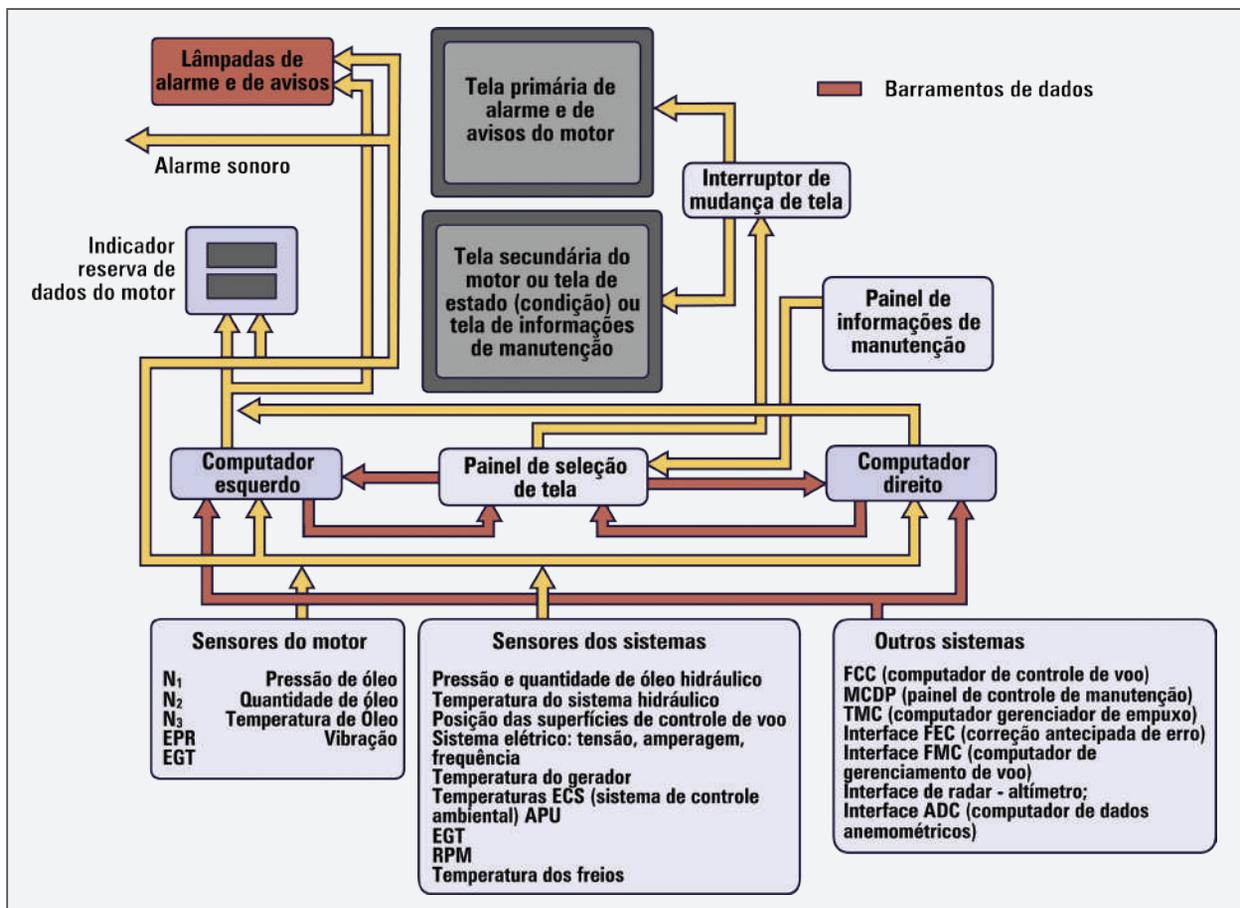


Figura 235 - Esquema de funcionamento do EICAS

A Figura 235 exibe a ilustração dos dois monitores de EICAS, o superior apresenta os parâmetros primários do motor em tempo integral, assim como os avisos e os alertas. Enquanto os parâmetros secundários do motor e o estado dos sistemas da célula são exibidos na parte inferior da tela. O painel de seleção de tela permite que o piloto escolha qual computador será o responsável por fornecer ativamente as informações. Ele também controla as telas de informações secundárias do motor e do estado dos sistemas no monitor inferior.

A tela inferior é utilizada, ainda, para diagnóstico de manutenção, quando a aeronave está em solo. As informações são apresentadas seguindo o código de cores para a priorização das mensagens. Na Figura 236, é percebida a mensagem de alerta em vermelho, no canto inferior esquerdo.

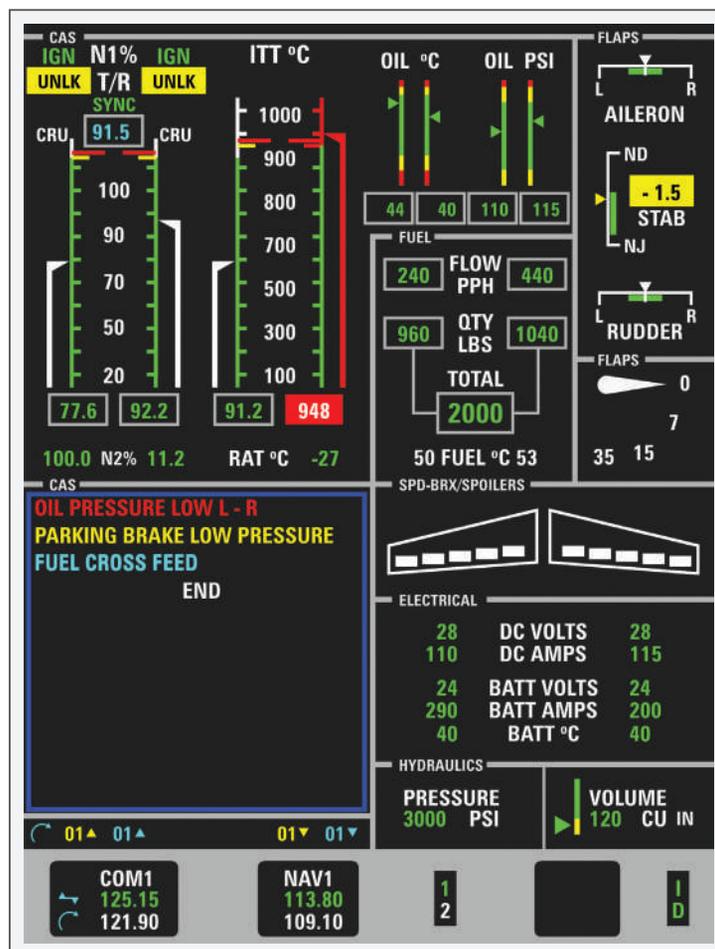


Figura 236 - Tela do EICAS com destaque para a mensagem de alerta de falha no sistema

O EICAS possui um recurso muito útil que permite o registro automático dos parâmetros relativos a algum evento que requeira a atenção da equipe de manutenção. Para tanto, o sistema registra a mensagem na tela de diagnóstico de manutenção, que é acessada pelos técnicos em solo. Após a verificação do possível problema, a mensagem é cancelada. Esse recurso permite que o piloto, ao suspeitar que algum problema técnico possa estar ocorrendo durante o voo, registre o evento em um painel de seleção, por meio do acionamento de um botão de registro para esse fim. Os parâmetros também são registrados durante o período de voo selecionado e analisados pela equipe de manutenção em momento oportuno.

O EICAS também utiliza um comando BITE para o autoteste dos sistemas e dos componentes. Da mesma forma, o sistema dispõe de um painel de manutenção para uso dos técnicos, que acessa as informações pertinentes à manutenção de diversos sistemas por meio de interruptores, conforme se verifica na Figura 237.

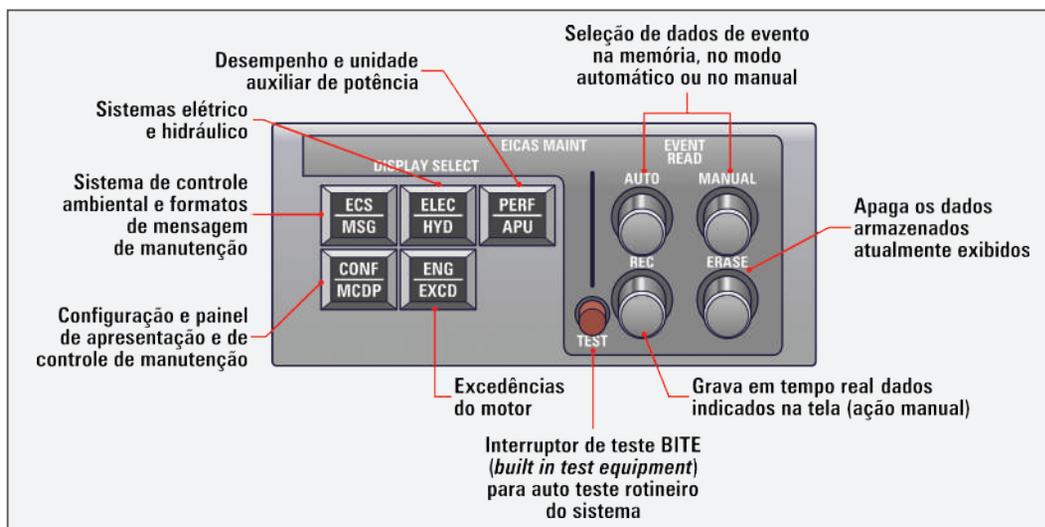


Figura 237 - Painel de controle de manutenção do EICAS utilizado pelos técnicos de manutenção

8.5 Sistema de gerenciamento de voo (FMS)

O sistema de gerenciamento de voo, em inglês, *flight management computer* (FMS), é um equipamento aviônico que representa o nível mais alto de sistema automatizado de voo. Ele é responsável por seguir o plano de voo previamente configurado pelo piloto, podendo ser corrigido por este, quanto à proa, à altitude e à velocidade do voo. O FMS emprega vários mecanismos para obter a localização da aeronave, a partir da qual, somadas às informações inseridas no computador de gerenciamento de voo (FMC), o computador conduz a aeronave com base no destino, na proa, na altitude e na velocidade programados.

A aparência física do equipamento lembra um pequeno computador, com dimensões parecidas com as de um *palmtop* (Figura 238). O FMS envia o plano de voo para os instrumentos do painel EFIS (sistema de instrumentos de voo eletrônicos), e as informações ficam disponíveis na tela de navegação com vários dados da aeronave.



Figura 238 - Dois controles de FMS no pedestal da cabine
Fonte: Agência Força Aérea Brasileira / © Sgt. Batista

Por meio do FMS é possível definir os parâmetros de voo da aeronave que visem à economia de combustível ou à redução do tempo de viagem, por exemplo. Isso garante a obtenção de resultados com maior precisão em relação aos obtidos por um piloto sem os recursos do FMS.

O funcionamento desse sistema é considerado como o de um computador mestre que controla todos os outros sistemas, computadorizados ou não. Dessa forma, ele coordena os ajustes do voo, do motor e dos parâmetros da aeronave automaticamente, ou instrui o piloto sobre o que precisa ser feito. Todos os aspectos do voo são considerados, desde o planejamento pré-voo até os procedimentos do pós-pouso, incluindo alterações do curso planejado.

O principal componente de um FMS é o computador de gerenciamento de voo, em inglês, *flight management computer* (FMC). Por intermédio do barramento de dados, ele se comunica com o EICAS ou com o ECAM, com o computador de dados anemométricos (ADC), com o computador de gerenciamento de empuxo que controla a função de manete de potência automática, com o gerador de símbolos EFIS, com o sistema de controle automático de voo, com o sistema de referência inercial, com o sistema anticolisão e com todos os auxílios de radionavegação. A Figura 239 ilustra o circuito de relacionamento do FMS.

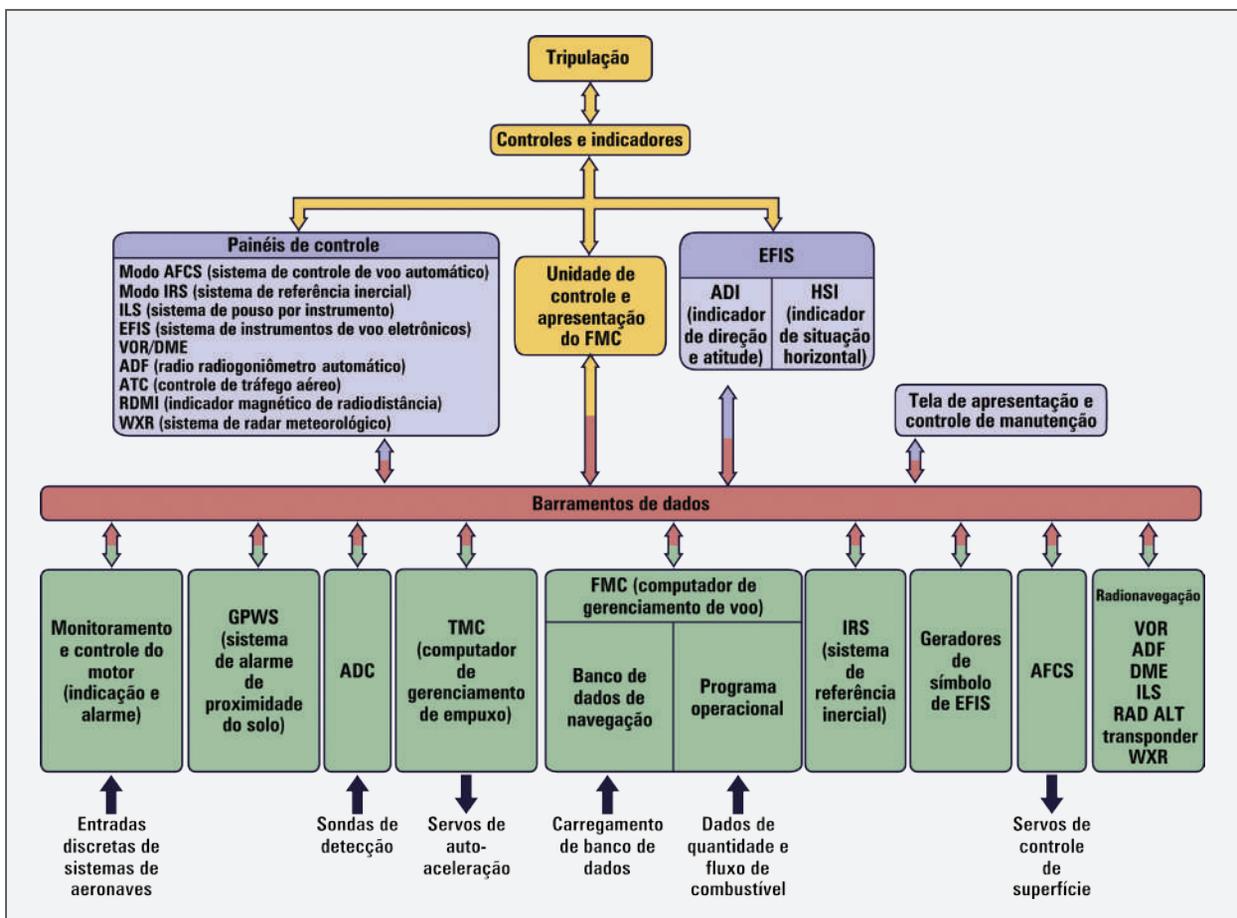


Figura 239 - Diagrama do sistema de gerenciamento de voo

A interface com o sistema é realizada através de uma unidade de controle de tela, em inglês, *control display unit* (CDU), que fica normalmente localizada à frente do pedestal central na cabine. Ele possui um teclado alfanumérico completo, uma tela de CRT ou LCD, anunciadores de estado e condição, além de teclas de funções especiais, como evidenciado pela Figura 240.

O FMS típico usa dois conjuntos de FMS e FMC que operam de forma independente nas unidades do piloto e do copiloto. Na verdade, existe uma comunicação cruzada (*cross-talk*) através dos barramentos de dados. Em uma operação normal, o piloto e o copiloto dividem a carga de trabalho, com a unidade de controle de tela (CDU) do piloto definida como responsável por supervisionar e fazer a interface com os parâmetros operacionais, enquanto a CDU do copiloto fica com as tarefas de navegação. Essa configuração é opcional e fica a critério da tripulação. Se um dos componentes principais falhar (por exemplo, um FMC ou um CDU) as unidades operacionais restantes continuam a operar com total controle e sem comprometimento do sistema.

Cada voo de uma aeronave apresenta componentes verticais, horizontais e navegacionais, que são mantidos pela operação do motor e pelos controles de superfícies de comando. Para isso, existem diversas opções para o piloto: a razão de subida, as configurações de empuxo, de velocidade, de razão de subida e de descida, entre outras variáveis. Os aviões comerciais empregam o FMC para estabelecer as diretrizes de voo das aeronaves, que, normalmente, promovem os objetivos da companhia em relação à economia de combustível e à conservação do equipamento. O piloto precisa apenas inserir as variáveis solicitadas e responder às alternativas sugeridas pelo FMC.

O FMC tem armazenado em sua base de dados centenas de planos de voo, com parâmetros operacionais predeterminados que são selecionados e colocados em prática. A integração com os auxílios de navegação e com o sistema de comunicação permite que o FMS altere as frequências de rádio quando o plano de voo é selecionado. Cálculos internos usando as informações que vêm diretamente dos sistemas de fluxo de combustível ou de quantidade de combustível permitem que o FMC realize operações sem desperdícios ou busque outros objetivos, tais como operações de alto desempenho, se o tempo for fundamental em um determinado voo. Considerações sobre o clima também são integradas. O FMS lida com todas as variáveis automaticamente e se comunica com o piloto por meio da tela do CDU para apresentar o seu plano de ação, obter consenso e/ou solicitar uma entrada ou decisão.

Assim como com os sistemas de monitoramento, o FMS inclui um comando BITE para autoteste do sistema. O FMS monitora continuamente todo o sistema e gera informações de falhas durante a operação. A equipe de manutenção resgata as mensagens de falha registradas

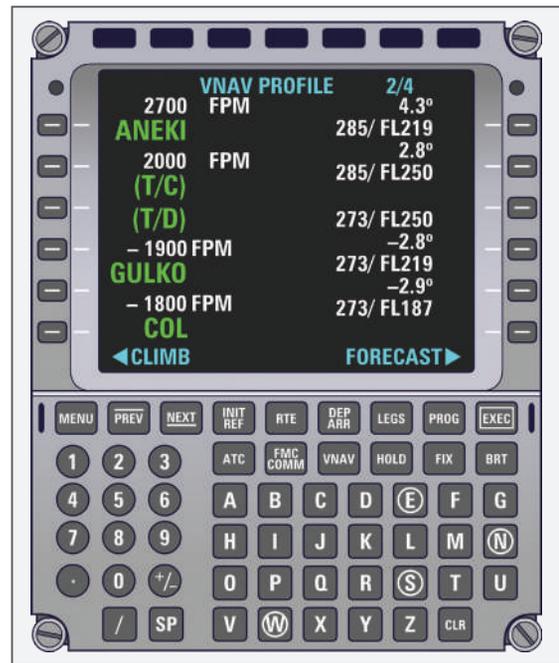


Figura 240 - Unidade de controle de tela (CDU) do FMC

pelo piloto ou geradas pelo sistema. Eles também acessam as páginas de manutenção que requerem unidades substituíveis de linha, em inglês, *line replaceable unit* (LRU), das quais foram identificadas falhas, pelo sistema BITE. Os procedimentos do fabricante para fazer a interface com as informações de dados de manutenção devem ser seguidos.

Resumindo

Neste capítulo, viu-se que os sistemas de controle e gerenciamento de voo são responsáveis pelo aumento significativo da eficiência e da segurança nos voos das aeronaves modernas, na medida em que passaram a executar as exaustivas tarefas de monitoramento, além de executar, automaticamente, inúmeras atividades relacionadas ao voo.

Portanto, foi estudado que o piloto automático é um dos elementos do sistema de gerenciamento de voo, e que, ao se incorporar diversos recursos e sistemas integrados a ele, formando um único equipamento, tem-se o chamado sistema automático de controle de voo.

Foi destacado que um sistema diretor de voo eletrônico calcula e indica a atitude necessária da aeronave para atingir e manter uma condição de voo pré-selecionada e que a integração de recursos de navegação no indicador de atitude é extremamente útil, principalmente para a fase de voo de pouso por instrumento. Da mesma forma em que foi definido o indicador de atitude e diretor de voo eletrônicos (EADI) como sendo uma versão avançada do indicador de atitude elétrico, enquanto o indicador eletrônico de situação horizontal (EHSI) passou a ser uma versão evoluída do indicador de situação horizontal (HSI).

A tarefa de realizar o contínuo monitoramento dos instrumentos de voo e da instrumentação de voo, além dos parâmetros dos motores e da célula das aeronaves são áreas apropriadas para o uso de computadores, e que o sistema do monitoramento eletrônico centralizado da aeronave (ECAM) e sistema de alerta da tripulação e indicação do motor (EICAS) foram projetados para auxiliar nessa tarefa.

Por último, foi enfatizado que o nível mais alto de sistema automatizado é o voo realizado por meio do sistema de gerenciamento de voo (FMS), uma vez que pode ser considerado um sistema de computador mestre que controla todos os outros sistemas, computadorizados ou não, coordenando ajustes de voo, motor e parâmetros da aeronave automaticamente ou instruindo o piloto sobre o que precisa ser feito.

Capítulo 9

Alarmes e avisos

A implantação de alarmes e avisos na cabine há muito tempo representa uma das preocupações dos fabricantes de aeronaves. Isso porque, em qualquer situação insegura ou emergencial, mecanismos de alerta são essenciais ao conhecimento do piloto e da tripulação. É fácil compreender essa preocupação, principalmente se o raciocínio for elaborado com base nas grandes aeronaves equipadas com complexos painéis analógicos, cujas tripulações eram submetidas a grandes esforços para monitorar uma grande quantidade de instrumentos no painel. Sem a ajuda do sistema de alarme e avisos, essa empreitada seria ainda mais desgastante e insegura.

Nas aeronaves modernas, a utilização de recursos eletrônicos e de computadores permitiu a integração de sistemas e a delegação das tarefas de monitorar as atividades de voo e dos diversos sistemas da aeronave aos computadores e seus sistemas, deixando o piloto com o foco na pilotagem. Dessa forma, os computadores, ao detectarem alguma falha ou condição sobre a qual a tripulação deva ser informada, acionam os canais de interface com a tripulação, por meio de alarmes e avisos na cabine, que podem ser efetivados mediante luzes no painel da cabine, mensagens nos monitores ou sinais sonoros, ou, ainda, a combinação desses.

Portanto, o sistema de alarmes e avisos é o meio pelo qual os sistemas analógicos ou digitais alertam de maneira clara, simples e tempestiva a tripulação sobre algum problema ou condição que requer atenção. Destaca-se que existem outros meios de alertar a tripulação sobre uma eventual condição insegura, cita-se, por exemplo, a utilização de um motor vibratório que faz o manche vibrar quando o ângulo de ataque da aeronave está na iminência de atingir o ponto de estol. Nesse caso, além dessa vibração, ele é projetado à frente, fazendo com que o nariz da aeronave baixe e ela saia da condição iminente de estol.

Em seguida, são explicitados alguns sistemas de alertas e avisos, bem como técnicas empregadas para facilitar a percepção das informações mais relevantes fornecidas pelos instrumentos por parte da tripulação.

9.1 Sistema de indicação

As indicações de informação nas cabines de uma aeronave devem ser apresentadas de forma intuitiva, da maneira mais fácil possível e com distinções que permitem avaliar instintivamente o grau de importância da informação. Essa preocupação é plenamente lógica, pois, durante os eventos críticos anormais de um voo, como, por exemplo, uma pane séria em algum componente, não há tempo para ser gasto com leituras complexas. Destarte, a indicação das informações relevantes no painel, bem como alarmes e avisos, possui uma lógica de apresentação que permite distinguir o tipo de informação e o que ela representa.

Os instrumentos de aeronaves são projetados para exibir as condições atuais de funcionamento e notificar as insatisfatórias. Para isso, há uma padronização de cores, com vistas à diferenciação entre as mensagens apresentadas no indicador dos instrumentos, sejam eles analógicos ou digitais. Por exemplo, a cor verde indica uma condição satisfatória. O amarelo é usado para alertar sobre uma circunstância séria que exige monitoramento. Por sua vez, o vermelho significa que o funcionamento de determinado equipamento entrou em um estado insatisfatório. Essas cores fornecem uma informação rápida ao piloto sobre as condições apresentadas.

Na Figura 241, visualiza-se a apresentação de informações em uma tela de monitoramento, na qual se utiliza o código de cores para apresentar as faixas de operação de sistemas relacionados ao motor da aeronave.



Figura 241 - Código de cores de indicação



Figura 242 - Mensagens estampadas nas luzes do painel anunciador

A maioria das aeronaves inclui luzes anunciadoras que se acendem quando acontece algum evento que precisa de atenção imediata. Elas são apresentadas com as mesmas cores já mencionadas ou, ainda, na cor âmbar. São comuns luzes individuais próximas ao instrumento com o qual está relacionado o aviso ou o alarme. Também é comum em aeronaves maiores a presença de um painel anunciador, equipado com luzes individuais para indicações relativas a diversos sistemas (Figura 242). Nesse painel analógico, as luzes anunciadoras destacam as palavras estampadas sobre ela, associando, de forma clara e rápida, o alerta ao sistema ou à origem do problema. A Figura 242 apresenta um painel anunciador analógico.

A presença de um painel anunciador foi uma solução encontrada para apresentar a situação de diversos sistemas e componentes de aeronaves complexas, a qual tem de ser conhecida e mantida. Em caso de alguma pane, o sistema de alarme é acionado e a luz no painel permanece acesa até a solução do problema. Mecanismos de alerta centralizados são projetados para anunciar mensagens críticas relacionadas a diversos sistemas e componentes de uma maneira organizada e simplificada. Com frequência, isso é realizado por meio da instalação de um único painel anunciador em algum lugar de destaque no painel de instrumentos. Esse sistema pode se apresentar de forma diferente em diversas aeronaves, dependendo da preferência do fabricante e do sistema instalado. A Figura 243 exemplifica a localização do painel anunciador na região central do painel.

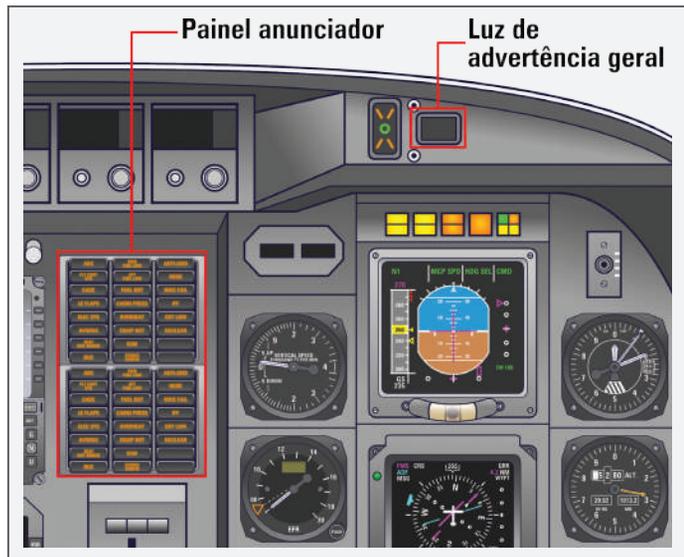


Figura 243 - Painel anunciador de alertas e luzes mestre de alerta

Para tornar os alertas mais efetivos, são instaladas as luzes de advertência geral, em inglês, *master caution*, em posição de destaque no painel (Figura 244). Elas são usadas para chamar a atenção da tripulação para uma situação crítica, juntamente com o painel anunciador (Figura 243). A luz de advertência geral acende indicando que há um problema, e a luz do painel anunciador acende informando qual é o problema. Essas luzes são acionadas sempre que quaisquer dos sistemas participantes ou dos componentes requeiram atenção. Uma vez notificado, o piloto pode cancelar a advertência geral, mas a luz anunciadora do componente permanece iluminada até que a situação que causou a advertência seja resolvida. As luzes de advertência geral são desarmadas para que, caso haja um novo problema, se acendam apontando que uma nova situação requer atenção.

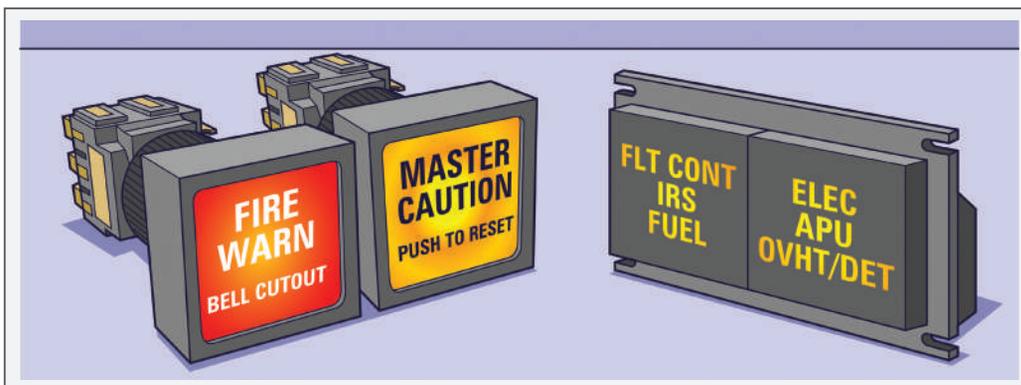


Figura 244 - Luzes de alerta geral e luzes específicas de alertas

Com vistas a testar o funcionamento de todas as lâmpadas do sistema, basta pressionar o interruptor de teste do painel anunciador. Esse teste energiza todo o circuito de alerta e as luzes anunciadoras, com o objetivo de confirmar o funcionamento de todos os componentes. Ele aponta a necessidade de substituição das minúsculas lâmpadas usadas no sistema (Figura 245).



Figura 245 - Mensagens de alerta no painel do EICAS

9.2 Sistema sonoro de alarme

Outra forma eficiente de chamar a atenção da tripulação é a utilização de alarmes sonoros. Esses sistemas, chamados de alerta aural, ou sonoro, operam em conjunto com os sistemas anunciadores iluminados. Eles informam ao piloto, de forma audível, uma situação que exige atenção. Diversos tons e frases soam na cabine para alertar à tripulação sobre a existência de determinadas condições que requerem atenção. Por exemplo, uma aeronave com o trem de pouso **escamoteável** usa um sistema de alerta sonoro para avisar à tripulação uma condição insegura na operação do trem. Uma campainha toca se o manete de potência está recuado e o trem de pouso não está na posição embaixo e travado.

Uma aeronave típica da categoria de transporte comercial dispõe de um sistema de alerta sonoro que avisa ao piloto os seguintes eventos: decolagem anormal, pouso, pressurização, condições de velocidade *mach*, fogo em um motor ou uma das rodas, recomendações para evitar colisão, entre outros.



Escamoteável: fazer com que (algo) desapareça; quando se refere a trens de pouso, são aqueles que são recolhidos para dentro da fuselagem do avião.

Resumindo

Neste capítulo, foram estudados os recursos empregados para alertar a tripulação sobre uma condição insegura ou emergencial durante o voo. Foi visto que existem sistemas de alertas e avisos que utilizam mensagens visuais, por meio de luzes no painel, e, também, sinais sonoros na cabine.

Destacou-se que, nas aeronaves analógicas mais complexas, há um painel anunciador com diversas luzes, que alertam a tripulação sobre alguma falha em determinado componente ou sistema. Da mesma forma, foi explicado que essas aeronaves possuem luzes de aviso e de alerta geral, que se acendem juntamente com a luz do painel anunciador, a qual registra a falha específica no componente.

Ademais, viu-se que é possível desarmar a luz de alerta geral, enquanto a luz do painel anunciador permanece acesa, até que a falha seja resolvida.

Foram explicados os sinais de aviso sonoro, os quais operam em conjunto com os sinais visuais, e as cores usadas na instrumentação e nas mensagens de alerta, que seguem um padrão que permite diferenciar o tipo de mensagem e o grau de importância da informação. Em adição, foi explicitado que as cores verde, amarelo e vermelho são utilizadas nesse processo, além da luz âmbar, que também é usada em algumas mensagens de aviso e de alerta.

Capítulo 10

Outros instrumentos

Existem outros instrumentos utilizados para distintos fins que apresentam princípios de funcionamento diferenciados dos levantados anteriormente. Na sequência, são explicitados esses recursos e suas especificações.

10.1 Relógio

O relógio é um aparelho muito antigo, presente nos primeiros aviões dos precursores do voo. Atualmente, um indicador de tempo é necessário na cabine de uma aeronave certificada com IFR. Os pilotos usam relógio ou cronômetro ao longo do voo para marcar o tempo de certas manobras.

O relógio analógico apresenta funcionamento que dispensa detalhes. Ele marca o tempo decorrido com precisão, com base na atuação de engrenagens de tamanhos variados, as quais movimentam em sincronia os ponteiros de marcação dos segundos, dos minutos e das horas (Figura 246).

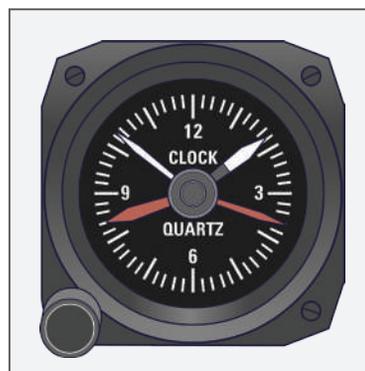


Figura 246 - Relógio analógico

A posição do relógio no painel varia. Muitas vezes, ele fica localizado próximo ao grupo dos instrumentos de voo, com frequência, próximo ao coordenador de curva (Figura 247).



Figura 247 - Relógio digital no painel

Por muitos anos, os chamados relógios mecânicos de oito dias foram utilizados para controlar o tempo nas aeronaves, principalmente pelo fato de serem de corda e não necessitarem de energia elétrica. Nesse contexto, eram considerados confiáveis e precisos para o uso previsto. Alguns relógios desse tipo dispunham de um botão de pressão para cronometrar o tempo decorrido em determinado lapso de tempo.

Todavia, eles foram gradativamente substituídos por relógios elétricos, à medida que os sistemas elétricos foram evoluindo e se tornando redundantes e mais confiáveis. Estes últimos são dispositivos analógicos alimentados por uma bateria dedicada ou pela barra de bateria da aeronave. Assim, eles continuam a operar, mesmo nos casos de falha no mecanismo de geração de energia elétrica da aeronave. Os relógios elétricos de aeronaves são, com frequência, empregados em aeronaves multimotoras, nas quais uma perda total de energia elétrica é improvável.

Com a evolução dos equipamentos aviônicos, outras formas de indicar o tempo com muito mais recursos passaram a equipar as cabines. A modernidade permite o uso de um relógio digital eletrônico com um leitor de LED bastante preciso, que consome pouca energia e apresenta alta confiabilidade por não possuir partes móveis. O emprego de componentes eletrônicos permitiu a expansão de recursos nos relógios, tais como:

- marcação automática do tempo decorrido e do tempo de voo;
- memória de todas as funções;
- cronômetro;
- indicação de temperatura e de data em alguns casos.

Em virtude do baixo consumo, uma pequena bateria individual é suficiente para seu funcionamento em caso de colapso do sistema elétrico. Nas aeronaves com sistemas computadorizados digitais, é possível usar o relógio interno do computador, ou um relógio GPS, como relógio digital localizado no monitor primário de voo (PFD).

10.2 Indicador de torque

O torque é uma força que tende a girar ou a virar um objeto. Ele é observado, por exemplo, na aplicação de força em uma chave de boca para apertar um parafuso. Nesse caso, este último gira sob a ação da chave, e sua estrutura sofre o esforço de torção, pois, em uma extremidade, age a força no sentido horário, enquanto, na outra, a força da resistência no sentido contrário. Caso o esforço ultrapasse o limite de resistência do parafuso, este se parte. No caso dos motores convencionais e a turbina, a potência do motor é aplicada no eixo, que gira em função dessa potência. Esse eixo possui um limite de esforço que não pode ser ultrapassado sob o risco de se partir. A medição do torque visa a monitorar o esforço a que o eixo do motor está sendo submetido, a fim de que não ocorra a ultrapassagem.

Portanto, a potência fornecida pelo motor para acionar o eixo da hélice é derivada da relação: $\text{potência} = \text{torque} \times \text{velocidade}$. Logo, a medição do torque é um parâmetro consistente para a determinação da potência efetivamente fornecida pelo motor.



LED: o diodo emissor de luz, em inglês, *light emitting diode*, também conhecido pela sigla LED, é usado para a emissão de luz em locais e instrumentos, onde se torna mais conveniente a sua utilização no lugar de uma lâmpada.

A potência é derivada da medição do torque e da velocidade e a indicação é, normalmente, utilizada para turboélices e para rotores de helicópteros. Os indicadores são calibrados em uma porcentagem do torque máximo ou potência no eixo, em inglês, *shaft horsepower* (SHP). Indicador de torque típico usado em helicóptero bimotor está mostrado na Figura 248. Nele, as indicações são referentes ao torque de saída de ambos os motores e do rotor principal, em inglês, *master rotor* (M/R).



Figura 248 - Indicador de torque de helicóptero bimotor

Há outros indicadores que utilizam uma escala calibrada em libras pés (Figura 249). Nos painéis digitais, a indicação é apresentada no painel de monitoramento dos parâmetros dos motores.



Figura 249 - Indicador de torque do motor analógico

Existem vários métodos para se medir o torque. Um deles aplica duas rodas dentadas em posições diferentes do eixo de potência. À proporção que o torque aplicado ao eixo varia, a diferença de fase entre os sinais obtidos a partir dos dois sensores de fase (Figura 250), instalados junto às rodas dentadas, aumenta.

Para entender a diferença de fases, basta observar o eixo exemplificado na Figura 250, com uma marcação em cada roda dentada, de maneira que elas fiquem alinhadas. Quando não há torque no eixo, é certo que elas ficam alinhadas. Entretanto, à medida que o torque aumenta, o eixo tende a executar um movimento de torção, propiciando maior avanço da roda dentada mais próxima do motor que a outra receptora da carga de resistência. Ao ser maior a potência aplicada, maiores serão a torção e o torque no eixo. Por conseguinte, o valor deste último será obtido a partir da diferença de fase entre as saídas dos dois sensores.

Há um limite para a torção do eixo dependente de suas dimensões e materiais de fabricação. Dessa forma, é importante manter uma harmonia entre o motor e a carga a ser suportada pelo eixo.

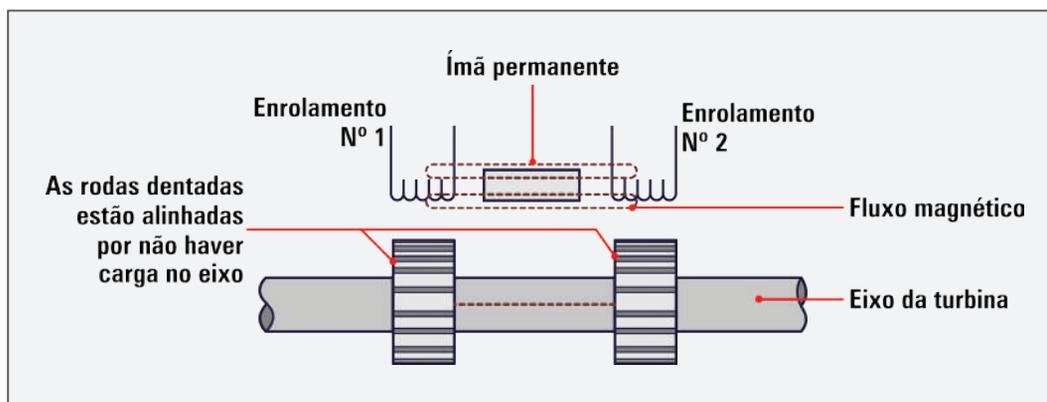


Figura 250 - Princípio de funcionamento do transdutor de torque

As Figuras 251.A, B e C ilustram as posições das fases em diferentes regimes. É possível notar que as fases estão alinhadas quando não há torque. No entanto, ao ser maior o torque, a diferença entre as fases aumenta.

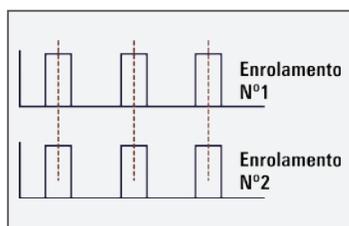


Figura 251.A - Posição das fases sem torque no eixo

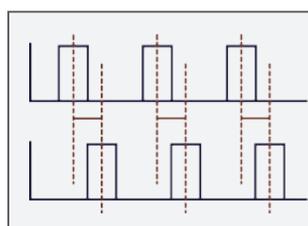


Figura 251.B - Posição das fases com pequena carga no eixo

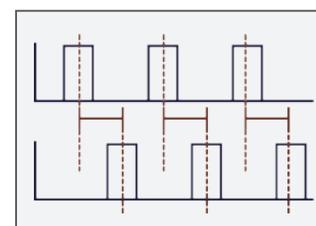


Figura 251.C - Posição das fases com grande carga no eixo

Ainda assim, é possível realizar a medição do torque por intermédio da instalação de um medidor de deformação no interior do eixo, sinalizando sua deformação durante a operação do motor. Nesse processo, há a possibilidade de serem utilizadas folhas metálicas finas.

Até o momento foi destacado o funcionamento da parte sensora do sistema, a unidade responsável por obter a variação de torque no eixo, com base na diferença de sinais de fase. A partir desse ponto, os sinais obtidos pelos sensores precisam ser tratados a fim de movimentarem o motor do indicador na cabine. Essa tarefa cabe à unidade condicionadora de sinais (UCS), segundo a qual processa os sinais de diferença de fase dos anéis do torquímetro, transformando-os em sinais de tensão de corrente contínua, proporcional ao torque aplicado pelo motor no eixo de potência. Após o tratamento, há a alternativa de o sinal ser empregado para mover o ponteiro do instrumento na cabine. No indicador, o amplificador servo compara a posição do ponteiro de torque, em relação ao sinal recebido, e movimenta, proporcionalmente, o motor CC. Caso o sinal de entrada seja inválido, a indicação será zero. São considerados dados inválidos os valores abaixo de zero.

A unidade condicionadora de sinais também é responsável por compensar a influência da temperatura e da dilatação dos componentes na medição do torque, além de executar outras tarefas. Esse dispositivo é igualmente chamado de unidade de tratamento do sinal em outros sistemas de medição.

Outro aspecto importante a ser considerado em um projeto de sistema de medição de torque é a compensação das diferenças de fabricação e de composição de material do qual é fabricado o eixo do motor, de modo que seja efetivado um ajuste do sinal de torque a um valor nominal, compensando essas diferenças. Para tanto, a unidade condicionadora de sinais dispõe de um conector de caracterização, calibrado durante os testes de fabricação do motor. Essa calibração não deve ser alterada ao longo dos procedimentos de manutenção da aeronave.

Em resumo, a diferença entre os sinais produzidos pelos anéis dentados do torquímetro, tanto o de fase quanto o de temperatura, é a base para a geração da indicação do torque. Antes de chegarem ao indicador na cabine, eles precisam ser transformados em sinais de tensão e compensados por meio da UCS. Após o tratamento, são transmitidos ao indicador sinais de tensão, de forma proporcional ao torque aplicado pelo motor no eixo de potência.

Outra forma de medir o torque é por meio de componentes instalados na caixa de redução. São um cilindro e um pistão, instalados em uma área chamada câmara de torquímetro. Completam, ainda, o sistema uma válvula de êmbolo e sua mola.

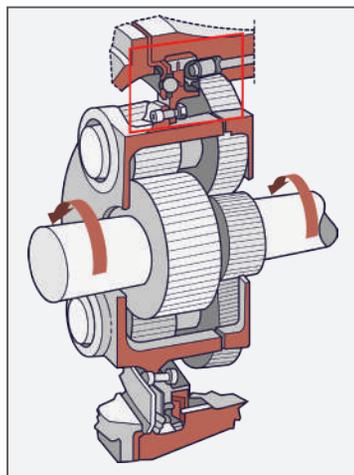


Figura 252 - Posição do torquímetro na caixa de redução

O conjunto do torquímetro é acionado pela engrenagem anular do primeiro estágio de redução, a qual apresenta dentes em formato helicoidal em sua superfície externa. Essa engrenagem engraza na superfície interna da caixa de redução, que apresenta dentes semelhantes usinados nessa região, como visto na Figura 252. Nessa configuração, quando a engrenagem angular gira a uma determinada rotação, ela tende a se projetar à frente, ou seja, no sentido axial. Dessa forma, a engrenagem se desloca de seu alojamento e aciona o pistão, que fica encostado junto à face da engrenagem.

Ao ser tocado pela engrenagem, o pistão aciona a válvula do conjunto contra a ação da sua mola. O deslocamento do êmbolo da válvula provoca a abertura de um orifício calibrado, que permite a entrada de um fluxo de óleo pressurizado na câmara do torquímetro. No detalhe da Figura 253, é possível perceber os comportamentos do pistão e da válvula, ao serem acionados pela engrenagem anular. Ao ser tocado, o pistão força a sua mola para dentro, abrindo a passagem de óleo. Quando a engrenagem se afasta, a mola recoloca o pistão na posição de origem.

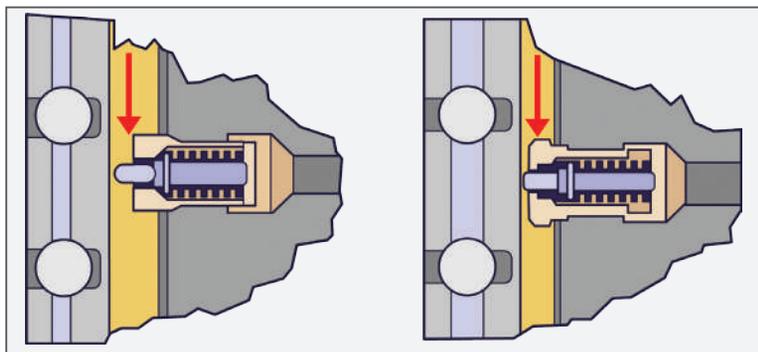


Figura 253 - Sensor do sistema de indicação de torque



Calço hidráulico: situação que ocorre quando um fluido se acumula no interior de uma câmara, na parte traseira do pistão, impedindo seu deslocamento, por não haver abertura de escoamento do fluido.

O movimento do êmbolo da válvula cessa no momento em que a pressão de óleo da câmara do torquímetro equilibra o torque, que, no processo, está sendo absorvido pela engrenagem anular. À medida que varia a potência do motor, novo desequilíbrio ocorre no sistema, ocasionando a reinicialização do ciclo, até o restabelecimento do equilíbrio. Para que não aconteça **calço hidráulico** do sistema, da câmara do torquímetro é retirada uma pequena quantidade de óleo para o interior da caixa de redução, mediante um orifício na parte superior do cilindro.

Haja vista que há a possibilidade de a pressão externa da caixa de redução ser diferente da interna, interferindo na pressão total exercida sobre o pistão do torquímetro, a interna também é medida. Dessa forma, a diferença entre a pressão do torquímetro e a da caixa de redução indica exatamente o valor do torque produzido. Para se obterem os valores de pressão, as duas amostras são dirigidas, por meio de passagens internas, até duas tomadas localizadas na parte dianteira da caixa de redução, onde são feitas as ligações para o transmissor de torque.

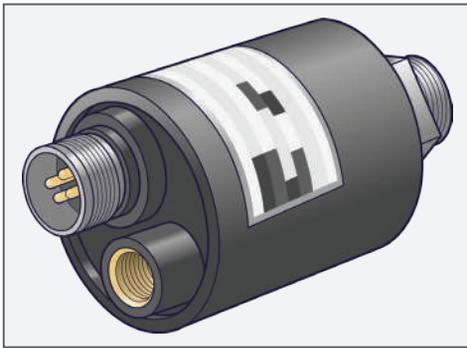


Figura 254 - Transmissor de torque

Outro componente do sistema, o transmissor ou transdutor (Figura 254), é responsável pela segunda fase do processo, que consiste em converter as variações de pressão em sinais elétricos para o indicador no painel da cabine. É uma unidade sensora lacrada, do tipo relutância variável, equipada com uma tomada para a linha de pressão da câmara do torquímetro e de um encaixe para conexão da fiação elétrica que o alimenta com 26 VCA, 400 Hz e o liga aos indicadores na cabine. A pressão interna da caixa de redução é recebida por meio de um adaptador ao qual o transmissor é acoplado.

Ao variar as pressões infligidas ao transmissor, o diafragma em seu interior move um dispositivo magnético, por intermédio de dois enrolamentos estacionários. A diferença entre essas pressões, proporcional ao torque do motor, age no diafragma fazendo o valor da relutância relativa dos enrolamentos do transmissor ser alterado. Isso produz um sinal de tensão correspondente à diferença de pressão recebida no transmissor. Esse sinal é, então, repassado ao indicador.



Figura 255 - Indicadores de torque, transmissores e conexões

O indicador é uma unidade selada (Figura 255). Ele é composto de dois enrolamentos fixos com tensão constante, que, em conjunto com os enrolamentos do transmissor, constitui uma ponte de corrente alternada (CA) e em um enrolamento móvel. Este último é empregado como galvanômetro e recebe sinal (tensão) proveniente do transmissor, além de deslocar o ponteiro do indicador proporcionalmente ao sinal recebido.

10.3 Indicador de fadiga

Um dos aspectos importantes a ser observado durante a vida útil de uma aeronave é a definição sobre até quando a sua estrutura se mantém em condição de aeronavegabilidade. Na elaboração do projeto de concepção e de manutenção de aeronaves, é dado especial destaque à questão da fadiga, bem como ao fenômeno do envelhecimento, observado ao longo de seu ciclo de vida. Dessa forma, as diferentes medidas tomadas para garantir a integridade estrutural ao longo da vida útil da aeronave fazem parte de um planejamento que a segue em todo o seu ciclo de vida. O monitoramento da saúde estrutural é uma excelente ferramenta para acompanhar o estado estrutural da aeronave, corrigir, se for o caso, algum procedimento ou componente e checar as estruturas em caso de ocorrência de algum esforço atípico.

A fadiga em estruturas de aeronaves tem sido um problema desde o início do século XX, uma vez que a acumulação de danos resultantes de cargas cíclicas é capaz de levar ao comprometimento da resistência estrutural. De início, as aeronaves foram especificamente concebidas de tal forma que pudessem suportar as cargas para uma vida definida, sem rachaduras visíveis. Os progressos realizados na mecânica da fratura permitiram concluir que os danos, por exemplo, fissuras, são permitidos na estrutura, enquanto existe a possibilidade de controle de sua propagação. Isso ensejou a elaboração de projetos de aeronaves com estruturas mais leves, porém exigiu que fossem realizadas mais inspeções programadas ao longo de sua vida útil. O aumento dos custos com mais revisões se mostrou vantajoso, uma vez que diminuiu o peso da aeronave. Posteriormente, esse número de revisões passou a minimizar na medida em que foram incorporados equipamentos e sensores de estado sólido, os quais acompanham constantemente o estado de diversos pontos críticos da estrutura da aeronave, permitindo um monitoramento eficiente e levando ao aumento dos intervalos entre as inspeções.

Sem dúvida, uma aeronave sofre grande número de forças e de cargas durante as fases de seu voo, as quais variam qualitativa e quantitativamente dependendo do modelo, do tamanho, do tipo de voo, entre outras variáveis. Além disso, tem de suportar as ações de forças que agem em suas estruturas com efeito cumulativo, causando, eventualmente, excesso de fadiga, caso não haja um programa de qualidade capaz de limitar a operação a um esforço suportável por sua estrutura.

É possível calcular a fadiga de aeronave de diversas maneiras, entre as quais se utilizam comumente:

- índice de fadiga (IF) - usado em aeronaves equipadas com aparelhos para medir as forças que agem em sua estrutura;
- índice de horas de voo (IH) - indicado para aeronaves não sujeitas a altas cargas de estresse de manobras, tais como os aviões de linhas aéreas, embora a fadiga de alguns tipos militares seja calculada por IH.

O índice de fadiga para uma célula é calculado durante os ensaios destrutivos estáticos (Figura 256) de uma ou mais células a fim de obter um valor de fadiga para o tipo de célula. O componente crítico da célula que apresenta a tolerância à fadiga menor é, geralmente, utilizado como o parâmetro para o IF total da aeronave, considerada a carga total de 100 IF. Assim, o equipamento de medição de fadiga é calibrado com crédito de 100 IF para aquele

tipo de fuselagem e, então, é instalado na aeronave. Ele monitora as cargas (G), as cargas de choque, etc. e exibe um total cumulativo de unidades IF consumido.

Quando o equipamento responsável por registrar a quantidade acumulada de cargas atinge a marca de 100 IF, a aeronave deve ser retirada de operação para que sua estrutura seja avaliada, tendo em vista que ela atingiu o número máximo de esforço previsto pelo fabricante.

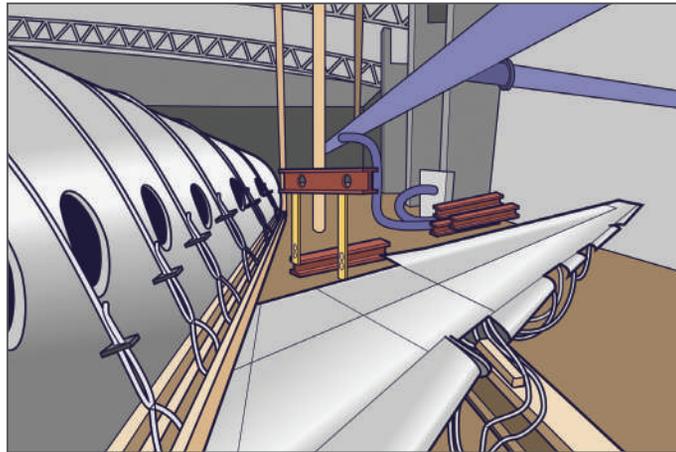


Figura 256 - Ensaio estrutural da aeronave

O equipamento utilizado nas aeronaves com controle de IF para registrar os esforços sofridos na estrutura é denominado acelerômetro registrador. Ele é montado próximo ao centro de gravidade (CG), onde monitora as acelerações verticais da linha de voo e registra o número de vezes que os ciclos de determinada aceleração são atingidos. O medidor de fadiga (acelerômetro) registra oito tipos de acelerações. Ele marca apenas as acelerações ocorridas em voo, pois o seu circuito de alimentação elétrica é aberto por um microinterruptor no trem de pouso quando este toca o solo, ou por outro localizado no interior do velocímetro.

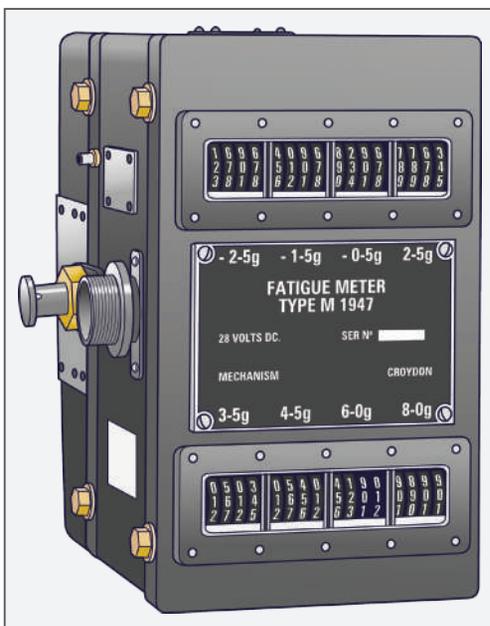


Figura 257 - Acelerômetro usado no monitoramento de fadiga

A Figura 257 mostra um medidor de fadiga. Esta ferramenta é uma caixa metálica que possui um acelerômetro e oito contadores eletromagnéticos. Cada contador registra um tipo de aceleração (-2,5 G; -2 G; -1 G; + 2,5 G; +3,5 G; + 4,5 G; + 6 G; + 8 G).

Conforme destacado, somente oito acelerações são registradas. Isso é possível porque os contadores atuam em dois modos, quais sejam, travado e destravado. Quando um determinado valor de aceleração é alcançado, o circuito trava. Ele será destravado completando a contagem, quando o valor próximo de 1 G for atingido. Essa diferença entre os valores é denominada faixa limite, e os contadores são diferenciados pelo valor de trava. Os valores específicos de acelerações representam aquelas que causam danos significativos de fadiga à estrutura.

As acelerações de alta frequência resultante de vibrações causadoras de danos desprezíveis de fadiga podem ser confundidas com acelerações relativas a lentas variações do fator

de carga (ocasionados por manobras), que devem ser registradas. Para evitar essa interferência, o acelerômetro tem um sistema especial e este comanda rigidamente a resposta de frequência, a fim de que sejam registradas somente as acelerações desejadas e desprezadas as resultantes de vibrações. O sistema é composto de mola e massa principais, mola e massa secundárias e um amortecedor de corrente parasita proporcional à velocidade. Ele é projetado para cortar instantaneamente a razão da amplitude da resposta do mecanismo com o aumento de frequência a ser obtida por um sistema simples de uma mola, uma massa e um amortecedor proporcional. Essa configuração possui o benefício de diminuição do fator de carga no sistema de amortecimento, que enseja confiança e vida mais longa do sistema. Com vistas a resguardar o acelerômetro dos impactos ordinários do manuseio, o instrumento é incorporado com um recurso de trava para trânsito que imobiliza o acelerômetro antes da instalação na aeronave (Figura 258).

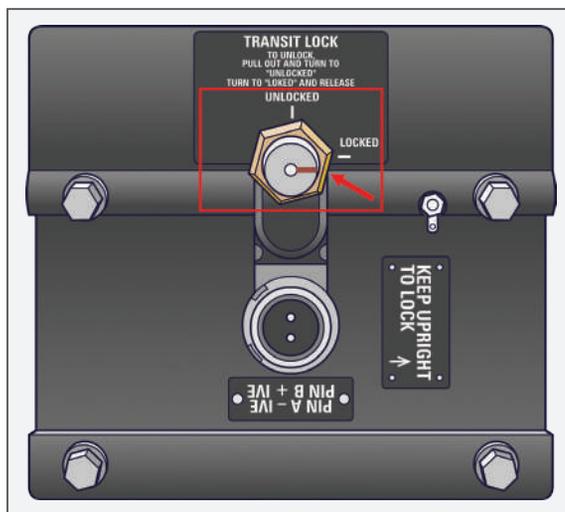


Figura 258 - Trava do acelerômetro para transporte

Cabe destacar que os valores de aceleração são absolutos, isto é, em voo nivelado, em linha reta, a aceleração é representada por 1 G. O fator (**G**) é considerado positivo quando a aeronave contraria a gravidade, ou seja, a aplicação do fator de carga (**G**) positivo causa no avião o efeito de torná-lo mais pesado (aceleração positiva = soma de peso). No movimento contrário, há perda de peso, logo o fator de carga é negativo. Quando o instrumento está montado na aeronave, a massa principal se move para baixo em resposta ao fator de carga positivo e para cima em relação ao eixo do avião para o fator negativo.

A Figura 259 exemplifica a operação do mecanismo mecânico de um acelerômetro. Ele opera desta forma:

- quando uma aceleração positiva é aplicada na aeronave, o instrumento também recebe essa carga, inclusive a sua na massa sensora, a qual está apoiada na mola principal;
- a massa tende a permanecer na posição em que se encontrava nesse pelo fato de a aeronave se movimentar para cima. Logo, a massa desliza para baixo;
- esse movimento de descida em relação à caixa é transmitido ao tambor da corrente por meio das molas secundárias e da corrente, ocasionando o giro do ressalto (instalado no mesmo eixo de montagem do tambor da corrente) sobre a face do comutador;

- o amortecimento do movimento é realizado por uma unidade de amortecimento de corrente parasita acionada pela engrenagem que, adicionalmente, atua como uma massa secundária.

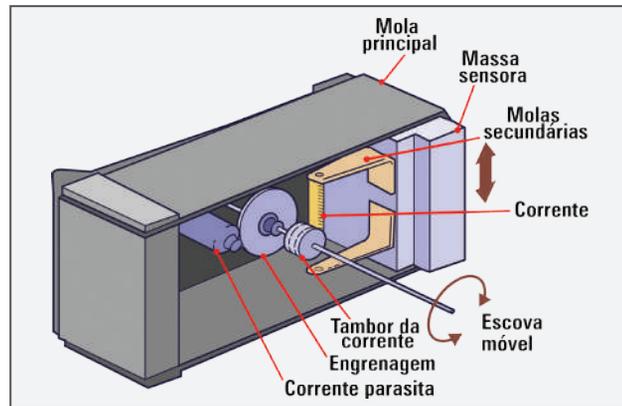


Figura 259 - Trava do acelerômetro para transporte

Em razão do movimento do avião, a massa sensora, sujeita a acelerações, oscila, desse modo, a corrente altera o movimento linear vertical do peso em rotativo da escova. Este último perpassa a superfície do comutador em quantidade proporcional ao valor da aceleração sofrida e ativa os contadores alcançados pela aceleração, assinalando, assim, o valor atingido. Nas acelerações negativas, o processo é o mesmo, porém a massa se desloca para a parte superior da caixa do instrumento.

Monitoramento de fadiga em sistemas integrados

Nas aeronaves modernas, o sistema de monitoramento de cargas operacionais apresenta os mesmos objetivos do sistema analógico. Acontece que a utilização de componentes de estado sólido permite o monitoramento de muito mais fatores que influenciam na fadiga estrutural da aeronave, além da aceleração, como será abordado mais à frente.

O monitoramento de cargas tornou-se comum em aviões de caça e passou a ser usado em aeronaves civis e de transporte. Ele é extremamente útil para as avaliações de fadiga, de dimensionamento da vida útil da aeronave, de necessidade ou não de inspeção não programada em virtude de esforço atípico e de planejamento da manutenção ao longo da vida útil do avião.

Os dados fornecidos pelos sensores são gravados e baixados pela equipe de manutenção. Eles são encaminhados à fabricante da aeronave ou à unidade credenciada, que processa as informações e verifica, além das cargas acumuladas, os esforços que a aeronave sofreu em um dado período de tempo. Como se vê, o princípio é o mesmo do sistema analógico, porém não há a necessidade de se verificarem os registros no acelerômetro, além de serem coletados mais dados para o monitoramento de esforço da aeronave.

O dinamismo no desenvolvimento de sensores verificado na indústria aeronáutica permitiu um novo conceito de monitoramento do estado estrutural da aeronave. Isso se deve, dentre outros aspectos, à miniaturização dos equipamentos, ao aumento sem precedente no desempenho deles e à diminuição dos preços, combinados com o notável progresso alcançado no tratamento

dos sinais dos sensores, por meio da multiplicação da capacidade de processamento dos computadores e pelo desenvolvimento de avançados algoritmos. Esse novo modelo é conhecido como monitoramento da saúde estrutural, em inglês, *structural health monitoring* (SHM). É um processo em andamento, em que novos e mais sensores permitem o monitoramento das cargas operacionais em vários locais da aeronave, com muito mais detalhes. Esse sistema possibilita o cálculo de vida operacional consumido pela aeronave em determinado período de tempo, de maneira muito mais consistente com o uso real do equipamento. Além disso, o sistema é capaz de orientar e treinar os pilotos em relação à maneira de voar, com vistas a promover o menor desgaste da aeronave. O sistema de monitoramento lembra o sistema nervoso humano, uma vez que possui a capacidade de perceber o que acontece em praticamente toda a estrutura do avião, por meio de sua rede de sensores, como se observa na Figura 260.

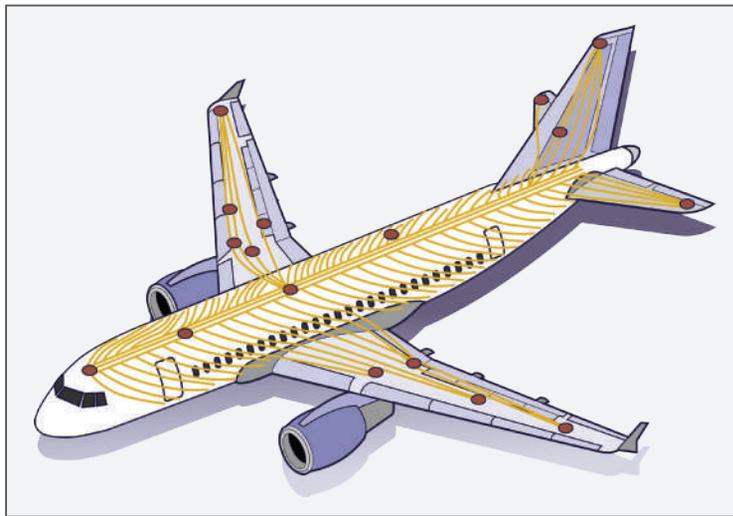


Figura 260 - Rede de sensores de monitoramento da saúde estrutural da aeronave

Além da questão das forças de aceleração a que são submetidas as estruturas das aeronaves, existem outros sensores que permitem o monitoramento de locais críticos sujeitos a danos nas estruturas. Essas informações são armazenadas com o objetivo de serem acessadas sempre que preciso. Isso definitivamente ajuda a evitar grande quantidade de desmontagem e remontagem de equipamentos, que, normalmente, é necessária ao acesso às áreas críticas para se obter a informação sobre um possível dano em determinada estrutura, nos casos em que a aeronave é submetida a cargas de aceleração fora do comum. Muitas vezes, após o acesso à área, é verificado que nenhum dano foi encontrado. Nesse caso, houve o emprego desnecessário da mão de obra e a aeronave ficou indisponível no período. Caso a referida área fosse monitorada por sensores, nada disso seria necessário.

Outro aspecto importantíssimo no monitoramento é que ele permite individualizar o comportamento estrutural da aeronave. Isso é extremamente relevante, pois os intervalos entre as inspeções são designados em função dos elos mais fracos do avião. Nesse cenário, é aberta a possibilidade de se realizar um procedimento de manutenção complexo em virtude de pequena falha na frota de aeronaves. O monitoramento permite individualizar o processo de manutenção, dentro de uma margem mais ampla, amparado nos resultados do monitoramento.

O sistema de monitoramento da saúde estrutural (SHM) considera a tendência de integração de sensores em componentes estruturais que permitem o monitoramento contínuo da estrutura, combinado com o processamento avançado automatizado de sinais. Para tanto, são utilizados sensores de fibra ótica, de elementos piezoelétricos, de sistemas microeletromecânicos (MEMS), de monitoramento de vácuo comparativo, em inglês, *comparative vacuum monitoring* (CVM) (Figura 261), dentre outros. Esses sensores permitem o monitoramento de tensões, de campos elétricos, de temperatura, de pressão, de umidade, de produtos químicos e de muito mais.

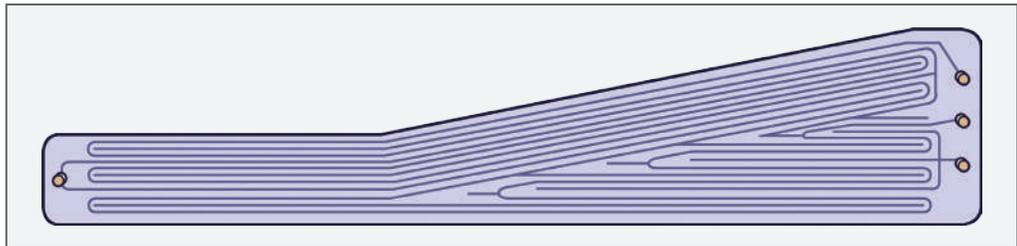


Figura 261 - Circuito de um sensor CVM

Como exemplo desse processo, cita-se a instalação de uma fina lâmina de monitoramento de vácuo comparativo (CVM) em determinada carenagem. Essa lâmina possui diversos canais, os quais são preenchidos com ar e vácuo alternadamente, conforme se verifica na Figura 262. Como a lâmina é fixada à parede da fuselagem, se esta apresentar uma rachadura, haverá o rompimento de canais, fazendo com que seja indicada a presença de descontinuidade naquela região.

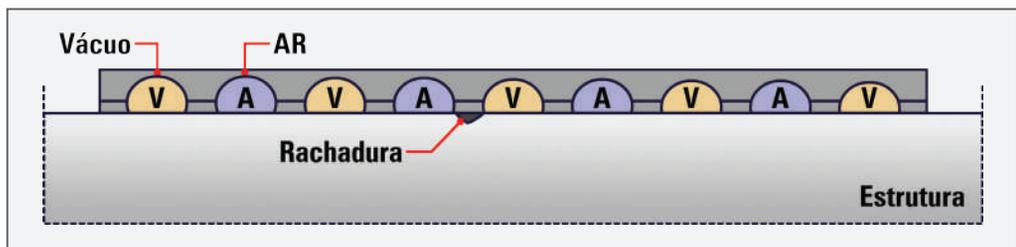


Figura 262 - Canais de vácuo e de ar em um CVM

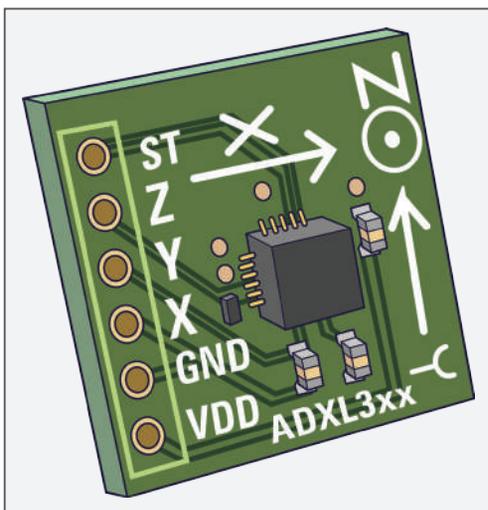


Figura 263 - Acelerômetro com tecnologia MEMS

Em aeronaves modernas as informações de fator (**G**) são transmitidas periodicamente para uma central de controle. Esta pode ser a própria fabricante da aeronave ou a empresa credenciada, que gerencia, entre outros controles, o tempo de vida limite da célula e dos componentes críticos. Nelas, são utilizados acelerômetros modernos (Figura 263), extremamente confiáveis com alcance de até 20 G, capazes de detectar acelerações longitudinais, laterais e normais da aeronave.

10.4 Voltamperímetro

O sistema elétrico é responsável por inúmeras operações em uma aeronave, muitas delas vitais para o êxito do voo. O seu grau de importância aumentou ainda mais na medida em que cresceu o número de componentes eletrônicos embarcados. Nesse cenário, tal sistema evoluiu e ficou muito mais confiável, em virtude, entre outros fatores, da redundância de fontes de energia elétrica e de sistemas que permitem alterar automaticamente o barramento de força em caso de falhas no sistema principal. Dessa forma, o monitoramento do sistema elétrico é muito importante, pois assegura o funcionamento adequado da maioria dos instrumentos e dos componentes elétricos e eletrônicos da aeronave.

Uma grande preocupação em relação ao funcionamento do sistema é a adequada geração e distribuição da energia elétrica pelo barramento de energia. Se a geração ou o tratamento da energia elétrica apresentar falha relevante, a fonte de força utilizada deve sair de operação. Por isso, o monitoramento da geração das fontes de energia elétrica é tão importante para o funcionamento do sistema. O voltamperímetro é um dos instrumentos responsáveis por monitorar o sistema elétrico. Ele é utilizado para indicar a tensão da bateria e dos geradores e, também, a corrente elétrica solicitada de cada gerador. Quando a tensão ou a amperagem variam de forma atípica, é sinal de que algum problema está ocorrendo com os equipamentos monitorados.

A operação dos instrumentos de medição de voltagem e de corrente elétrica se baseia na característica apresentada pelo movimento da corrente em um condutor, o qual produz calor e magnetismo. Como esses efeitos variam consistentemente com a variação da corrente elétrica que circula no condutor, eles são usados em instrumentos de medição.

Os que utilizam o efeito do magnetismo são os mais empregados, por serem mais precisos. Eles aplicam um dispositivo chamado de mecanismo d'Arsonval, que se baseia no efeito eletromagnético da corrente. A maioria dos mecanismos formados por bobina móvel e ímã permanente é intitulada instrumento de d'Arsonval. Basicamente, o mecanismo é formado por uma bobina móvel instalada entre duas peças polares de um ímã permanente em formato de ferradura, conforme ilustrado na Figura 264.

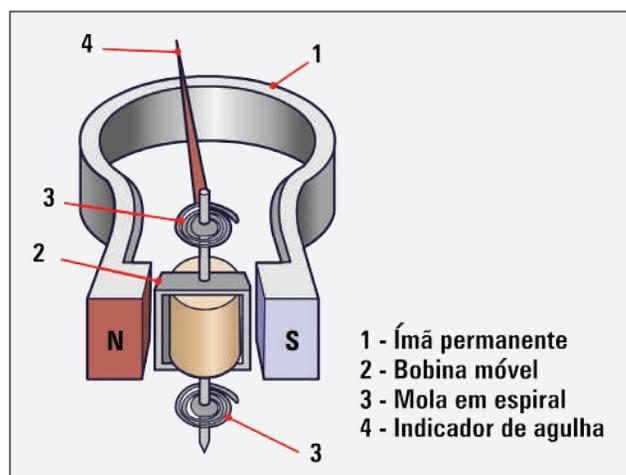


Figura 264 - Mecanismo de d'Arsonval

A bobina móvel é formada por espirais de cobre, nos quais circula a corrente a ser medida. Ela envolve uma base de alumínio, utilizada para amortecer as oscilações que executariam conforme a vibração do ponteiro do medidor. Dois terminais localizados na parte traseira da caixa do instrumento recebem as inscrições dos sinais positivo e negativo para a correta ligação com o circuito elétrico a ser medido.

A bobina dispõe de pivôs de aço que são apoiados em mancais de joia polidos, de maneira que a armadura possa girar com o menor atrito possível. Quando uma corrente passa pela bobina, o campo magnético do ímã produz um torque, que faz com que a armadura gire de forma diretamente proporcional à intensidade da corrente que circula pela bobina. Com essa configuração, tem-se um mecanismo para medir o fluxo de corrente, chamado de galvanômetro d'Arsonval (Figura 265). Para tanto, um ponteiro é instalado na armadura do eletroímã, a fim de acompanhar o movimento desta e indicar, em uma escala, o grau de rotação, que representa a grandeza da corrente.

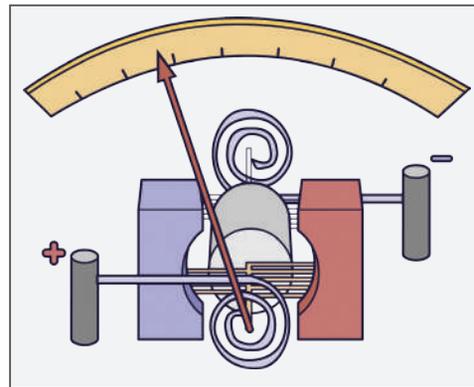


Figura 265 - Galvanômetro d'Arsonval



Mola cabelo: mola em forma de espiral.

Lei de Ohm: essa lei estabelece que, para um condutor mantido em temperatura constante, a razão existente entre a tensão verificada entre dois pontos e a corrente elétrica é constante; tal constante é denominada de resistência elétrica.

Duas molas cabelo amagnéticas, enroladas em sentidos diferentes, se opõem ao movimento da armadura. Elas fazem com que esta fique em uma posição predeterminada, na qual o ponteiro fica alinhado à marcação zero da escala, quando não há energia no circuito. As molas também permitem o fluxo de corrente para a bobina móvel.

O princípio de funcionamento é idêntico em todos os instrumentos que utilizam o mecanismo de d'Arsonval. Ele depende sempre da reação entre dois campos magnéticos, sendo um fixo, fornecido por um ímã permanente, e outro variável, que recebe a corrente do circuito a ser medido.

O galvanômetro é a base de amperímetros e de voltímetros analógicos.

10.4.1 Amperímetros

Conforme visto, o galvanômetro pode ser utilizado para medir a corrente de um circuito. Para tanto, é necessário colocá-lo em série com o circuito. Acontece que se a corrente do circuito for maior que a suportada pelo instrumento, a deflexão da bobina móvel vai exceder o seu limite, danificando o mecanismo. Para que tal problema não ocorra, foi utilizado um artifício com base na *Lei de Ohm*, em que uma resistência de valor baixo, chamada de *shunt* ou derivação, é instalada em paralelo com o galvanômetro. Dessa forma, como a resistência da

derivação é baixa, a maior parte da corrente circula por ela. Logo, quando a corrente total a ser medida entrar no instrumento, haverá uma divisão, apenas uma pequena parte da corrente circula pela bobina móvel. O restante flui pela resistência *shunt* ou derivação.

O valor da medição depende do valor da resistência empregada com *shunt* e da sensibilidade do instrumento. Por exemplo, se o valor máximo suportado pelo amperímetro for de 100 A e a sensibilidade do instrumento for de 0,02 A, afirma-se que 99,98 A circula pelo *shunt*, enquanto 0,02 A flui pela bobina. Essa será a proporcionalidade verificada em todas as medições, abaixo do limite máximo do instrumento. À medida que a corrente de entrada diminui, os valores de corrente no *shunt* e na bobina também diminuem na mesma proporção. Dessa forma, tem-se a medição confiável da corrente que flui no circuito. Essa configuração em que o mecanismo do galvanômetro fica em paralelo com um resistor é aplicada aos galvanômetros para convertê-los em amperímetros.

Na Figura 266, é apresentado um amperímetro analógico utilizado em aeronaves.

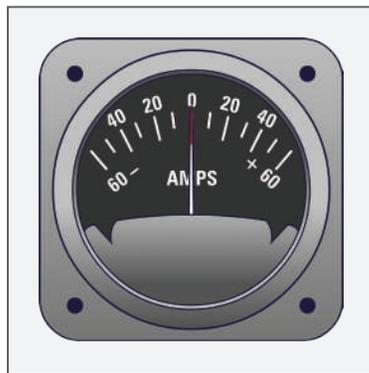


Figura 266 - Amperímetro analógico

10.4.2 Voltímetros

O voltímetro é um instrumento muito importante em uma aeronave, pois é imprescindível nas pesquisas sobre o funcionamento dos circuitos, por meio da verificação dos diversos valores de tensão de uma carga ou circuito. Tal instrumento é construído a partir de um mecanismo de d'Arsonval, se o valor da resistência interna dele for conhecido. O funcionamento desse instrumento se baseia na variação consistente que se verifica na tensão ao se variar a corrente que circula em uma resistência constante. Dessa forma, o voltímetro é um galvanômetro d'Arsonval em série com uma resistência de alto valor.

A resistência instalada em série com o galvanômetro é chamada de multiplicadora. Os instrumentos possuem várias dessas resistências, de acordo com os diferentes alcances desejados, por meio de uma chave seletora instalada.

Ao ligar o galvanômetro em paralelo a dois pontos de um circuito, ele mede o valor da corrente que circula pelo circuito, porém, com base na Lei de Ohm, é possível mensurar a tensão, haja vista que o valor da resistência multiplicadora é conhecido. Portanto, cada corrente que circula no instrumento é decorrente de determinada tensão, logo cada corrente produz um determinado movimento no ponteiro, que é calibrado para indicar a tensão que dá origem

àquela corrente. Dessa forma, a escala é graduada em volts, apesar de o movimento da bobina do galvanômetro ocorrer em função da corrente.

O voltímetro deve ser equipado com uma resistência muito alta, de modo a absorver pouca corrente e fazer o circuito, ao longo das medições, ser afetado menos possível. A precisão da leitura depende da sensibilidade do medidor. Se ele tiver uma baixa resistência, terá baixa sensibilidade e, ao ser ligado a um circuito de alta resistência, existe a possibilidade de a indicação ser falsa. Nesse caso, é necessário um instrumento de alta resistência (alta sensibilidade). É preciso multiplicar a sensibilidade pela tensão, para que seja encontrada a resistência de um voltímetro.

Nas aeronaves, os voltímetros realizam as indicações de tensão, sem provocar alterações no circuito. É uma fonte importante de informação sobre o funcionamento do sistema ou do equipamento elétrico ou eletrônico monitorado.

A Figura 267 ilustra um instrumento de indicações de tensão e de corrente elétrica da bateria, com apresentação digital.

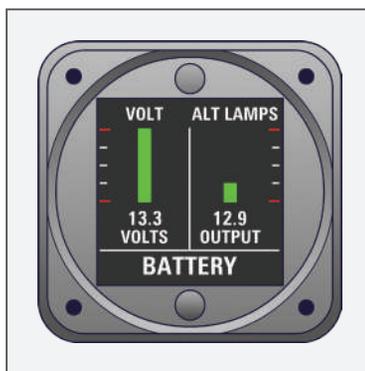


Figura 267 - Indicador de tensão e amperagem da bateria da aeronave

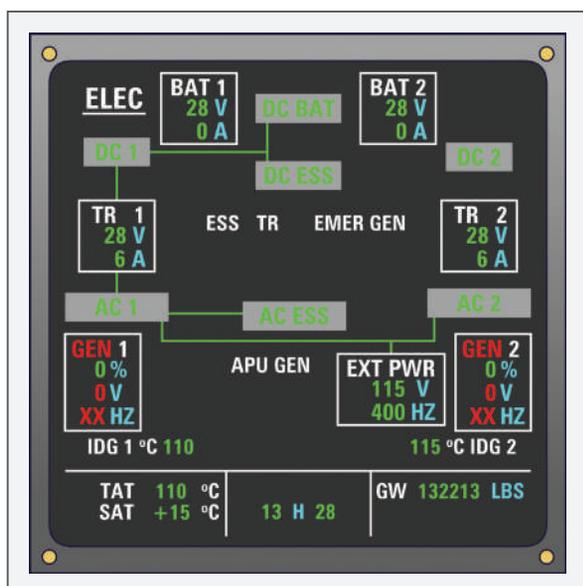


Figura 268 - Tela do ECAM relativa ao sistema elétrico

Nas aeronaves modernas, as informações de tensão e de amperagem de vários equipamentos e circuitos são informadas pelo ECAM na tela dedicada ao sistema elétrico da aeronave. Ele monitora todo o sistema elétrico e informa à tripulação qualquer ocorrência anormal no sistema. Além disso, atua automaticamente para a solução do problema ou indicação ao piloto qual o procedimento a ser efetivado. A Figura 268 exemplifica uma tela do ECAM relativa ao sistema elétrico da aeronave. Nela, são percebidos os valores de tensão e de amperagem do circuito. Cabe destacar que o referido sistema está sendo alimentado por uma fonte externa, conforme se verifica na indicação (EXT PWR).

Resumindo

Neste capítulo, abordaram-se diversos instrumentos empregados em aeronaves, com princípios de funcionamento distintos. Foi visto que o relógio é usado desde os primeiros voos das aeronaves mais pesadas que o ar e que ele é utilizado ao longo do voo para marcar o tempo durante certas manobras e com fins de navegação. Explicitou-se que os indicadores de torque aponta a potência aplicada no eixo dos motores alternativos ou no eixo de potência dos motores a turbina. Ainda assim, foi destacado que existem várias maneiras de se verificar o esforço do torque no eixo, entre elas, a que aplica a diferença de fases entre duas rodas dentadas, quando submetida a cargas de esforços, e aquela em que os componentes são instalados em uma área chamada de câmara de torquímetro, na caixa de redução.

Em sequência, foi explicitado que, na elaboração de um projeto de concepção e de manutenção de aeronaves, é dado especial destaque à questão da fadiga, um dos fatores limitantes do tempo de vida da aeronave é o efeito das cargas de aceleração cíclicas acumuladas durante a sua operação, o qual leva à fadiga da estrutura. Enfatizou-se que o acelerômetro registrador é instalado na posição próxima ao centro de gravidade de algumas aeronaves para registrar as cargas de aceleração a que elas são submetidas. Foi visto que, em aeronaves modernas, a questão da fadiga é monitorada por um sistema muito mais complexo, chamado de sistema de monitoramento da saúde estrutural (SHM), o qual utiliza componentes sensores estruturais para o monitoramento contínuo da estrutura. Da mesma forma que foi enfatizado o emprego de tecnologias de fibra ótica, de elementos piezoelétricos, de sistemas microeletromecânicos (MEMS) e de monitoramento de vácuo comparativo (CVM) na construção desses sensores.

Posto isso, viu-se que o voltamperímetro é um dos instrumentos responsáveis por monitorar o sistema elétrico. Ele é empregado com o objetivo de apontar a tensão da bateria e dos geradores e a corrente solicitada de cada gerador. Ademais, foi destacado que o princípio de funcionamento dos instrumentos, que utilizam o mecanismo de d'Arsonval, depende da reação entre dois campos magnéticos, sendo um fixo, fornecido por um ímã permanente, e outro variável, em concordância com a corrente que flui pela bobina móvel. Também foi enfatizado que o galvanômetro é a base de amperímetros e de volímetros analógicos. Quando um resistor de valor adequado é ligado em série com o galvanômetro, ele pode ser usado como um volímetro, e quando utilizado com um resistor ligado em paralelo, como um amperímetro.

Capítulo 11

Características de construção e cuidados com os instrumentos

Há muito tempo é impensável a realização de um voo sem o apoio dos instrumentos na cabine. Dessa forma, é fundamental que eles sejam confiáveis em todas as fases do voo, livres de interferências externas e internas da aeronave.

Por isso, a fabricação de um instrumento de aeronaves é cercada de cautela para o desempenho confiável de uma função sob as mais variadas condições de voo. Ademais, os cuidados com manipulação, manutenção e armazenagem dos equipamentos ligados ao sistema de instrumentos das aeronaves são extremamente importantes para mantê-los em condições seguras de operação.

11.1 Materiais de fabricação

A escolha do material a ser usado na caixa de um instrumento precisa considerar as características do mecanismo deste e, em alguns casos, daqueles que estão próximos. Sobretudo, é importante que ele seja leve e resistente, entre outras qualidades.

A caixa não fornece somente proteção ao mecanismo dos instrumentos, ela também possibilita:

- compactação;
- facilidade de transporte;
- armazenamento;
- instalação;
- remoção do painel ou da caverna para instalação;
- redução da exposição à sujeira e umidade.

Muitos materiais são empregados na fabricação das caixas. Por exemplo: liga de alumínio e de magnésio, aço, ferro e plástico. Os instrumentos elétricos são instalados em caixas de aço ou de liga de ferro para conter o fluxo eletromagnético causado pela circulação interna de corrente. As Figuras 269.A e 269.B apresentam dois instrumentos, um com a caixa instalada e outro sem a caixa instalada. É possível perceber que o mecanismo do instrumento fica vulnerável sem a caixa e, conseqüentemente, sujeito à contaminação por objetos estranhos. Posto isso, o seu funcionamento é alterado, além de receber outros tipos de interferências.

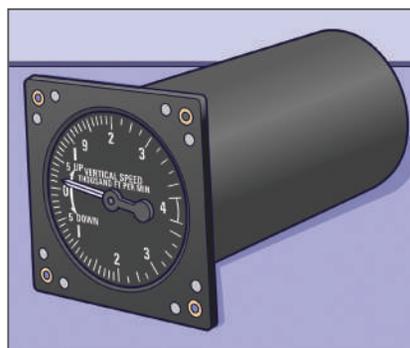


Figura 269.A - Instrumento analógico com o invólucro

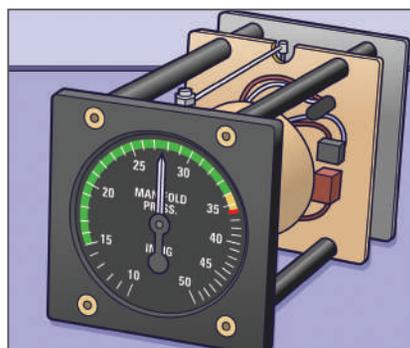


Figura 269.B - Instrumento analógico sem o invólucro

Uma preocupação dos fabricantes na construção de instrumentos e de componentes aviônicos é o uso de materiais menos suscetíveis à formação de corrosão, como no termômetro EGT com caixa de proteção (Figura 270), principalmente as decorrentes da utilização de corrente elétrica, assim como de inibidores de corrosão e emprego de metais dissimilares com menor distância de nobreza.

Entretanto, apesar desses cuidados na fabricação, todos os equipamentos elétricos e eletrônicos precisam ser abertos e inspecionados de forma programada com relação a evidências de corrosão, conforme determinado pelo fabricante do equipamento. Quando detectados sinais de corrosão, são necessárias medidas corretivas imediatas.

Uma preocupação dos fabricantes na construção de instrumentos e de componentes aviônicos

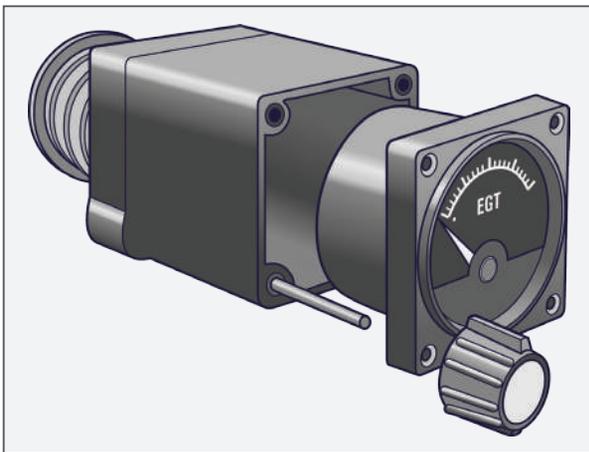


Figura 270 - Termômetro EGT em caixa de proteção

é o uso de materiais menos suscetíveis à formação de corrosão, como no termômetro EGT com caixa de proteção (Figura 270), principalmente as decorrentes da utilização de corrente elétrica, assim como de inibidores de corrosão e emprego de metais dissimilares com menor distância de nobreza.

Entretanto, apesar desses cuidados na fabricação, todos os equipamentos elétricos e eletrônicos precisam ser abertos e inspecionados de forma programada com relação a evidências de corrosão, conforme determinado pelo fabricante do equipamento. Quando detectados sinais de corrosão, são necessárias medidas corretivas imediatas.

Outro problema a ser evitado é o excesso de umidade em circuitos elétricos e em eletrônicos. Alguns circuitos são sensíveis à umidade, os quais requerem alojamentos adequados para evitar o contato com a umidade. Esse problema se torna mais evidente nos equipamentos que requerem refrigeração realizada por meio da circulação de ar. Dessa forma, há a necessidade de se utilizarem mecanismos a fim de evitar o excesso de umidade, incluindo o formato dos invólucros dos equipamentos. Cabe destacar que o excesso de umidade leva à condensação, representando um risco ao funcionamento do sistema afetado.

Outras fontes de preocupação para os fabricantes são a variação de temperatura e de pressão, a vibração, entre outras. Como forma de prevenir eventuais falhas em voo, os equipamentos são submetidos a rigorosos testes em laboratórios para assegurar a aeronavegabilidade do item. A Figura 271 apresenta um equipamento que simula vibrações intensas para alcançar a resistência dos instrumentos nesse quesito.

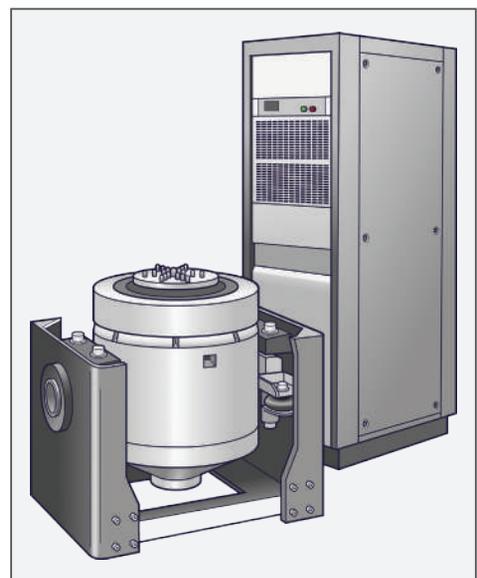


Figura 271 - Equipamento para teste de vibração de componentes aviônicos

11.2 Apresentação e marcações de limites de operação nos instrumentos

A finalidade principal de um instrumento é apresentar algum tipo de informação relevante à tripulação. Portanto, é essencial haver clareza e facilidade de entendimento. Assim, para facilitar a percepção dessas informações, muitos instrumentos apresentam marcações coloridas no mostrador.

As cores são muito eficientes para destacar as informações relevantes, como, por exemplo, a faixa ou o limite de operação de determinado equipamento que requer atenção. A utilização de um padrão torna intuitiva a leitura do instrumento, diminuindo o tempo de resposta da tripulação a partir da informação apresentada pelo mostrador.

As faixas de operação são evidenciadas por cores em arcos pintados nos instrumentos:

- a de operação normal é destacada pela cor verde;
- a de operação que requer atenção ou cuidado é destacada pela cor amarela;
- a que representa o limite de operação do equipamento é evidenciada pela cor vermelha. Destaca-se que essa cor também sinaliza as faixas-limite de operação máxima e mínima de determinado equipamento, indicando a periculosidade da operação, de modo a ser evitada.

As marcações são apresentadas em formato de um arco ou por meio de uma linha radial. Além dessas cores, há o azul e o branco, usados em indicadores de velocidade para definir condições específicas.

Por exemplo, o arco branco no velocímetro sinaliza o intervalo de utilização dos flapes, indo do VS0 (velocidade de estol com os flapes distendidos) ao VSE (velocidade máxima com os flapes distendidos). É possível constatar, ainda, no velocímetro, uma faixa radial azul indicando a velocidade para a melhor taxa de subida com o motor crítico inoperante. A Figura 272 ilustra tais marcações.



Figura 272 - Marcações no velocímetro

Como dedutível, as marcações nos instrumentos são definidas pelo fabricante do equipamento, de acordo com as especificações da aeronave e das exigências para a certificação.

Nas cabines equipadas com monitores digitais, as indicações de operação dos equipamentos são apresentadas conforme o código de cores dos instrumentos analógicos. Na Figura 273, são visíveis a marcação dos limites de operação com a cor vermelha e as faixas de atenção em amarelo. As mensagens de alerta também empregam o código de cores, como se verifica na janela de mensagens do ECAM.



Figura 273 - Indicação de limites de operação com auxílio do código de cores

11.3 Remoção e instalação dos instrumentos

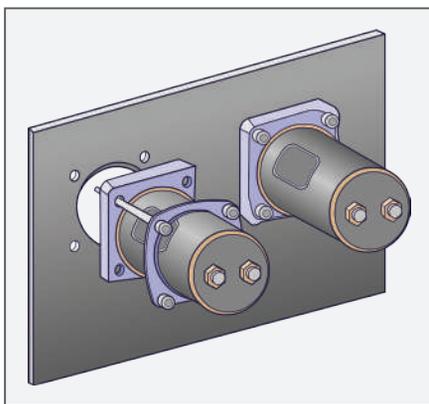


Figura 274 - Instalação dos instrumentos pela parte traseira do painel

Os instrumentos não apresentam a mesma forma de instalação no painel. Isso acontece porque eles dispõem de caixas com diferentes *layouts*. Em um tipo, a moldura apresenta um flange que permite embutir o instrumento na abertura do painel, acessando-o pela parte de trás (Figura 274). Porcas autofreio são instaladas na parte traseira dos flanges, na região dos cantos, com a finalidade de receberem os parafusos de montagem, que são inseridos pela frente do painel. É possível que o instrumento com flange seja montado na frente do painel. Nesse caso, as placas com porca fixa são instaladas no próprio painel e os parafusos não ferrosos usados para montar os instrumentos.

Em outros instrumentos, a caixa não apresenta flange. Portanto, é utilizada uma braçadeira especial, modelada e dimensionada para alojá-la permanentemente na abertura na parte traseira do painel.

Para encaixar o instrumento na abertura do painel, basta deslizá-lo pela abertura frontal e pelo interior da braçadeira sem aperto. Quando o instrumento está faceado com o painel, o parafuso da braçadeira é apertado, como se observa na Figura 275.

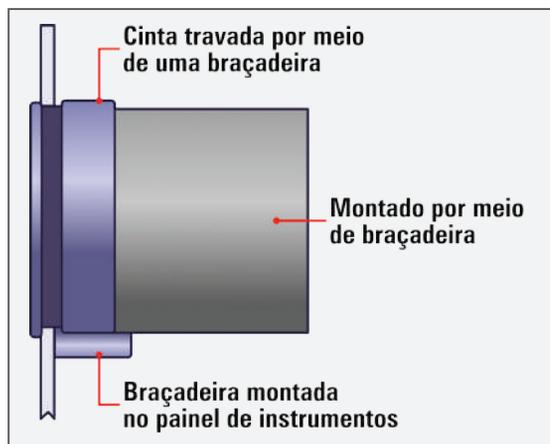


Figura 275 - Caixa do instrumento fixada por uma braçadeira

Independentemente de como seja montado o instrumento, ele não deve ficar muito próximo a outro. Isso evita que se toquem durante o impacto da aterrissagem (Figura 276).

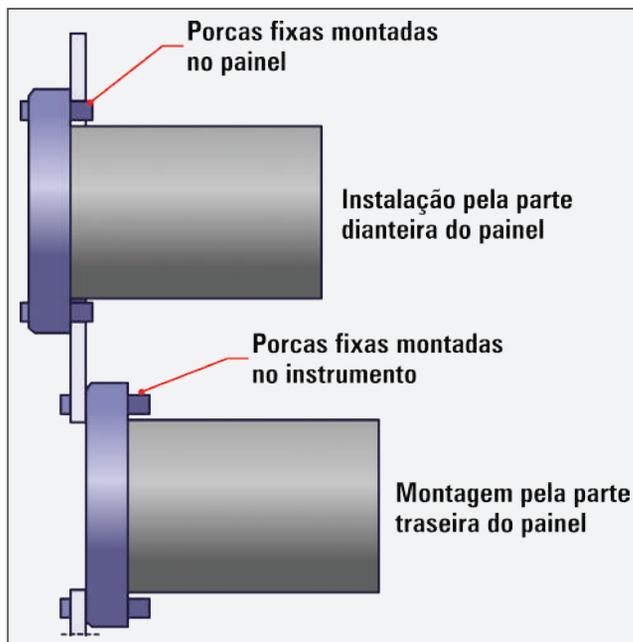


Figura 276 - Posições de instalação dos instrumentos no painel

A remoção dos instrumentos também requer cuidados. A tarefa precisa ser realizada de maneira cuidadosa, evitando choques e vibração excessiva.

Tão logo sejam removidos, eles devem ter as conexões de ar fechadas por plugues para evitar a contaminação com poeira, umidade ou qualquer tipo de sujeira. Da mesma forma, necessitam ser acondicionados em embalagens adequadas para transporte, se o deslocamento até a oficina revisora for necessário.

11.4 Cuidados no manuseio e na armazenagem

É fundamental que o pessoal de manutenção saiba como manusear e manter os instrumentos em condições ideais. Embora muitos reparos em instrumentos devam ser realizados em uma oficina credenciada, sob condições controladas, há muitas oportunidades para danificá-los durante a instalação e remoção.

Todos os instrumentos, sejam analógicos, sejam aviônicos, têm de ser manuseados com muito cuidado, de modo que nunca sofram quedas. Isso porque, além da possibilidade de danificar os componentes internos, uma rachadura na caixa de instrumento hermeticamente fechada provavelmente a tornará não aeronavegável. É preciso considerar que uma queda de apenas 20 centímetros de um instrumento típico é capaz de sujeitar os componentes internos a até 2 G de força.

Uma grande percentagem de problemas ocorre no transporte e no manuseio dos equipamentos e, ainda, em virtude da presença de contaminantes no mecanismo interno do equipamento.

Os giroscópios de vácuo requerem cuidados especiais, precisando ser mantidos com os filtros do sistema limpos. Eles também não são lubrificados em excesso, pois isso tende a reduzir o atrito durante o aperto. Como consequência, ocasiona um excesso de torção, provocando danos ao encaixe e às portas de acesso à linha de ar.

Outros cuidados com os giroscópios consistem no bloqueio das portas pneumáticas, logo que for retirado do painel. A presença de objetos estranhos nessas portas inviabiliza o funcionamento do instrumento. Logo, ele tem de ser mantido com os plugues instalados durante todo o tempo em que não estiver conectado. Antes da operação inicial de um giroscópio, é recomendado um giro lento (*run-down*), anteriormente ao uso da carga plena do equipamento, com o fim de evitar danos nos rolamentos e/ou nos balancins.

Caso os giroscópios estejam armazenados ou não sejam usados por períodos de dois a três meses, eles precisam ser ensaiados (*powered-up*) e operados, por cerca de meia hora, para verificar se a operação está dentro da normalidade e permitir que os rolamentos sejam movimentados e devidamente lubrificados.

Outra preocupação durante a manipulação dos instrumentos consiste em evitar possíveis focos de corrosão nos instrumentos com caixa metálica e nos alojamentos de equipamentos e instrumentos. É necessário ter tanto o instrumento quanto a área ao redor dele livres de sujeira e líquidos. Os sinais de corrosão precisam ser tratados durante os procedimentos de manutenção. De maneira geral, nunca se deve soprar as portas das tomadas estáticas e de pressão dos instrumentos. A umidade expelida contribui para a formação de corrosão nos mecanismos internos do instrumento.

Todos os cuidados descritos na caixa do instrumento têm de ser cumpridos, assim como as instruções do fabricante para o manuseio, o transporte, a armazenagem, a instalação e a remoção.

A armazenagem precisa ser cuidadosa, em ambientes limpos e secos. Dependendo do tipo de instrumento, o ambiente necessita ser climatizado e com controle de umidade.

11.5 Manutenção dos instrumentos e sistema de instrumentos

A manutenção dos componentes internos dos instrumentos é realizada por técnicos qualificados, em estações de trabalho certificadas de oficina especializada, a qual dispõe de equipamentos especiais e de condições ambientais controladas. Sendo assim, tal tarefa não cabe a um técnico, que atua na manutenção da aeronave. Entretanto, estes são capacitados a realizar uma série de tarefas de manutenção relacionada aos sistemas de instrumentos e aviônicos, tais como: instalação, remoção, inspeção, pesquisa de panes, regulagens, verificação de funcionamento, entre outras. Também é de responsabilidade do técnico credenciado saber qual manutenção é necessária para o equipamento e avaliar os procedimentos aprovados.

Nos parágrafos seguintes, serão apresentados alguns serviços de manutenção em sistemas de instrumentos e aviônicos, com o fim de contextualizar os assuntos abordados neste livro aos procedimentos de manutenção realizados pelo técnico em manutenção aeronáutica, na área de aviônicos. É certo que os exemplos apresentados nem de longe esgotam os serviços que estão sob a responsabilidade desse profissional.

11.5.1 Teste do altímetro

Segundo o Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica (RBHA) 91, quando uma aeronave for operada por instrumentos (IFR), o altímetro precisa ter sido submetido a um teste de desempenho, dentro do prazo de 24 meses anteriores ao voo. Exige-se, ainda, que sejam realizados testes nos sistemas de *pitot*-estático e no sistema automático de informação de altitude por pressão. Tendo em vista que o técnico em manutenção aeronáutica não é qualificado para realizar a inspeção do altímetro, ela necessita ser feita pelo fabricante ou por uma oficina de reparo certificada.

11.5.2 Manutenção e teste do sistema *pitot*

Um problema que afeta o funcionamento dos instrumentos do sistema de *pitot*-estático é a presença de água retida nas vias do sistema, a qual leva a indicações errôneas ou intermitentes nos instrumentos de voo do *pitot*-estático. O problema se agrava se a água congelar durante o voo.

Para evitar essa situação, durante a manutenção, a água tem de ser retirada por meio de drenos instalados nos pontos baixos do sistema. Depois de realizado o procedimento, o técnico precisa assegurar que os drenos estejam fechados e seguros, de acordo com os procedimentos de manutenção aprovados. Quando o sistema não é equipado com dreno, é injetado ar comprimido seco ou nitrogênio em suas linhas de ar. Para realizar tal tarefa, todos os instrumentos do *pitot*-estático precisam estar desconectados do sistema e a aplicação do ar comprimido (ou do nitrogênio) deve ser executada exclusivamente no sentido da extremidade do instrumento em direção ao *pitot* e às portas estáticas. Após a tarefa, o sistema tem de ser checado quanto a vazamento, pois os instrumentos foram desconectados. Nos sistemas equipados com dreno, não é necessário esse tipo de cheque.

Para que o sistema de *pitot*-estático da aeronave funcione corretamente, ele necessita estar livre de vazamentos. Isso requer que ele seja testado contra vazamentos após a instalação de qualquer componente ou quando o sistema tiver uma suspeita de funcionamento defeituoso. Além disso, segundo as normas previstas pelo RBHA 91, é preciso que toda aeronave certificada para voo por instrumento seja equipada com o sistema de *pitot*-estático testado a cada 24 meses. Técnicos de manutenção aeronáutica credenciados são aptos a realizar esse teste.

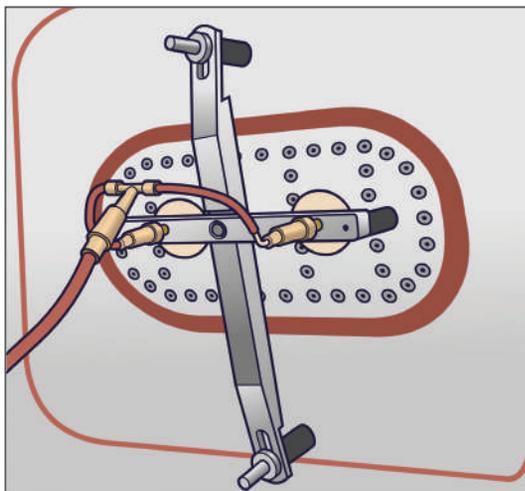


Figura 277 - Adaptador do teste de *pitot*-estático instalado

O método do teste de vazamento depende do tipo de aeronave, do sistema de *pitot*-estático e do equipamento de teste disponível. Basicamente, ele consiste em aplicar pressão negativa (vácuo) no sistema e observar se a pressão cai durante determinado tempo. Dessa forma, o dispositivo de teste é conectado ao sistema estático pela extremidade da ventilação estática (Figura 277) e a pressão é reduzida no sistema, até que o altímetro registre 1.000 pés. Neste momento, o sistema é lacrado e a indicação de altitude é observada por um minuto. A tolerância de queda de altitude nesse período é de até 100 pés.

Caso seja detectado algum vazamento, é necessária uma verificação de toda a linha de ar do sistema até que seja eliminado. Em geral, os pontos de encaixe são responsáveis pela maioria dos vazamentos. A parte específica do conjunto de *pitot* é checada da mesma forma. Os procedimentos apresentados são apenas ilustrativos, de maneira que tal tarefa tem de sempre seguir as instruções do fabricante do equipamento.

Além do teste mencionado, precisam ser aplicadas pressão e sucção e liberadas lentamente para evitar danos aos instrumentos da aeronave. Os equipamentos de testes de vazamento do sistema de *pitot*-estático são incorporados com seus próprios altímetros (Figura 278), o que permite, além do cheque de vazamento, observar se o altímetro da aeronave está com a indicação igual à do altímetro calibrado do equipamento. Esse procedimento é denominado cheque funcional cruzado dos altímetros. Destaca-se que essa comparação de altímetro não é aceita como teste regular desse equipamento, porque o RBHA 91 exige que o teste seja realizado em oficina credenciada. É, portanto, apenas um teste funcional do altímetro.



Figura 278 - Equipamento analógico para teste de vazamento do sistema *pitot*-estático

Ao término dos testes de vazamento, é necessário averiguar se o sistema retornou às configurações normais de voo. Caso tenha sido necessário bloquear partes dele, são examinados se todos os bujões, adaptadores ou pedaços de fita adesiva foram corretamente removidos.

11.5.3 Manutenção do tacômetro

Em linhas gerais, o indicador e o gerador do tacômetro necessitam ser inspecionados para conferir se as conexões mecânicas e elétricas estão bem ajustadas, se a montagem está segura e se as condições gerais estão normais.

Ademais, é importante examinar se os vidros e os ponteiros não estão soltos e se as marcações das escalas não estão descascadas. Em seguida, é registrado o valor apresentado no indicador e, em sequência, são dadas leves batidas no instrumento, novamente, se analisa se o valor da indicação varia. A diferença entre os valores não pode ser superior a, aproximadamente, 1,5 RPM. Esse valor é apenas ilustrativo, pois é possível ser diferente, dependendo do fabricante do instrumento.

Quando um motor equipado com tacômetro elétrico estiver funcionando em marcha lenta, os ponteiros de indicação do instrumento poderão flutuar e apresentar uma leitura baixa. Isso é uma indicação de que o motor síncrono não está sincronizado com a saída do gerador. Com o aumento de velocidade do motor, ele tem de sincronizar e registrar a rotação por minuto correta. A RPM na qual a sincronização ocorre varia conforme o projeto do sistema do tacômetro. Se o ponteiro do instrumento oscilar em velocidades acima do valor de sincronização, é necessário observar se a oscilação total não ultrapassa a tolerância permissível.

Nos tacômetros mecânicos, é averiguado se o eixo flexível que transmite o movimento de rotação ao instrumento está chicoteando. Isso leva à oscilação do ponteiro do indicador. Esse eixo precisa ser fixado em pequenos intervalos para impedir esse movimento. Além disso, são evitadas curvas acentuadas durante o trajeto do eixo flexível até o instrumento. Ele necessita dispor de espaço suficiente atrás do painel para permitir a instalação e o funcionamento adequados. A Figura 279 ilustra o acionamento do mecanismo interno do indicador pelo eixo flexível. A rotação incorreta desse eixo compromete a exatidão da leitura apresentada no indicador.

É importante que os procedimentos detalhados de manutenção estejam sempre de acordo com as instruções do fabricante.

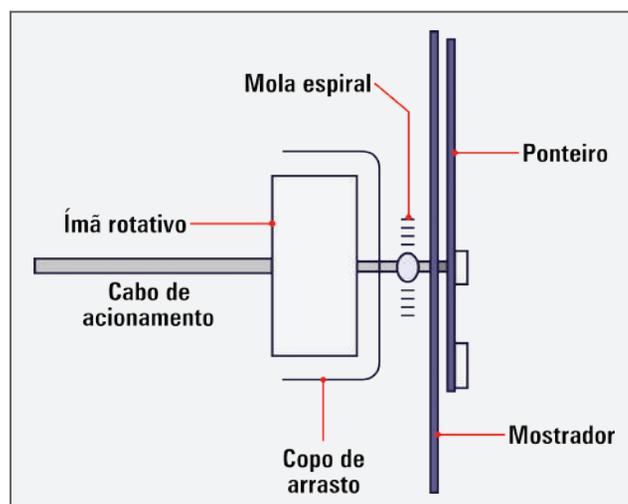


Figura 279 - Tacômetro com eixo flexível

11.5.4 Manutenção e compensação da bússola magnética

A bússola magnética requer pouca manutenção, mas é um instrumento delicado, que precisa ser manuseado com cuidado durante a inspeção e a manutenção. Ao se inspecionar uma bússola, é preciso atentar quanto à presença de fontes magnéticas que possam interferir na direção apontada por ela.

Os seguintes procedimentos são feitos em uma inspeção de rotina da bússola:

- o indicador da bússola é checado em relação à leitura correta dos pontos cardeais. Recompensando-se, caso seja necessário;
- as partes móveis da bússola têm de apresentar movimentos livres;
- a caixa da bússola tem de estar suspensa de forma correta em um dispositivo antivibração e não apresentar contato com qualquer parte de metal do recipiente;
- a caixa da bússola precisa estar cheia de líquido, livre de bolhas ou de qualquer descoloração;
- a escala necessita ser legível e bem iluminada.

O procedimento de compensação da bússola é realizado com o fim de reduzir o desvio magnético causado por interferência eletromagnética de materiais ferrosos e componentes elétricos da cabine. Essa compensação é ocasionada por meio de ajustes nos ímãs instalados no mecanismo da bússola. O acerto informará a defasagem dos pontos cardeais. Destarte, é gerada uma tabela com as correções desses pontos. A Figura 280 apresenta a bússola instalada na parte superior da cabine acompanhada do cartão de correção, no qual são registradas as correções dos pontos cardeais. Na Figura 281, é mostrado um cartão de correção de bússola com as indicações de correções para cada ponto cardinal.



Figura 280 - Bússola com o cartão de correção

For	N	30	60	E	120	150
Steer	0	27	56	85	116	148
For	S	210	240	W	300	330
Steer	181	214	244	274	303	332

Figura 281 - Cartão de correção de desvio da bússola com anotações

A compensação da bússola tem de ser realizada de acordo com as instruções do fabricante da aeronave. Ele define o intervalo entre os procedimentos, bem como o método de compensação a ser empregado. O intervalo é demarcado em horas de voo ou intervalos de calendário ou, ainda, quando um novo componente elétrico é adicionado à cabine.

Entre os métodos de calibração da bússola magnética de leitura direta, quatro se destacam:

- método da plataforma de compensação;

- método da bússola com desvios nulos;
- método magnético usando teodolito;
- método comparativo no solo e em voo.

Não há como afirmar qual é o melhor método, uma vez que possuem características próprias, apresentando vantagens e desvantagens. Apenas a título de exemplo, serão explicitados os procedimentos empregados no método comparativo.

Inicialmente, é preciso ter uma rosa dos ventos pintada no asfalto para ser usada como referência. Os aeródromos a disponibilizam em uma área reservada, de baixo tráfego, onde o pessoal da manutenção pode trabalhar com tranquilidade (Figura 282). Caso não haja a rosa dos ventos pintada, é possível desenhá-la usando um giz e uma bússola calibrada. A área onde a rosa dos ventos está localizada tem de ficar longe o suficiente de qualquer distúrbio eletromagnético, incluindo os que ocorrem no subsolo, e permanecer livre de quaisquer veículos ferrosos ou equipamentos grandes durante o procedimento.

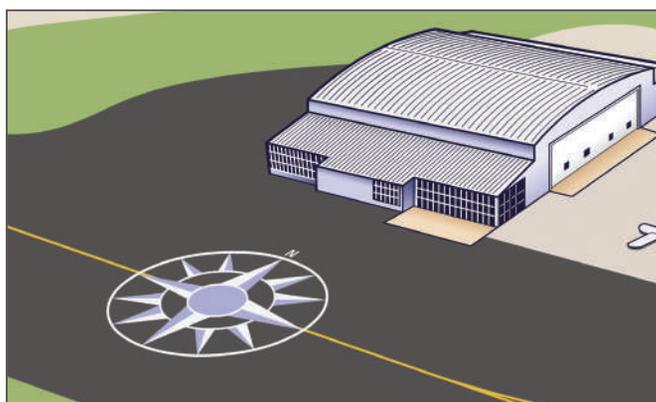


Figura 282 - Rosa dos ventos pintada no pátio de manobras

A aeronave necessita estar em atitude de voo nivelada para que o procedimento seja realizado (Figura 283). A bequilha precisa ficar com a parte posterior da fuselagem apoiada, preferencialmente em madeira, alumínio ou algum outro material não ferroso. O interior da aeronave e o compartimento de bagagem têm de estar livres de itens que possam interferir na bússola. Todo o equipamento normal deve estar a bordo e ligado para simular as condições de voo, os motores, por seu turno, precisam estar operando.



Figura 283 - Avião sobre a rosa dos ventos para a compensação de bússola

A compensação é iniciada nestes passos:

- a) no começo, é verificado o desvio presente ao longo da radial norte-sul e da leste-oeste. Em seguida, são ajustados os ímãs de compensação para eliminar o máximo possível de desvio.
É iniciado o processo centrando e zerando os ímãs de compensação da bússola, por meio de uma chave de fenda não ferrosa;
- b) alinha-se ao eixo longitudinal da aeronave com a radial E-W voltado para o leste. É ajustado o parafuso de compensação E-W para que a bússola indique 90°;
- c) a aeronave agora é alinhada à radial N-S, voltada ao sul. Se a bússola indicar 180°, não há desvio, enquanto a aeronave estiver indo para o norte ou para o sul. Porém, isso é improvável, qualquer que seja a indicação para o sul, o parafuso de compensação N-S é ajustado para eliminar metade do desvio de 180°;
- d) continua-se virando a aeronave para o oeste, na radial E-W, e usa-se o parafuso de compensação E-W para eliminar metade do desvio de 270°;
- e) quando a compensação estiver pronta, a aeronave é posicionada novamente alinhada à radial N-S, voltada ao norte, e é registrada a indicação;
- f) é permitido um desvio de até 10°. A aeronave é alinhada às radiais, a cada 30°, ao redor da rosa dos ventos e cada indicação é anotada no cartão de compensação da bússola. São colocadas a data e a assinatura no cartão e ele é posto à vista do piloto, próximo da bússola na cabine.

11.5.5 Manutenção do sistema de piloto automático

Existem vários tipos de pilotos automáticos (PA), com complexidades e recursos variados. Da mesma forma, a inspeção e a manutenção desses sistemas apresentam diferenças. Assim, neste tópico, serão apresentados alguns procedimentos e cuidados relacionados à manutenção de um piloto automático analógico, de maneira a abordar as informações que contribuam para o entendimento desse procedimento nos demais tipos de pilotos automáticos. Portanto, o conteúdo deste tópico não tem por objetivo esgotar o assunto, apenas contextualizá-lo a um determinado sistema, tomado como exemplo.

Em linhas gerais, a manutenção de um sistema de PA consiste na inspeção visual, substituição de componentes, limpeza, lubrificação e checagem operacional, de acordo com o manual de manutenção do fabricante.

De início, é examinado se os servos do PA estão produzindo qualquer esforço nos controles de voo. Para tanto, com o PA desconectado, os controles precisam funcionar suavemente. A resistência oferecida pelos servos do PA não deve afetar o controle da aeronave. No caso dos tipos que utilizam cabos de aço para o acionamento dos servos, é necessário averiguar periodicamente a tensão desses cabos, bem como a existência de sinais de desgaste. Os mecanismos de interconexão entre o sistema de piloto automático e o sistema de controle de voo têm de estar alinhados e operando suavemente.

Toda vez que houver substituição de componentes no sistema de PA será preciso um teste operacional com vistas a examinar se cada circuito está funcionando corretamente. O mesmo tem de ser feito em casos de suspeita de um mau funcionamento do sistema.

Antes de acionar o PA, é necessário que a coluna de controle (ou manche) esteja na posição normal de voo. É acionado o sistema por meio do interruptor do controlador do piloto automático, que fica no painel de instrumentos. Para desconectá-lo, é utilizado um interruptor de desconexão rápida, localizado na coluna de comando da aeronave (Figura 284).

É importante ressaltar que se tem de aguardar algum tempo para acionar o PA, após ligar o interruptor principal de energia elétrica da aeronave. Esse lapso de tempo visa a permitir que os giroscópios atinjam a velocidade de operação de seus rotores e o amplificador aqueça antes de iniciar a atividade. Alguns sistemas são projetados com salvaguardas para evitar o acionamento precoce do piloto automático.



Figura 284 - Interruptor de desacoplamento do piloto automático

Após o acionamento do sistema, são iniciados os cheques operacionais específicos da aeronave. As verificações são as seguintes:

- o botão de curva do controlador (Figura 285) é girado para a esquerda, o pedal do leme esquerdo precisa se mover para frente, enquanto o manche se movimenta para a esquerda e ligeiramente para trás;



Figura 285 - Controlador analógico simples do piloto automático

- o botão de curva para a direita é girado, o pedal do leme direito tem de se mover para frente, enquanto o manche se movimenta para a direita e ligeiramente para trás. Retorna-se o botão para a posição central, os controles de voo precisam voltar à posição de voo nivelado;
- o botão de compensador do profundor (*pitch trim*) para frente é girado, a coluna de controle tem de se mover para frente. Esse botão está localizado no controlador ou no manche, próximo ao botão de desengate rápido do PA;
- o botão de compensador do profundor é girado para trás, a coluna de controle precisa se mover para trás.

Caso a aeronave disponha de um sistema compensador do profundor, ele deve funcionar da seguinte maneira: movendo-se o controle para a posição compensador em baixo (*down-trim*), a coluna de controle se movimenta para frente e, quando estiver na posição em cima (*up-trim*), ela se move para trás. Muitos sistemas de compensação de profundor dispõem de um modo de operação automático e de um manual. A ação acima ocorre apenas no modo automático.

A Figura 286 mostra as posições dos compensadores do profundor.

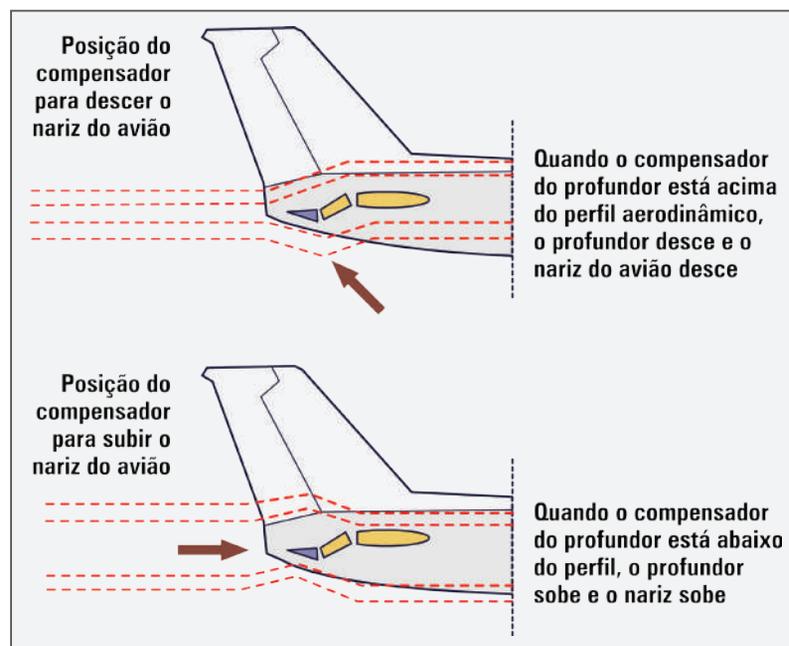


Figura 286 - Posições dos compensadores do profundor

O próximo teste consiste em analisar se é possível substituir ou dominar manualmente o sistema do piloto automático em todas as posições de controle. Todos os controles são centrados quando as checagens operacionais tiverem sido concluídas. Assim, é liberado o sistema do piloto automático e conferida a liberdade das superfícies de controle, movendo as colunas de controle e pedais do leme. Em seguida, o sistema é novamente acionado e é verificado se o circuito de desconexão de emergência está operando normalmente. O piloto automático precisa desconectar toda vez que o botão de liberação no manche de controle for acionado.

Quando for realizada a manutenção e os cheques operacionais no sistema específico do piloto automático, os procedimentos recomendados pelo fabricante da aeronave e do equipamento são acompanhados.

Com efeito, existem diversos tipos de pilotos automáticos, com diferentes complexidades e recursos. Dessa forma, há variadas apresentações de controladores desse sistema nas cabines das aeronaves, podendo ter um controlador de PA separado ou integrado a outros indicadores em um monitor no painel, conforme se verifica na Figura 287.

O princípio básico é o mesmo, ele mantém a rota selecionada, corrigindo a atitude da aeronave, quando necessário. É certo que os sistemas de PA modernos realizam muito mais ações do que isso, inclusive pousos automáticos, a partir de uma configuração pré-selecionada. A Figura 288 exemplifica um controlador de piloto automático de uma aeronave moderna e a indicação na tela de PA acionado. As referências ao sistema ocorrem com a abreviação AP (*autopilot*).

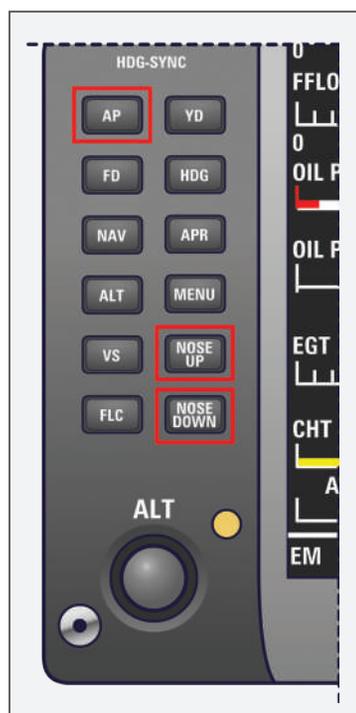


Figura 287 - Comandos de PA em sistema integrado de aviônicos

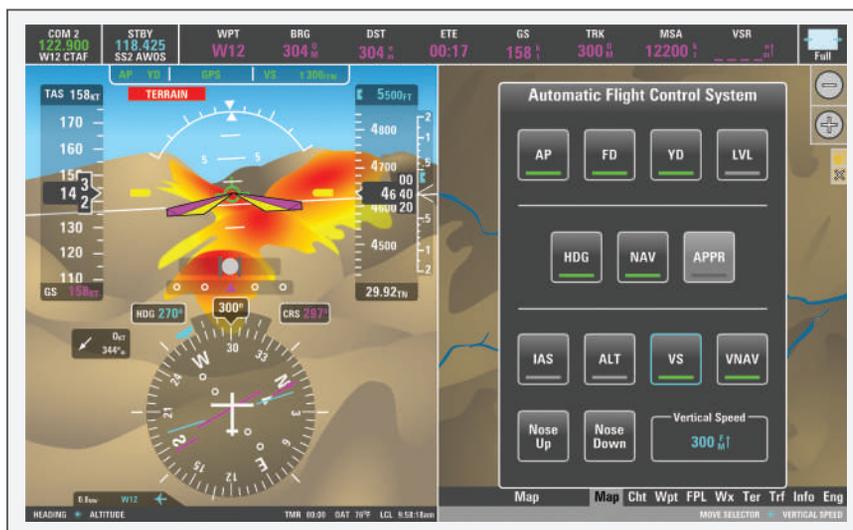


Figura 288 - Controlador do sistema automático de voo e tela do PFD com indicação de PA ativado

11.5.6 Telas de LCD

Os sistemas de instrumentos digitais ou eletrônicos que empregam monitores com tecnologia LCD precisam ter cuidados especiais nas telas. Películas antirreflexo são algumas vezes utilizadas para reduzir o brilho e dar mais visibilidade às indicações. Esses tratamentos são desgastados pela oleosidade da pele humana e por alguns produtos de limpeza, como aqueles produzidos

à base de amônia. É muito importante limpar as telas com um pano limpo, sem fiapos, e umedecido com produto de limpeza seguro e específico para revestimentos antirreflexo, de preferência algum recomendado pelo fabricante da aeronave ou do equipamento.

11.5.7 Sistema de vácuo

Alguns sistemas giroscópicos usam o vácuo como fonte de alimentação. Quando ocorre qualquer deficiência no fornecimento de vácuo, ou sucção, a indicação apresenta erros. Essa deficiência tem sua origem ligada a obstruções da passagem de ar pelos dutos, filtros ou conexões, como também é possível que seja resultado de problemas no mecanismo interno do instrumento, como fricção, partes desgastadas ou quebradas. Qualquer fator que perturbe a livre rotação do giroscópio tem de ser evitado, pois, fatalmente, resultará em precessão excessiva e falha dos instrumentos em manter as indicações corretas.

São necessárias limpezas ou substituições de filtros, checagem e correção no fornecimento de vácuo insuficiente, remoção e substituição da bomba de vácuo ou, ainda, dos instrumentos.

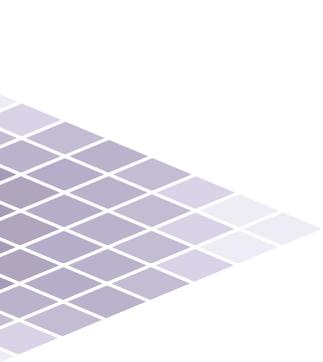
Resumindo

Neste capítulo, foram abordadas diversas informações relacionadas à fabricação e aos cuidados observados no que concerne aos instrumentos. Foram apresentados alguns dos principais materiais usados na confecção das caixas dos instrumentos e as características que lhes permitem se manter confiáveis, mesmo submetidos à vibração e à variação de pressão e temperatura, verificadas durante o voo.

Também foram destacadas algumas características relacionadas à apresentação da informação nos mostradores analógicos, com destaque para as cores usadas para facilitar a percepção do piloto acerca das faixas de operação dos equipamentos.

Foi destacada a importância dos cuidados empregados durante as tarefas de desmontagem, montagem, transporte e armazenagem dos instrumentos, tendo em vista que muitos deles são sensíveis a choques e facilmente danificáveis. Ademais, foram abordados alguns procedimentos de manutenção que visam a manter os instrumentos e sistemas operando corretamente. Foram destacados os testes do altímetro e do sistema de *pitot*-estático, os quais precisam ser realizados a cada 24 meses, para habilitar a aeronave a operar em regime de voo por instrumentos, conforme o RBHA 91.

Ao cabo, foram estudados os principais procedimentos para a compensação da bússola magnética empregando a rosa dos ventos e ímãs de compensação. Assim como foram evidenciados os principais cuidados durante a manutenção do tacômetro, do piloto automático e do sistema de vácuo.



Atividades

Unidade 1

Eletrônica aplicada – aviônicos

Capítulo 1 - Aviônica

1 Qual dispositivo aviônico tem a característica de ser autônomo?

- a) Analógico.
- b) Digital.
- c) Híbrido.
- d) Moderno.

2 Qual par térmico é frequentemente encontrado em aviônicos modernos?

- a) Ferro-cobre.
- b) Cromel-cobre.
- c) Cromel-alumel.
- d) Ferro-alumínio.

3 O que é uma unidade tanque?

- a) Um indutor fixo.
- b) Um capacitor fixo.
- c) Um indutor variável.
- d) Um capacitor variável.

4 Qual transdutor é acionado mecanicamente em seu cursor?

- a) Unidade tanque.
- b) Potenciômetro.
- c) Par térmico.
- d) Antena.

5 Qual dos *displays* abaixo possui propriedades de sólidos e de líquidos?

- a) TRC.
- b) LED.
- c) LCD.
- d) Sete seguimentos.

Capítulo 2 - Radiopropagação

1 Completar a afirmativa abaixo:

As antenas lançam no espaço _____.

- a) Raio-X.
- b) Raios gama.
- c) Ondas de choque.
- d) Ondas eletromagnéticas.

2 Quantos ciclos ocorrem em um comprimento de onda?

- a) Um.
- b) Dois.
- c) Três.
- d) Quatro.

3 Na modulação em amplitude, como é gravada a informação?

- a) Em variações de atitude.
- b) Em variações de amplitude.
- c) Em variações de densidade.
- d) Em variações de frequência.

4 Na modulação em frequência, a informação está gravada sob a forma de variações de:

- a) Amplitude.
- b) Frequência.
- c) Altitude.
- d) Volume.

5 Como é medida a frequência de uma onda?

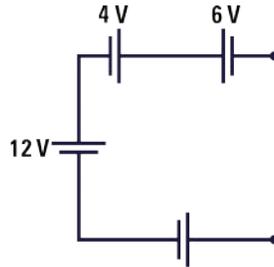
- a) Em ciclos por segundo.
- b) Em ciclos por minuto.
- c) Em radianos.
- d) Em hertz.

Unidade 2

Eletrônica I – semicondutores

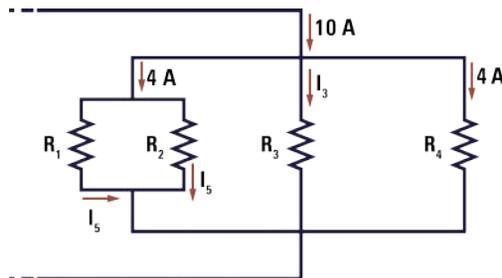
Capítulo 1 - Teoria e análise de circuitos eletrônicos

1 Qual o valor da fonte de tensão equivalente do circuito da figura a seguir?



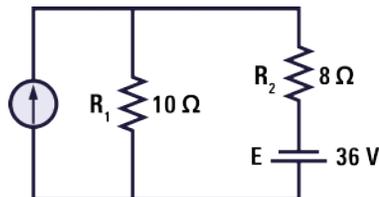
- a) 2 V.
- b) 6 V.
- c) 18 V.
- d) 30 V.

2 Aplicando a lei de Kirchoff para a corrente (LKC), qual o valor da corrente I_3 e I_5 respectivamente? Considere $R_1 = R_2$.



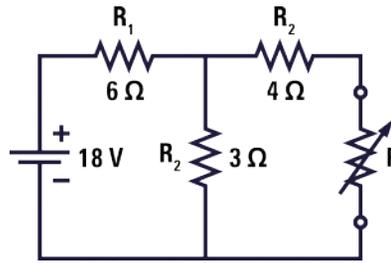
- a) 2 A e 4 A.
- b) 2 A e 2 A.
- c) 4 A e 2 A.
- d) 4 A e 4 A.

3 Aplicando o teorema da superposição, determine o valor da corrente no resistor de 10 Ω do circuito a seguir?



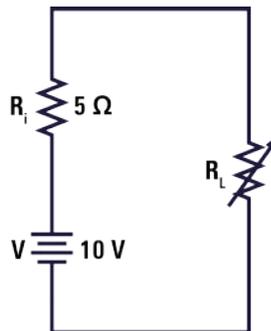
- a) 0 A.
- b) 2 A.
- c) 4 A.
- d) 6 A.

4 Qual o valor do circuito equivalente de Thevenin para o circuito da figura a seguir?



- a) $R_{TH} = 2 \Omega, V_{TH} = 6 \text{ V}$.
- b) $R_{TH} = 2 \Omega, V_{TH} = 18 \text{ V}$.
- c) $R_{TH} = 6 \Omega, V_{TH} = 6 \text{ V}$.
- d) $R_{TH} = 6 \Omega, V_{TH} = 18 \text{ V}$.

5 Qual o valor da máxima potência que o circuito da figura a seguir pode fornecer para o resistor de carga?



- a) 1 W.
- b) 5 W.
- c) 10 W.
- d) 25 W.

Capítulo 2 - Teoria dos dispositivos semicondutores

1 Qual a denominação da corrente elétrica cujo sentido é do potencial positivo para o negativo?

- a) Eletrônica.
- b) Convencional.
- c) Negativa.
- d) Positiva.

2 Qual é a condição básica para o transistor funcionar como amplificador?

- a) A junção base-emissor ser polarizada inversamente.
- b) A junção base-emissor ser polarizada diretamente.
- c) A junção base-coletor ser polarizada diretamente.
- d) Todas as junções do transistor serem polarizadas inversamente.

3 O termistor é usado em circuitos transistorizados com a função de:

- a) Controle de potência.
- b) Controle de temperatura.
- c) Proteção contra sobrecarga.
- d) Estabilização do ponto quiescente.

4 Qual a classe de operação dos transistores que amplifica 180° do sinal de entrada?

- a) Classe A.
- b) Classe AB.
- c) Classe B.
- d) Classe C.

5 Qual a característica básica de um oscilador tipo Hartley?

- a) Não possui caminho de realimentação.
- b) Possui necessariamente um circuito tanque com cristal.
- c) Possui circuito tanque com capacitância dividida.
- d) Possui circuito tanque com indutância dividida.

Capítulo 3 - Transistor de efeito de campo e dispositivos de controle

1 Qual é o procedimento necessário para atingir o *pinch-off* de um JFE?

- a) A tensão de porta deve ser zero.
- b) A corrente de saturação deve ser zero.
- c) A corrente de dreno deve ser igual à da porta.
- d) Todas as tensões de alimentação do JFET devem ser zero.

2 É uma característica do JFET:

- a) Baixa impedância de entrada.
- b) Alta impedância de entrada.
- c) Tensão de entrada sempre nula.
- d) Tensão entre fonte e dreno zero.

3 Qual das características abaixo não está relacionado com o MOSFET?

- a) Baixo grau de integração.
- b) Impedância de porta maior que do JFET.
- c) Possui a porta separada do substrato por material isolante.
- d) É um componente controlado por variações de tensão na porta.

4 Quais são os tipos de MOSFET?

- a) JFET e MOSFET.
- b) Depleção e intensificação.
- c) JFET, MOSFET e intensificação.
- d) Canal N, canal P, JFET e MOSFET.

5 Os terminais de um SCR são:

- a) Base, coletor e emissor.
- b) Porta, dreno e fonte.
- c) Gatilho, catodo e anodo.
- d) Gatilho, anodo 1 e anodo 2.

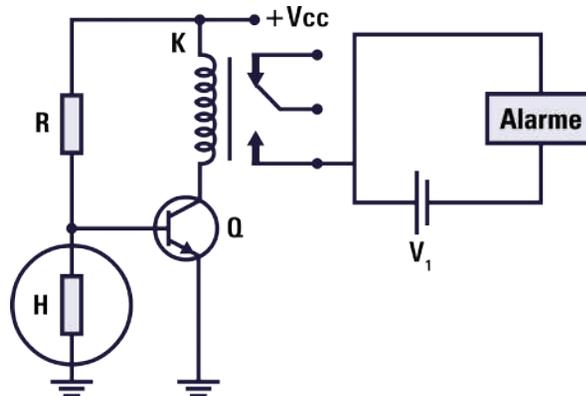
Capítulo 4 - Sensores eletrônicos

1 Complete a frase abaixo:

“A resistência do sensor VDR _____ à medida que aumenta _____”.

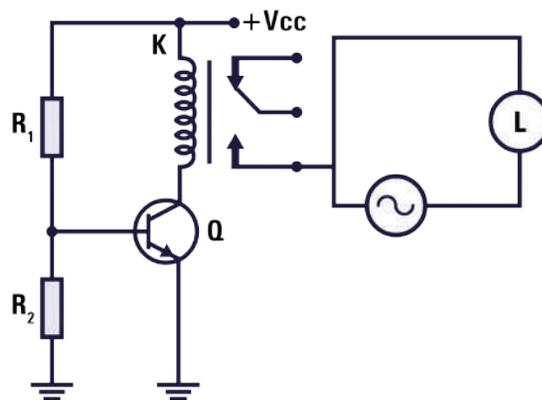
- a) Aumenta; a temperatura.
- b) Aumenta; a tensão aplicada.
- c) Diminui; a temperatura.
- d) Diminui; a tensão aplicada.

2 Qual a condição para que o alarme do circuito a seguir seja acionado?



- a) Aumento da temperatura do ambiente.
- b) Diminuição da temperatura do ambiente.
- c) Aumento da umidade relativa do ar (URA).
- d) Diminuição da umidade relativa do ar (URA).

3 O que acontece com a lâmpada se a temperatura ambiente aumentar e se um termistor NTC for colocado na posição do resistor R_1 ?



- a) A lâmpada acende e permanece acesa.
- b) A lâmpada permanece apagada.
- c) A lâmpada acende e depois se apaga.
- d) A lâmpada permanece piscando.

4 Um sistema optocoplador é composto de:

- a) Um LED e um fotorresistor.
- b) Um LED e um fotodiodo.
- c) Um LED e um fototransistor.
- d) Dois LEDs.

5 Qual junção do fototransistor é fotossensível?

- a) Coletor-emissor.
- b) Emissor-base.
- c) Base-coletor.
- d) Base-coletor e coletor-emissor.

Capítulo 5 - Eletrônica integrada

1 Qual das opções abaixo se refere à montagem de circuitos com componentes extremamente pequenos que podem ser separados e substituídos?

- a) Microeletrônica.
- b) Circuito integrado monolítico.
- c) Circuito integrado híbrido.
- d) Circuito integrado tipo SIL.

2 Qual é a terceira etapa da fabricação de um circuito integrado?

- a) Deposição.
- b) Difusão.
- c) Oxidação.
- d) Metalização.

3 Quais materiais são utilizados no processo de difusão na fabricação de um circuito integrado para formação do material P e N, respectivamente?

- a) Somente boro.
- b) Somente fósforo.
- c) Boro e fósforo.
- d) Fósforo e boro.

4 Qual tipo de CI possui apenas uma fileira de pinos e a contagem é feita da esquerda para a direita quando se está de frente para o CI?

- a) SOIC.
- b) SIL.
- c) DIP.
- d) TO.

5 Qual valor de tensão é fornecido na saída de um CI regulador de tensão 7810?

- a) +5 V.
- b) -5 V.
- c) +10 V.
- d) -10 V.

Capítulo 6 - Instrumentos de medição

1 O que significa o acrônimo TRC?

- a) Tempo de resposta catódica.
- b) Tempo recorrente de controle.
- c) Tubo de raios catódicos.
- d) *Time reverse course*.

2 Qual deve ser a forma de onda do sinal de varredura do TRC?

- a) Senoidal.
- b) Quadrada.
- c) Triangular.
- d) Dente de serra.

3 Qual é o eixo do tempo na tela de leitura do osciloscópio?

- a) Vertical.
- b) Horizontal.
- c) Vertical e horizontal.
- d) Não é possível medir tempo de sinal com o osciloscópio.

4 Para mudar a amplitude do sinal de sincronismo no osciloscópio, é necessário alterar o controle de:

- a) CH_1 .
- b) Cal.
- c) Nível *sinc.*
- d) *Volts/div.*

5 Qual é a unidade de medida eletrônica baseada no logaritmo da base 10?

- a) Ohm.
- b) Watt.
- c) Decibel.
- d) Ampere.

Unidade 3

Eletrônica II – técnicas digitais

Capítulo 1 - Sistemas de numeração

1 Qual o valor do número decimal 42 em binário?

- a) 100110.
- b) 101100.
- c) 101010.
- d) 111000.

2 Qual o valor do número decimal 51 em código Gray?

- a) 01010001.
- b) 01110001.
- c) 00010101.
- d) 01110011.

3 Qual o resultado da soma dos números binários $(1100)_2$ com $(0110)_2$?

- a) 10010.
- b) 00010.
- c) 10110.
- d) 11010.

4 Qual o valor do complemento de 2 para o número decimal 37?

- a) 100101.
- b) 011010.
- c) 100110.
- d) 011011.

5 Qual é a expressão de saída da tabela-verdade a seguir utilizando a forma canônica disjuntiva?

A	B	C	S
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

- a) $S = ABC\bar{C} + A\bar{B}C + \bar{A}B\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C$.
- b) $S = \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}B\bar{C} + A\bar{B}C + ABC\bar{C}$.
- c) $S = (A+B+C).(A+\bar{B}+\bar{C}).(\bar{A}+B+C).(\bar{A}+\bar{B}+\bar{C})$.
- d) $S = (\bar{A}+\bar{B}+\bar{C}).(\bar{A}+B+C).(A+\bar{B}+\bar{C}).(A+B+C)$.

Capítulo 2 - Famílias lógicas digitais

1 Qual é o componente principal da família CMOS?

- a) Resistor.
- b) Díodo.
- c) Transistor.
- d) Mosfét.

2 Qual das alternativas abaixo representa o maior valor de tensão em um *chip* de uma família lógica quando a saída do circuito apresenta nível lógico (0)?

- a) (V_{IL}) .
- b) (V_{IH}) .
- c) (V_{OL}) .
- d) (V_{OH}) .

3 Qual a faixa de tensão necessária para apresentar o nível lógico (1) na entrada de um *chip* da família lógica TTL?

- a) 0 a 0,4 V.
- b) 0 a 0,8 V.
- c) 2 a 5 V.
- d) 2,4 a 5 V.

4 Qual a alternativa que completa corretamente a sentença a seguir?

Define-se como _____ o número máximo de circuitos que podem ser alimentados pela saída do circuito lógico à qual estiverem conectadas.

- a) *Fan-out*.
- b) *Fan-in*.
- c) (t_{PLH}) .
- d) (t_{PHL}) .

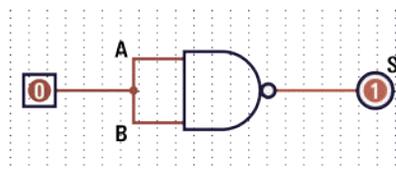
5 Quanto ao processo de fabricação de um circuito lógico, qual deles é formado por vários *chips* dentro do mesmo invólucro?

- a) Monolítico.
- b) Película grossa.
- c) Película fina.
- d) Híbrido.

Capítulo 3 - Lógica combinacional

1 O circuito da figura a seguir representa qual porta lógica?

- a) (AND).
- b) (NAND).
- c) (NOR).
- d) (NOT).



2 No circuito somador, o termo *carry* significa:

- a) O resultado da soma.
- b) Transporte da soma.
- c) Porta lógica (**XNOR**).
- d) Porta lógica (**NOT**).

3 Qual é a função de um codificador digital?

- a) Somar dois números.
- b) Subtrair dois números.
- c) Implementar portas lógicas diferentes das originais.
- d) Converter a linguagem do homem para a linguagem de máquina.

4 Quantas entradas possui um (MUX-12)?

- a) 6.
- b) 10.
- c) 12
- d) 16.

5 Quantas saídas possui um (DEMUX-4)?

- a) 2.
- b) 4.
- c) 6.
- d) 10.

Capítulo 4 - Circuitos contadores e *flip-flops*

1 Quando a saída (Q) de um *flip-flop* possui nível alto 1, qual é no nível na saída (Q)?

- a) 0
- b) 1.
- c) 01.
- d) Indeterminado.

2 Quando as entradas ($R=S=1$) de um *flip-flop* (RS), qual será a saída (Q)?

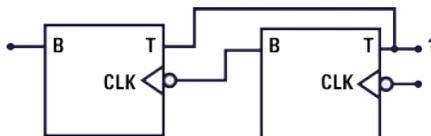
- a) 0
- b) 1.
- c) (Q_a).
- d) Não permitido.

3 Quando ($D=1$) e o *clock* do *flip-flop* (D) está habilitando seu funcionamento, qual será o valor da sua saída (Q)?

- a) 0
- b) 1.
- c) (Q_a).
- d) (\overline{Q}_a).

4 Na figura a seguir, qual o tipo de *clock* usado?

- a) Transição negativa.
- b) Transição positiva.
- c) Nível baixo.
- d) Nível alto.



5 Quanto à característica do *clock*, qual é o tipo de contador quando o *clock* é comum a todos os *flip-flops* que formam o circuito?

- a) Síncrono.
- b) Assíncrono.
- c) Crescente.
- d) Decrescente.

Capítulo 5 - Processamento de sinais digitais

1 O que é um circuito ADC?

- a) Conversor digital-analógico.
- b) Conversor analógico-digital.
- c) Contador
- d) *Flip-flop*.

2 O que é um circuito DAC?

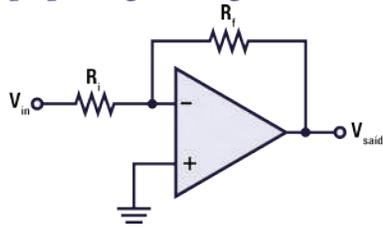
- a) Conversor analógico-digital.
- b) *Flip-flop*.
- c) Conversor digital-analógico.
- d) Contador.

3 Segundo a frequência de *Nyquist*, se for amostrado um sinal analógico de 20 kHz de frequência, qual deve ser a frequência de amostragem?

- a) 20 kHz.
- b) 40 kHz.
- c) 80 kHz.
- d) 100 kHz.

4 Qual a configuração do *amp-op* da figura a seguir?

- a) Somador.
- b) Subtrator.
- c) Comparador.
- d) Amplificador inversor.



5 Qual elemento eletrônico é utilizado para converter uma grandeza física em sinal elétrico?

- a) Amp-op.
- b) Transdutor.
- c) Comparador.
- d) Conversor D/A.

Capítulo 6 - Armazenamento de informações digitais

1 Qual das alternativas a seguir não é uma característica da memória RAM?

- a) Seu acesso é aleatório.
- b) É não volátil.
- c) É memória de escrita e leitura.
- d) É volátil.

2 Qual das alternativas a seguir apresenta o apagamento das informações por intermédio de raio ultravioleta?

- a) *Mask*-ROM.
- b) PROM.
- c) EPROM.
- d) EEPROM.

3 A memória _____ utiliza o *flip-flop* como principal elemento de armazenamento.

- a) SRAM.
- b) DRAM.
- c) DDR.
- d) EEPROM.

4 Qual das alternativas abaixo é uma memória de pequena capacidade e está inserida dentro do processador?

- a) SDRAM.
- b) Cache (L_1).
- c) Cache (L_2).
- d) Cache (L_3).

5 Qual a notação de uma memória que possui 17 linhas de endereços por 12 de dados?

- a) 64Kx17.
- b) 64Kx12.
- c) 128Kx17.
- d) 128Kx12.

Capítulo 7 - Introdução aos computadores

1 Qual das alternativas abaixo é o elemento principal da segunda geração dos computadores?

- a) Válvula.
- b) Díodo.
- c) Transistor.
- d) Circuito integrado.

2 Qual barramento do computador é bidirecional?

- a) Barramento de dados.
- b) Barramento de controle.
- c) Barramento de endereço.
- d) Barramento de dados e endereço.

3 Em qual das alternativas abaixo fica localizado o programa BIOS do computador?

- a) CPU
- b) Disco rígido.
- c) Memória RAM.
- d) Memória ROM.

4 Que tipos de dispositivo podem ser considerados a impressora e o monitor?

- a) Somente entrada de dados.
- b) Somente saída de dados.
- c) De entrada e de saída de dados, respectivamente.
- d) De saída e de entrada de dados, respectivamente.

5 Qual das alternativas abaixo representa a ordem correta da execução de um programa?

- a) Decodificação, busca e execução.
- b) Decodificação, execução e busca.
- c) Busca, execução e decodificação.
- d) Busca, decodificação e execução.

Unidade 4

Eletrônica III – comunicação de dados

Capítulo 1 - Barramento de dados

- 1 Qual tipo de transmissão de dados os *bits* de informação segue por vários caminhos simultaneamente?
 - a) Serial.
 - b) Paralela.
 - c) Síncrona.
 - d) Assíncrona.

- 2 Pode-se afirmar que, no sistema *full duplex*, os dados são transmitidos:
 - a) Apenas em um sentido e simultâneo.
 - b) Apenas em um sentido e não simultâneo.
 - c) Nos dois sentidos e simultâneos.
 - d) Nos dois sentidos e não simultâneos.

- 3 O que é necessário para que uma informação seja dividida em pacotes e transmitida por meio de barramentos?
 - a) Um microprocessador.
 - b) Protocolo de comunicação.
 - c) Sistema *simplex* de transmissão.
 - d) Sistema *semi duplex* e *full duplex* de transmissão.

- 4 Qual protocolo digital possui velocidade de transferência de dados de 1 Mbps e pode controlar até 31 terminais de barramento?
 - a) ARINC 419.
 - b) ARINC 429.
 - c) STANAG 3910.
 - d) MIL-STD-1553.

- 5 Qual protocolo de comunicação utiliza fibra ótica no barramento de dados?
 - a) ARINC 419.
 - b) ARINC 429.
 - c) STANAG 3910.
 - d) MIL-STD-1553.

Capítulo 2 - Computador

1 Qual é o componente principal da família (CMOS)?

- a) Resistor.
- b) Díodo.
- c) Transistor
- d) *Mosfet*.

2 Qual das alternativas a seguir representa o maior valor de tensão em um *chip* de uma família lógica quando a saída do circuito apresenta nível lógico 0?

- a) (V_{IL}).
- b) (V_{IH}).
- c) (V_{OL}).
- d) (V_{OH}).

3 Qual a faixa de tensão necessária para apresentar o nível lógico 1 na entrada de um *chip* da família lógica (TTL)?

- a) 0 a 0,4 V.
- b) 0 a 0,8 V.
- c) 2 a 5 V.
- d) 2,4 a 5 V.

4 Qual alternativa completa corretamente a lacuna a seguir? Define-se como _____ o número máximo de circuitos que podem ser alimentados pela saída do circuito lógico à qual estiverem conectadas.

- a) *Fan-out*.
- b) *Fan-in*.
- c) (t_{PLH}).
- d) (t_{PHL}).

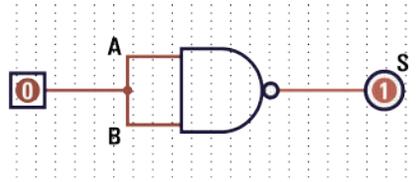
5 Quanto ao processo de fabricação de um circuito de uma família lógica, qual deles é formado por vários *chips* dentro do mesmo invólucro?

- a) Monolítico.
- b) Película grossa.
- c) Película fina.
- d) Híbrido.

Capítulo 3 - Microprocessador

1 O circuito da figura a seguir representa qual porta lógica?

- a) (AND).
- b) (NAND).
- c) (NOR).
- d) (NOT).



2 No circuito somador, o termo *carry* significa:

- a) O resultado da soma.
- b) O transporte da soma.
- c) A porta lógica (XNOR).
- d) A porta lógica (NOT).

3 Qual é a função de um codificador digital?

- a) Somar dois números.
- b) Subtrair dois números.
- c) Implementar portas lógicas diferentes das originais.
- d) Converter a linguagem do homem para a linguagem de máquina.

4 Quantas entradas possui um (MUX-12)?

- a) 6.
- b) 10.
- c) 12.
- d) 16.

5 Quantas saídas possui um (DEMUX-4)?

- a) 2.
- b) 4.
- c) 6.
- d) 10.

Capítulo 4 - Sistemas aviônicos

1 O que é EFIS?

- a) Tela de multifunção colorida.
- b) Indicador eletrônico de atitude e direção.
- c) Indicador eletrônico de situação horizontal.
- d) Sistema eletrônico de instrumento de voo.

2 Qual a diferença entre um PFD e o MFD?

- a) Não existe diferença, são iguais.
- b) O PFD possui teclas laterais de funções.
- c) O MFD possui teclas laterais de funções.
- d) Ambos possuem teclas laterais de funções.

3 Qual é o sistema utilizado pela aeronave para trocar mensagens curtas com o centro de controle de terra?

- a) MFD.
- b) EFIS.
- c) ACARS.
- d) EICAS.

4 Qual sistema é acessado quando o piloto precisa visualizar dados do motor?

- a) EFIS.
- b) EADI.
- c) ACARS.
- d) EICAS.

5 Em qual opção a seguir são inseridos os dados referentes ao plano de voo da aeronave?

- a) FMS.
- b) EADI.
- c) EFIS.
- d) ACARS.

Unidade 5

Instrumentos

Capítulo 1 - Instrumentos de aeronaves

1 Qual das assertivas abaixo se refere à característica dos instrumentos de leitura direta?

- a) Eles são analógicos.
- b) Eles utilizam um transmissor para receber o sinal do sensor e enviá-lo ao indicador do instrumento na cabine.
- c) Eles possuem o elemento sensor e o indicador instalados dentro da caixa do instrumento.
- d) Os instrumentos de leitura direta são equipados com um transdutor dentro caixa de instrumento e são digitais.

2 Quais são os três grupos principais de instrumentos de uma aeronave?

- a) Instrumentos do motor, de voo e anemométricos.
- b) Instrumentos de navegação, de rumo e do motor.
- c) Instrumentos de voo, de navegação e giroscópicos.
- d) Instrumentos do motor, de voo e de navegação.

3 Quais são os instrumentos primários de voo?

- a) Bússola magnética, altímetro, indicador de velocidade, indicador de razão de subida, girodirecional e indicador de curso.
- b) Horizonte artificial, indicador de curso, altímetro, girodirecional, indicador de razão de subida e coordenador de curva.
- c) Indicador de razão de subida, horizonte artificial, indicador de velocidade, indicador de curso, girodirecional e bússola magnética.
- d) Horizonte artificial, indicador de velocidade, altímetro, girodirecional, indicador de razão de subida e coordenador de curva.

4 São instrumentos do motor:

- a) Manômetro de combustível, indicador de temperatura do óleo, tacômetro e indicador de fluxo de combustível.
- b) Tacômetro, indicador de fadiga, acelerômetro e manômetro.
- c) Indicador de pressão de combustível, de fluxo de combustível, de temperatura da cabeça do cilindro e amperímetro.
- d) Voltamperímetro, torquímetro, manômetro de óleo e tacômetro.

5 Qual das assertivas refere-se à chamada cabine de vidro, em inglês, *glass cockpit*?

- a) São as cabines equipadas somente com instrumentos digitais e grande quantidade de equipamentos.
- b) São cabines com predominância de poucos monitores de cristal líquido ou raios catódicos, que apresentam grande quantidade de informação, gerenciada por computadores, sobre os diversos sistemas da aeronave. Há forte integração entre esses sistemas.
- c) São cabines equipadas com muitos monitores de LCD ou CRT, os quais apresentam diversas informações sobre os sistemas da célula da aeronave.
- d) São as cabines que apresentam poucos instrumentos e monitores no painel. São verificadas somente em grandes aeronaves de transporte e de alto desempenho. Nesse tipo de cabine, há alto grau de integração entre os sistemas por meio de computadores.

Capítulo 2 - Instrumentos para medição de pressão

1 São dispositivos usados como sensores em instrumentos de pressão, exceto:

- a) Diafragma.
- b) Giroscópio.
- c) Foles.
- d) Tubo de Bourdon.

2 Nos motores aspirados normais, a indicação da pressão máxima de admissão é:

- a) Acima da pressão atmosférica.
- b) Abaixo da pressão atmosférica.
- c) Muito acima da pressão atmosférica.
- d) Próxima da pressão atmosférica.

3 O indicador de razão de pressão do motor, em inglês, *engine pressure ratio* (EPR), é empregado em aeronaves equipadas com motores a turbina e tem a seguinte função:

- a) Ele informa a pressão de admissão do motor.
- b) Ele relaciona a pressão de admissão com a de escapamento para obter a pressão total do motor.
- c) Ele relaciona a pressão do compressor de alta com a do compressor de baixa.
- d) Ele relaciona a pressão de admissão de ar do motor com a de escapamento para indicar a potência desenvolvida pelo motor.

4 Três dos mais importantes instrumentos de voo são conectados ao sistema anemométrico, são eles:

- a) O indicador de velocidade, o altímetro e o indicador de razão de subida.
- b) O variômetro, o altímetro e o indicador de razão de subida.
- c) O variômetro, o horizonte artificial e o tacômetro.
- d) O velocímetro, o altímetro e a bússola magnética.

5 Qual instrumento informa ao piloto o quanto a aeronave está subindo ou descendo e que ela está em voo nivelado?

- a) A bússola magnética.
- b) O horizonte artificial.
- c) O indicador de velocidade vertical, ou indicador de razão de subida.
- d) O indicador de curvas e derrapagens.

Capítulo 3 - Sistema de indicação remota

1 Qual das assertivas abaixo indica uma desvantagem dos instrumentos de leitura direta?

- a) São mais complexos e mais caros.
- b) Alguns deles requerem a presença de tubulação de fluidos na cabine.
- c) Requerem muitos fios.
- d) Não são precisos.

2 São sistemas elétricos sincronizados empregados em sistemas de indicação remota, tais como o de indicação de posição do trem de pouso, exceto:

- a) Sistema de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã elétrico.
- b) Sistema de corrente alternada de sincronismo de dados por ímã permanente.
- c) Sistema de corrente contínua de sincronismo de dados.
- d) Sistema toroidal.

3 Qual é a função do tacômetro?

- a) Indicar se dois ou mais dispositivos rotativos estão sincronizados.
- b) Medir a velocidade angular de um dispositivo. Nas aeronaves, indica a rotação de eixos, como, por exemplo, o eixo de manivela dos motores alternativos.
- c) Indicar o torque no eixo de potência.
- d) Tratar do instrumento que mede a aceleração da aeronave.

4 Quais as funções do indicador de ângulo de ataque da aeronave?

- a) Indicar o ângulo de ataque da aeronave e a faixa limite de estol.
- b) Indicar o ângulo de ataque da hélice e as faixas limites de estol do motor.
- c) Indicar os limites de estol do compressor.
- d) Indicar os ângulos de ataque e a posição ideal para a aterragem.

5 Qual recurso é utilizado em algumas aeronaves para alertar o piloto sobre a iminência de estol de sustentação da aeronave e atuar na solução de tal problema?

- a) É apresentada uma bandeira de estol no instrumento de AOA.
- b) A coluna de controle do piloto vibra e, em alguns sistemas, há um mecanismo impulsor do manche que o empurra à frente, baixando o nariz da aeronave, retirando a aeronave da condição de estol.
- c) Uma luz de alerta de estol acende no painel e o alarme sonoro dispara. Paralelamente o computador de gerenciamento de voo assume o comando, suspendendo o nariz da aeronave.
- d) Há somente a luz de alarme de estol no painel de instrumentos.

Capítulo 4 - Instrumentos de medição de temperatura

1 Qual é o princípio de funcionamento dos termômetros não elétricos bimetálicos?

- a) É baseado na diferença de pureza entre dois metais ligados mutuamente.
- b) É baseado na diferença de condutividade elétrica entre dois metais distintos, unidos em um único elemento, que recebe o calor do meio em que está inserido.
- c) É baseado no comportamento consistente de dois metais diferentes, que apresentam comportamentos de dilatação distintos, quando submetidos à mesma temperatura.
- d) É baseado na diferença de dilatação de dois metais distintos. A diferença da medida linear dos condutores é convertida em indicação da variação de temperatura do meio.

2 Qual é a base de funcionamento dos termômetros de resistência?

- a) O aumento consistente da resistência de certos metais à medida que a sua temperatura diminui.
- b) O funcionamento tem por base o aumento da amperagem e da tensão de certos condutores à medida que a temperatura diminui.
- c) A diferença de dilatação consistente entre certos metais, proporcional à variação de temperatura do ambiente.
- e) Ela consiste na característica de certos materiais em mudar consistentemente o valor de sua resistência, à medida que varia a sua temperatura.

3 São sensores normalmente indicados para medir altas temperaturas, tais como a da cabeça do cilindro, em motores alternativos, e a dos gases de escapamento em motores a turbina:

- a) Termômetros bimetálicos não elétricos.
- b) Termômetros de mercúrio.
- c) Termômetros de tubo de Bourdon.
- d) Termopares.

4 No sistema de indicação de TTT, o sensoriamento da temperatura é realizado por meio de termopares ligados em paralelo a duas barras de interligação. Quais são os materiais usados na fabricação desses termopares?

- a) Cromel e alumel
- b) Ferro e constantã.
- c) Cobre e constantã.
- d) Cobre e titânio.

5 O seguinte termômetro emprega a resistência elétrica como base de seu funcionamento, especificamente em função da razão do fluxo de corrente no circuito, provocado pela variação da resistência do sensor:

- a) Termopar.
- b) Radiômetro.
- c) Bimetálico.
- d) De resistência.

Capítulo 5 - Instrumentos de indicação direcional

1 Qual é o princípio de funcionamento da bússola magnética?

- a) O funcionamento é baseado na característica de os ímãs permanentes se alinharem ao campo magnético da Terra.
- b) É baseado na característica de os ímãs permanentes se alinharem ao norte geográfico da Terra.
- c) Baseia-se na característica de o norte magnético coincidir exatamente com o norte geográfico.
- d) Baseia-se na atração que o núcleo magnético da Terra exerce sobre os metais.

2 São limitações da bússola magnética, exceto:

- a) Interferência na indicação da direção por fontes magnéticas próximas.
- b) Dependência de fontes de força.
- c) Erro de mergulho.
- d) Erro de variação magnética.

3 Instrumento direcional desenvolvido com o fim de sanar as limitações da bússola magnética:

- a) Horizonte artificial.
- b) Indicador de curva e derrapagem.
- c) Indicador de razão de subida.
- d) Bússola magnética vertical.

4 Instrumento direcional que usa certos semicondutores em seus sensores, os quais reagem ao magnetismo em nível molecular, produzindo variações nas atividades dos elétrons:

- a) Bússola magnética.
- b) Bússola magnética vertical.
- c) Instrumento do sistema pictorial.
- d) Magnetômetro de estado sólido.

5 Instrumento direcional que utiliza uma combinação de giroscópio, de bússola magnética e de sistema de indicação remota:

- a) Bússola magnética vertical.
- b) Bússola giromagnética
- c) Bússola magnética.
- d) Magnetômetro de estado sólido.

Capítulo 6 - Instrumentos giroscópicos

1 Quais são as principais características de um giroscópio que o tornam adequado para uso em instrumentos de atitude?

- a) São as capacidades de rigidez no espaço e precessão, em virtude da rotação de seu rotor.
- b) É a capacidade de apontar para a direção do norte magnético e o movimento de precessão.
- c) São os movimentos pendulares do rotor
- d) São os movimentos de rotação e de rigidez do rotor.

2 No período em que o rotor do giroscópio permanece girando, durante a operação da aeronave, em que posição ele é mantido em relação à horizontal ou à direção indicada?

- a) É mantida em ascensão constante.
- b) O giroscópio mantém a posição constante.
- c) Permanece na posição horizontal sempre.
- d) Permanece com a mesma inclinação.

3 Qual é o princípio de funcionamento do giroscópio de anel de laser?

- a) Bússola magnética, altímetro, indicador de velocidade, indicador de razão de subida, girodirecional e indicador de curso.
- b) Baseia-se na capacitância e resistência do semicondutor utilizado.
- c) Esse giroscópio é baseado na variação do alinhamento dos feixes de laser.
- d) A luz leva mais tempo para completar trajetória circular se esta estiver girando na mesma direção em que a luz está se deslocando.

4 Qual das assertivas abaixo se refere ao giroscópio de estado sólido, de baixo custo, confiável e de dimensões minúsculas?

- a) Giroscópio de anel de laser.
- b) Giroscópio elétrico.
- c) Giroscópio mecânico.
- e) Giroscópios microeletromecânicos (MEMS).

5 Qual das opções abaixo não representa a classificação dos giroscópios com base em suas fontes de alimentação?

- a) Giroscópios elétricos.
- b) Giroscópios hidráulicos.
- c) Giroscópios a vácuo.
- d) Giroscópios a pressão.

Capítulo 7 - Sistema de piloto automático

1 Qual é a principal característica dos pilotos automáticos?

- a) São equipamentos que permitem corrigir desvios de rota e de atitude, assegurando a manutenção da aeronave na rota desejada sem intervenção da tripulação.
- b) Todos os pilotos automáticos permitem o controle da aeronave nos três eixos de movimento: longitudinal, lateral e vertical.
- c) Eles corrigem o curso da aeronave em voos curtos.
- d) Todos os PA permitem o pouso por instrumentos da aeronave.

2 Como é conhecido o piloto automático de um eixo?

- a) Nivelador de *aileron*s.
- b) Nivelador de asas.
- c) AFCS.
- d) Controlador de rumo.

3 Nas aeronaves modernas, o piloto automático, na verdade, é um sistema que, além de permitir o controle do voo, dispõe de sistemas eletrônicos para comunicação, navegação, prevenção de colisões e condições climáticas e, ainda, pouso automático da aeronave. Como se chama esse sistema?

- a) Sistema de piloto automático.
- b) Computador de controle de voo.
- c) Sistema de direção e controle da aeronave.
- d) Sistema de controle de voo automático.

4 São elementos básicos de um sistema de piloto automático, exceto:

- a) Elementos sensores.
- b) Elementos de comando.
- c) Elementos de transmissão.
- d) Elementos de saída.

5 Quais são os elementos de saída do sistema de piloto automático que recebem os sinais processados pelo computador para acionar uma determinada superfície de comando?

- a) Controlador de voo.
- b) Servomotores atuadores.
- c) Magnetômetros.
- d) Acelerômetro.

Capítulo 8 - Sistema de controle e gerenciamento de voo

1 No sistema de controle de voo automático, quem é responsável por enviar os comandos de orientação de voo para o piloto automático?

- a) O computador de controle de voo.
- b) Os servoatuadores inteligentes.
- c) O DADC.
- d) O diretor de voo.

2 Nas aeronaves com piloto automático de dois eixos, qual componente do sistema automático de controle de voo indica os comandos de direção aos pilotos, por meio de uma barra de comandos no monitor primário de voo (PFD)?

- a) O horizonte artificial.
- b) Os servomotores.
- c) O diretor de voo
- d) O computador de controle de voo.

3 São frequências de referências laterais da pista, emitidas por antenas instaladas próximas às pistas de pouso. Elas são utilizadas pelos pilotos e pelo sistema automático de controle de voo como auxílio para o pouso.

- a) *Glide slope.*
- b) Localizador ILS.
- c) GPS.
- d) ATC.

4 É uma versão avançada do indicador de atitude elétrico:

- a) Horizonte artificial.
- b) Diretor de voo.
- c) Indicador de atitude e diretor de voo eletrônico (EADI).
- d) EHSI.

5 Qual sistema realiza diversas funções idênticas às do ECAM, monitorando os sistemas da aeronave e exibindo os parâmetros dos motores e dos sistemas da célula em monitor próprio?

- a) EICAS.
- b) PFD.
- c) *Trend monitoring.*
- d) Sistema de controle de voo.

Capítulo 9 - Alarmes e avisos

1 O arco vermelho no mostrador dos instrumentos indica que situação?

- a) Significa que o equipamento está operando na faixa normal.
- b) Indica que o funcionamento de determinado equipamento entrou em uma condição insatisfatória.
- c) Aponta que há uma condição séria que exige monitoramento, mas que não requer qualquer ação.
- d) Significa que a operação atingiu uma fase específica.

2 Para que servem as luzes do painel anunciador?

- a) Para iluminar o painel da aeronave.
- b) Para indicar a operação de determinado equipamento.
- c) Elas se acendem quando acontece algum evento que precisa de atenção imediata do piloto.
- d) Elas são utilizadas para disparar os sinais sonoros.

3 Qual é a função da luz de advertência geral (*master caution*)?

- a) Chamar a atenção da tripulação para uma situação crítica, indicada no painel anunciador.
- b) Indicar uma situação que requer monitoramento.
- c) Apontar que a aeronave deve pousar o mais rápido possível.
- d) Sinalizar falhas no motor da aeronave.

- 4 **Qual é a finalidade de desarmar a luz de advertência geral (*master caution*), após ela acender, indicando uma falha em determinado componente ou sistema?**
- a) Ela é desarmada para não desviar a atenção da tripulação.
 - b) Para desligar o sinal sonoro.
 - c) Para desligar também a luz do painel anunciador.
 - d) Ela é desarmada para que, se houver um novo problema, as luzes se acendam indicando que uma nova situação requer atenção.
- 5 **Além das luzes anunciadoras e de advertência geral, qual outro meio alerta a tripulação sobre alguma condição insegura ou emergencial, ou sobre a qual o piloto tem de estar ciente?**
- a) Bandeiras de advertência indicadas no painel.
 - b) Sinais de rádio.
 - c) Alerta sonoro.
 - d) Alerta no console central.

Capítulo 10 - Outros instrumentos

- 1 **Qual das assertivas abaixo indica uma excelente ferramenta para acompanhar o estado estrutural da aeronave?**
- a) A aplicação de inibidores de corrosão.
 - b) A diminuição do período entre as inspeções.
 - c) O monitoramento da saúde estrutural.
 - d) A realização de ensaios não destrutivos em todas as inspeções.
- 2 **Qual é o equipamento analógico usado para registrar os esforços cíclicos de aceleração sofridos na estrutura da aeronave, acumulados em determinado período?**
- a) Torquímetro.
 - b) Sincroscópio.
 - c) Acelerômetro registrador.
 - d) Atuador de ensaio estrutural.
- 3 **Sabendo-se que o sistema de monitoramento da saúde estrutural, em inglês, *structural health monitoring* (SHM), é caracterizado pela presença de diversos sensores de dimensões reduzidas, os quais permitem o monitoramento de cargas operacionais e de outros fatores que influenciam na saúde estrutural da aeronave. Qual das assertivas abaixo não representa uma vantagem desse sistema?**
- a) Esse sistema permite eliminar as inspeções periódicas da aeronave.
 - b) Evita-se a desmontagem de componentes para verificar se determinada área crítica sofreu dano, em virtude das cargas a que aeronave foi submetida.
 - c) Permite o acesso rápido aos dados do monitoramento contínuo acumulados em determinado período, por meio de tela própria no painel de manutenção da aeronave.
 - d) Permite a verificação precoce de dano na estrutura, por meio dos sensores de danos instalados nas áreas críticas da aeronave.

4 Qual das opções abaixo não indica um tipo de sensor utilizado nos modernos sistemas de monitoramento da saúde estrutural da aeronave?

- a) Sensor de fibra ótica.
- b) Sensor de diafragma.
- c) Sensor de microeletromecânicos (MEMS).
- d) Sensor de monitoramento de vácuo comparativo, em inglês, *comparative vacuum monitoring* (CVM).

5 Qual das assertivas abaixo apresenta o instrumento empregado para indicar a tensão da bateria e dos geradores e a corrente solicitada de cada gerador?

- a) Amperímetro.
- b) Ohmímetro.
- c) Indicador de fadiga.
- d) Voltamperímetro.

Capítulo 11 - Características, cuidados e manutenção dos instrumentos

1 São materiais utilizados na fabricação das caixas dos instrumentos de aeronaves, exceto:

- a) Cobre.
- b) Liga de alumínio.
- c) Liga de magnésio.
- d) Plástico.

2 Qual das assertivas abaixo não representa um cuidado a ser verificado durante o processo de inspeção e manutenção dos instrumentos de aeronaves?

- a) Os instrumentos não podem sofrer quedas.
- b) Os instrumentos não devem ser lubrificados em excesso.
- c) Os instrumentos não podem entrar em contato com contaminantes.
- d) Os filtros não devem ser substituídos.

3 Para que uma aeronave esteja habilitada a operar por instrumentos (IFR), o altímetro precisa ter sido calibrado dentro de qual prazo máximo anterior ao voo?

- a) 12 meses.
- b) 24 meses.
- c) 1 ano.
- d) 60 meses.

4 Qual das assertivas abaixo não representa um fator que pode acarretar o mau funcionamento do sistema de *pitot* da aeronave?

- a) A presença de água retida nas vias do sistema.
- b) Vazamentos de ar do sistema.
- c) Injeção de ar comprimido ou de nitrogênio nas linhas de ar, com todos os instrumentos do sistema desconectados.
- d) Presença de objetos estranhos nos dutos de ar.

5 Qual é o procedimento empregado para diminuir o desvio magnético da bússola magnética, causado por interferência eletromagnética de materiais ferrosos e componentes elétricos da cabine?

- a) Calagem da bússola.
- b) Comparação da bússola.
- c) Calagem da rosa dos ventos.
- d) Compensação da bússola.

Glossário

Unidade 1

Eletrônica aplicada – aviônicos

Backup - Modo em que se garante a recuperação de dados, caso corra risco de serem perdidos.

Cablagem - Instalação de sistemas de cabeamento; realização de ato ou efeito de cablar; conjunto de cabos.

Cockpit - Termo em inglês que significa cabine de pilotagem.

Display - Mostrador ou tela onde são apresentadas as informações à tripulação, tais como velocidade, horizonte artificial, radar, etc.

Deflexão - Diferença na trajetória de um projétil, para a esquerda ou para a direita, causada pela rotação que lhe é imposta pelo raiamento do tubo-alma de um canhão.

Dielétrico - Também chamados de isolantes, visto que não há possibilidade de passagem de corrente elétrica por esse material.

Ecrã - Parte frontal do *display* em que são visualizadas as informações.

Instrumentação - Em aviação, consiste em tomar medida de pressão, velocidade, entre outros aspectos, com dispositivos confiáveis.

Redundância - Em aviação moderna, conceito segundo o qual todas as informações são processadas por mais de um dispositivo.

Semicondutor - Cristal que recebe dopagem, passando a ter característica entre condutor e isolante.

Unidade 2

Eletrônica I – semicondutores

BW - Originada do termo inglês *bandwidth* e também conhecida como largura de banda, representa a capacidade de transmissão de um dispositivo em termos de frequência.

Carga do circuito - Representa a impedância equivalente que o equipamento apresenta para o circuito. Ela pode ser puramente resistiva ou reativa.

Corrente de fuga - Corrente inversa de pequena proporção existente entre junções semicondutoras do tipo PN. O valor dessa corrente aumenta com o aumento da temperatura das junções.

Condutividade - É uma característica que os materiais apresentam em relação à capacidade de conduzir corrente. É o inverso da resistividade e está relacionado ao tipo de material utilizado. O cobre e a prata são exemplos de materiais com alta condutividade.

Corrente de manutenção I_H - Mínima corrente necessária para manter o tiristor conduzindo. Para qualquer valor de corrente menor que I_H , o tiristor para de conduzir.

Cristal de quartzo - Componente eletrônico baseado no cristal de quartzo, é utilizado em osciladores eletrônicos devido a sua grande estabilidade de frequência.

Data sheet - Também conhecida como folha de dados, descreve, de forma resumida, características e informações do componente ou equipamento.

Efeito piezoelétrico - Efeito ocorrido em cristais de quartzo, em que é gerada tensão elétrica em função da pressão mecânica realizada no cristal.

Estrangulamento (*pinch-off*) - Termo que identifica a tensão necessária para estrangular o canal do JFET canal P ou N.

Fase - Indica a posição de um sinal variável no tempo, sendo o seu valor dado em ângulo e/ou polaridade.

Fonte de corrente - A utilização de fontes de corrente em diagramas esquemáticos é muito pouco utilizada, sendo a fonte de tensão a mais empregada nos diagramas dos diversos circuitos eletrônicos. Ela é comumente usada em análise de circuitos, por meio dos teoremas de análise de circuitos.

Filtro de linha - É utilizado para proteger equipamentos de sobrecarga de corrente. Possui um fusível como elemento de proteção. É conhecido como régua.

Frequência intermediária (FI) - Frequência de sinal usada internamente ao circuito eletrônico resultante da mistura de outros sinais de frequências diferentes.

Ganho do transistor - É a relação do sinal de saída pela entrada, em termos de tensão, corrente e potência. Para existir ganho, essa relação tem de ser maior que 1. Caso contrário, há perda ou atenuação.

h_{FE} - Termo utilizado para análise de resposta do transistor trabalhando com sinal alternado, significando seu ganho de corrente, podendo ser chamado também de β (beta).

Lacunas - É o resultado da ligação covalente, na qual o elétron se torna livre. É uma forma de representar a ausência do elétron.

Modelo atômico de Bohr - Utiliza sete órbitas para representar os níveis de energia de cada átomo, tais órbitas possuem limites quanto ao número de elétrons. Cada elemento químico possui um número determinado de elétrons distribuídos por essas órbitas.

Nível DC - É o nível de referência de um sinal, podendo ser positivo, negativo ou igual a zero.

Ponto quiescente (**Q**) - Ponto de operação do transistor, estabelecido em função dos valores da polarização de corrente contínua do circuito.

Polarização - Valores de tensão estabelecidos para o funcionamento de circuitos eletrônicos.

Push-pull - Denominação para circuitos eletrônicos amplificadores em que os ciclos do sinal são amplificados separadamente e, depois, compostos novamente em um sinal único.

Quadripolos - Representação gráfica para um circuito eletrônico que possui entrada e saída de sinal.

Regra dos divisores de tensão - A fórmula da regra dos divisores de tensão é resultado da aplicação da lei de Ohm. A fórmula facilita e agiliza os cálculos por parte dos estudantes e projetistas.

Simetria - Termo utilizado para descrever igualdade.

Seletividade - Característica que determina a eficiência de separação entre duas frequências próximas por parte do circuito sintonizável do equipamento eletrônico.

Tensão média - Valor de tensão definido de maneira que a área sob a curva acima e abaixo desse valor são iguais.

Tensão eficaz - Valor de tensão equivalente a uma tensão contínua que desenvolve a mesma potência.

Tensão de pico - Valor máximo instantâneo da tensão.

Tensão de ruptura - Máxima tensão inversa suportada pelo transistor ou diodo semicondutor.

Válvula diodo - É uma simples válvula eletrônica que contém dois eletrodos. Era utilizada como elemento retificador e foi substituída pelos diodos semicondutores.

Varredura - Tempo levado pelo sinal dente de serra para varrer a tela do tubo de raios catódicos.

Unidade 3

Eletrônica II – técnicas digitais

Álgebra *booleana* - Sistema matemático criado por George Boole, usado para implementar todas as funções lógicas digitais presentes nos equipamentos eletrônicos digitais.

ASCII - Código proposto por Robert W. Bemer, visando a padronizar os códigos para caracteres alfanuméricos (letras, sinais, números e acentos).

Barramento - Também chamado de *bus*; conjunto de todas as vias por onde passam os dados (*bits*) trocados entre sistemas eletrônicos, cada via do barramento passa apenas um *bit* por vez.

BCD - Do inglês *binary coded decimal*; código de quatro *bits* utilizado para representar os algarismos decimais em binário.

BIT - Do inglês *binary digit*, é a menor unidade lógica presente nos estudos da eletrônica digital; é no *bit* que toda a lógica digital está lastreada.

Cache - Tipo de memória de alta velocidade usada para acelerar o processamento dos dados internos ao microprocessador.

Cálculo balístico - Cálculo realizado para determinar a trajetória de um projétil.

Carry - Nome dado ao *bit* de transporte utilizado na soma e na subtração digital.

Circuito discreto - Circuito de uma porta lógica em que sua configuração executa a mesma função que a porta lógica citada; formado por componentes – resistores, chaves, lâmpadas.

Clock - Sinal utilizado na eletrônica digital com a função de mudar os estados lógicos do circuito; onda com formato quadrado que muda os tempos de nível alto e baixo de acordo com a necessidade do circuito.

Código Gray - Código digital inventado por Frank Gray cuja característica é a mudança de apenas um *bit* de uma linha para outra do código.

Compilador - *Software* que realiza a conversão da linguagem de alto nível, empregada por alguns *softwares*, em linguagem de máquina, chamada também de linguagem de baixo nível.

Enable - Terminal existente em alguns circuitos integrados que possui como função a habilitação do seu funcionamento.

Encapsulamento - Tipo de invólucro em que são montados os componentes eletrônicos como o transistor e os circuitos integrados; proporciona resistência mecânica e ligação dos terminais do componente.

Fluxograma - Simbologia gráfica usada para representar os passos realizados pelo *software* para a execução de suas funções.

Fotocélula - Sensor que varia suas características físicas em função da intensidade da luz que incide sobre ele.

Fotodiodo - Diodo de silício sensível à luz, cuja corrente de fuga é alterada de acordo com a intensidade luminosa incidente; componente polarizado inversamente para poder funcionar como fotodiodo, se polarizado diretamente, não funciona como fotossensor.

Frequência de Nyquist - Frequência de amostragem mínima necessária à devida conversão de um sinal analógico para digital.

Hardware - Elementos físicos que compõem qualquer equipamento eletrônico.

Interfaceamento - Termo proveniente de interface; equipamento necessário para interligar os componentes ou as partes de um equipamento que não pode ser ligado direto devido à incompatibilidade dos sistemas.

Latch - Tipo de memória temporária montada a partir de circuitos *flip-flops* que possui dois estados lógicos fixos, é também chamado de circuito biestável.

LSI - Do inglês *large scale integration*; integração em larga escala de transistores, colocando até 1.000 transistores por pastilha de fabricação.

Módulo - Quantidade de códigos digitais não repetidos que o contador ou decontador apresenta nas suas saídas.

Overflow - Termo em inglês usado para indicar que houve estouro na capacidade de cálculo do circuito digital.

Quantização - Processo responsável por pegar amostras do sinal analógico para transformá-las em códigos digitais.

Refresh - Recurso responsável por manter o dado na memória.

Retenção - Circuito digital necessário no processo de conversão analógico-digital cuja função é manter o valor amostrado do sinal analógico constante até a próxima amostragem.

Ruído - Perturbação eletrônica causada por ondas eletromagnéticas que entram nos equipamentos eletrônicos e atrapalham o correto funcionamento dos componentes presentes no circuito.

Shift register - Tipo de registrador digital que desloca o *bit* de um *flip-flop* para outro, transferindo o dado de entrada para a sua saída.

Sistema microprocessado - Sistema eletrônico que possui como componente principal o microprocessador, o qual executa funções específicas complexas.

Sistema operacional - *Software* necessário ao funcionamento de todas as partes integrantes de um sistema computadorizado.

Software - Elemento lógico que proporciona o funcionamento das partes integrantes de um sistema microprocessado.

Tabela-verdade - Conjunto de variáveis possíveis que o circuito digital gera na sua saída.

Termistor - Tipo de resistor que possui sua resistência variável em função da temperatura.

Transição - Mudança de estado lógico, positivo ou negativo, do sinal de *clock* responsável por mudar a saída do circuito digital.

VLSI - Do inglês *very large scale integration*; alta integração em larga escala que pode colocar até 100.000 transistores por pastilha de fabricação.

Unidade 4

Eletrônica III – comunicação de dados

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Entidade privada e sem fins lucrativos, fundada em 1940, responsável por toda normalização para a produção de bens e serviços no Brasil, seguindo as orientações de órgãos normativos internacionais da padronização de equipamentos eletrônicos no Brasil.

Acrônimo - Sigla formada pelas letras iniciais das palavras.

Atitude - Posicionamento do eixo longitudinal da aeronave em relação ao horizonte.

Autoindução - Efeito indutivo causado em fios que passam paralelos a outros fios onde esteja circulando corrente elétrica.

Built-in test - Autoteste realizado pelo próprio equipamento para verificar se os circuitos internos estão operando adequadamente.

Comutação - Troca ou permuta do equipamento em si. O avião possui dois computadores que são comutados automaticamente, mantendo sempre o de melhor desempenho.

Dado - Qualquer informação que esteja sendo processada pelo computador.

Data bus - Termo atribuído ao barramento, fisicamente formado por vários fios, por onde passam os sinais referentes aos dados.

Display - Tela ou mostrador; componente eletrônico responsável por mostrar imagens, números e qualquer outra informação de modo visual.

EMI - Interferências causadas em equipamentos eletrônicos por ondas de rádio, que afetam o funcionamento do circuito.

Firmware - Pequeno *software* formado por um conjunto de instruções próprias do equipamento, as quais são carregadas diretamente no *hardware* a ser controlado.

Giroscópio - Dispositivo formado por um rotor suspenso internamente a círculos articulados, usado para identificar a atitude e os movimentos da aeronave.

Glass cockpit - Cabine de aeronave que possui instrumentos eletrônicos de voo com *displays* digitais de visualização.

Glide slope - Sistema utilizado para fornecer o correto ângulo de pouso da aeronave, sendo esse ângulo indicado no painel de instrumentos do piloto.

Interoperabilidade - Capacidade de comunicação entre sistemas, sendo essa troca feita de forma transparente e compatível.

Mnemônico - Em linguagem de programação, mnemônico é um grupo de três letras que representam o código de uma instrução, substituindo os números binários, como é feito na linguagem de máquina. Sua utilização facilita bastante a programação.

NEMP - Do inglês *nuclear electromagnetic pulse*; é um pulso eletromagnético de grande amplitude gerado por explosão nuclear.

Paridade - Recurso digital para verificar a validade do dado que foi transmitido.

Redundância - Duplicação de um meio de transmissão, independente se para isso está sendo utilizado um meio físico ou um sistema rádio.

Serialmente - Método de transmissão dos dados *bits*, um após o outro, utilizando, assim, uma única via de comunicação serial.

Setar - Significa colocar nível lógico 1; é muito empregado nas diversas instruções de um programa.

Sistema de navegação vertical - Sistema que controla as movimentações verticais da aeronave proporcionadas pelo piloto automático.

Sistema embarcado - Sistema microprocessado para realizar uma função específica; é aquele localizado em veículos e aeronaves.

TDM - Modulação usada para a transmissão de vários sinais digitais em um mesmo meio.

TRC - Tubo gerador de imagens de padrão analógico; usa feixes de elétrons internos para desenhar a imagem na tela.

Topologia - Modo como computadores ou equipamentos de comunicação de dados estão interligados fisicamente ou não via rede de dados.

VNAV - Do inglês *vertical navigation*; é um sistema de navegação por piloto automático que controla os movimentos verticais da aeronave.

Walkie talkie - Tipo de transceptor, pois transmite e recebe sinais de áudio por meio de ondas de rádio.

Unidade 5

Instrumentos

Aeronave certificada - Aeronave que possui certificação, ou homologação, este procedimento consiste na atividade de avaliar e atestar que determinado produto (aeronave ou seu componente) possui as características mínimas que asseguram seu uso seguro para o tipo de operação pretendida.

Aileron - Partes móveis dos bordos de fuga das asas de aeronaves que servem para controlar o movimento de rolamento da aeronave.

Azimute - Medida de abertura angular cujo valor em graus perfaz horizontalmente um círculo que vai do norte geográfico até a projeção de um alvo com o horizonte. Em navegação, é utilizada no sentido de direção.

Bomba palheta rotativa - Bomba de deslocamento positivo que usa palhetas montadas em um rotor que gira dentro de uma cavidade.

Cabragem - Elevar o nariz do avião acima da linha de voo.

Calço hidráulico - Situação que ocorre quando um fluido se acumula no interior de uma câmara, na parte traseira do pistão, impedindo seu deslocamento, por não haver abertura de escoamento do fluido.

Cartão-compasso - Dispositivo circular ligado ao elemento flutuador da bússola magnética de aviação. Ele é usualmente graduado em radiais de cinco graus. Nele, também são marcados os pontos cardeais.

Chopper - O conversor *chopper* é utilizado para obter uma tensão DC variável, a partir de uma fonte DC constante.

Compensador - Superfície de comando auxiliar, similar a um aerofólio, presa a uma superfície de comando e destinada a reduzir a força de controle ou auxiliar no equilíbrio do avião.

Componente de estado sólido - Circuitos ou dispositivos construídos inteiramente a partir de materiais sólidos, nos quais os elétrons estão confinados inteiramente dentro do material sólido; o termo é frequentemente usado para contrastar com as tecnologias anteriores.

Comutador - Dispositivo que muda o sentido da corrente elétrica de um circuito, em motor elétrico ou gerador, permitindo a inversão do sentido da força que move a espira e promove a rotação.

Corda - É a linha imaginária que liga o bordo de ataque ao bordo de fuga de um aerofólio.

Corrente de Foucault - Também chamada de corrente parasita, ela consiste na corrente induzida em um material condutor, relativamente grande, quando sujeito a um fluxo magnético variável.

Corrente parasita - O mesmo que corrente de Foucault.

Cristal piezoelétrico - Consiste em um cristal que, ao ser submetido a uma pressão, gera um campo elétrico que pode ser coletado como tensão elétrica.

Curva de procedimento - Manobra executada por uma aeronave, durante o segmento de aproximação inicial, que consiste em uma curva, a partir do rumo de afastamento, seguida de outra, em sentido contrário, de modo a permitir que a aeronave intercepte e prossiga ao longo do rumo de aproximação final ou intermediária.

Curva derrapada - Curva plana, com falta de inclinação nas asas, como se o piloto estivesse tentando fazer a curva usando apenas os pedais.

Curva glissada - Curva feita com asas muito inclinadas, como se o piloto estivesse tentando fazê-la usando só os *aileron*s, esquecendo-se de executar o movimento de cabragem.

Driver - *Software* que permite que o computador se comunique com o *hardware* ou com os dispositivos. Sem ele, o *hardware* conectado ao computador não funciona corretamente.

Enrolamento toroidal - Enrolamento em forma de toroide, ou seja, em forma tubular.

Escamoteável - Fazer com que (algo) desapareça; quando se refere a trens de pouso, são aqueles que são recolhidos para dentro da fuselagem do avião.

Estol - Condição de um aerofólio ou avião em que se encontra operando em um ângulo de ataque maior que o de máxima sustentação. Ocorre uma perda da velocidade de voo e, em muitos casos, perda temporária da sustentação e do controle da aeronave.

Flutuação - Oscilação, balanço ou variação.

Fly-by-wire - Tipo de controle das superfícies móveis de um avião por computador, permite que qualquer modificação da direção e do sentido de uma aeronave feita pelo piloto seja filtrada e repassada para as superfícies móveis: *aileron*, profundor e leme; com ele, é possível aumentar a velocidade de reação e de manobra de uma aeronave ou impedir que o piloto ultrapasse os limites da célula.

Força defletiva - Força que altera a direção do movimento para um dos lados; ela muda a posição ou o movimento natural do objeto sobre o qual ela atua.

Giroscópio - Dispositivo dotado de rotor suspenso por um suporte formado por dois círculos articulados, com juntas cardá; seu funcionamento baseia-se no princípio da inércia.

Glide slope - Sinais de frequência emitidos por antenas, localizadas próximas à cabeceira da pista, cuja finalidade é fornecer o ângulo de planeio correto (rampa de pouso) durante a aproximação de uma aeronave.

ILS - Sinais de frequência emitidos por antenas localizadas próximas à cabeceira oposta da pista, na qual se executa a aproximação; os sinais têm a finalidade de fornecer referências para o piloto ou piloto automático, a fim de alinhar a aeronave ao eixo da pista.

Inclinômetro - Instrumento utilizado para medir ângulos de inclinação e elevação.

Instrumento anemométrico - Instrumento usado para medir a velocidade de um fluido, que pode ser o ar (vento) ou a água.

Junta cardã - Também chamada de junta universal, é uma junção de acoplamento de um eixo que transfere o movimento em outra direção sem modificar o sentido de giro; par de dobradiças articuladas entre si, mas que, por meio de um eixo comum a ambas, ortogonalmente posicionado, modifica a direção desse movimento.

LCD - O *display* de cristal líquido, em inglês, *liquid crystal display*, consiste em um painel fino usado para exibir informações por via eletrônica, como texto, imagens e vídeos; ele é composto de um líquido polarizador de luz, eletricamente controlado, que se encontra comprimido dentro de celas, entre duas lâminas transparentes polarizadoras.

LED - O diodo emissor de luz, em inglês, *light emitting diode*, também conhecido pela sigla LED, é usado para a emissão de luz em locais e instrumentos, onde se torna mais conveniente a sua utilização no lugar de uma lâmpada.

Lei de Ohm - Essa lei estabelece que, para um condutor mantido em temperatura constante, a razão existente entre a tensão verificada entre dois pontos e a corrente elétrica é constante; tal constante é denominada resistência elétrica.

Limbo - Círculo dividido em unidades angulares; as bússolas podem apresentar o limbo graduado para determinação de azimutes ou de rumos.

Linha agônica - São linhas que unem os pontos com declinação magnética nula, em um mapa de navegação.

Linha de fé - Linha de referência instalada na face do visor da bússola, empregada para identificar a leitura da bússola.

Mancal de joia - Dispositivo onde se apoia um eixo com liberdade para girar ou oscilar, com pequeno atrito; o apoio é feito de pedra preciosa, como o rubi, por ser resistente e proporcionar baixa fricção.

MEMS - Sistema microeletromecânico; dispositivos formados pela integração de elementos mecânicos, sensores, atuadores e eletrônica em uma pastilha comum de silício, com a tecnologia de microfabricação.

Mola cabelo - Mola em forma de espiral.

Motor aspirado - Aquele que aspira o ar, ou seja, não tem nenhum tipo de sobrealimentação como turbo ou compressor.

Motor convencional - Motor alternativo.

Motor de indução elétrica - Motor elétrico construído de tal maneira que se tem dois campos magnéticos giratórios.

Motor turboalimentado - Motores equipados com turboalimentadores, que aumentam a densidade do ar dentro da câmara de combustão do motor; devido a esse aumento de volume e de massa de ar comprimido, mais combustível pode ser injetado para produzir maior potência.

Precessão giroscópica - Fenômeno físico verificado nos giroscópios, consiste na mudança do eixo de rotação do rotor ao sofrer a ação de uma força defletiva. A reação a essa força não ocorre no ponto em que foi empregada, mas, sim, em um localizado a 90 graus em relação ao plano rotacional.

Princípio de Bernoulli - Segundo esse princípio, se a velocidade de uma partícula de um fluido aumenta, enquanto ela se escoar ao longo de uma linha de corrente, a pressão do fluido deve diminuir e vice-versa.

Sangria - Ato de permitir o escoamento de um fluido confinado em um recipiente.

Sistema elétrico redundante - Sistema que possui um segundo dispositivo acessível para uso imediato quando ocorre uma falha no dispositivo primário do sistema.

Slat - Aerofólio auxiliar arqueado, posicionado no bordo de ataque do aerofólio principal, de forma a criar uma fenda.

TCAS - Em inglês, *traffic collision avoidance system*; pequeno conjunto de equipamentos eletrônicos de bordo, que constitui um sistema de segurança de voo, é incorporado às aeronaves com o objetivo de evitar colisões aéreas com outras aeronaves.

Torque - Torque do motor, ou binário motor; medida de força rotacional exercida sobre um eixo, mede-se em Newton metro (Nm). Ele reflete a potência disponibilizada pelo motor para girar o eixo de manivela nos motores alternativos, ou eixo de potência nos motores a turbina.

Transdutor - Dispositivo que transforma um tipo de energia em outro, empregando, para isso, um elemento sensor.

Tubo de Prandtl - Variante do tubo de *pitot*, em que as tomadas de pressão estática são realizadas diretamente no aparelho, e não em outra tomada de pressão na tubulação.

Tubo de raios catódicos - Tipo de válvula termiônica contendo um ou mais canhões de elétrons e um ecrã fluorescente, usado para apresentar imagens.

Voo por instrumentos - Regras de voo por instrumentos, em inglês, *instrument flight rules* (IFR), que definem o conjunto de regras, das quais o piloto se utiliza para conduzir uma aeronave, orientando-se apenas pelos instrumentos de bordo, em vez de se orientar por referências visuais externas.

VOR - O radiofarol omnidirecional VHF, em inglês, *very high frequency omnidirectional range*, é um equipamento eletrônico usado na navegação aérea.

Referências

Unidade 1

Eletrônica aplicada – aviônicos

AULETE DIGITAL. **Transdutor**. 2016. Disponível em: <<http://www.aulete.com.br/transdutor>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica (COMAER). Departamento de Aviação Civil (DAC). **MCA 58-15**: manual do curso mecânico de manutenção aeronáutica – aviônicos. Brasília: DAC, 2004. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/habilitacao/manualCursos.asp>>. Acesso em: 1º out. 2015.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA (EUA). U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration (FAA). **FAA-H-8083-6**: advanced avionics handbook. Oklahoma City, OK: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2009. Disponível em: <https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/advanced_avionics_handbook/media/FAA-H-8083-6.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2015.

_____. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration (FAA). **FAA-H-8083-31**: aviation maintenance technician handbook – airframe. v. 2. Oklahoma City, OK: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2012. Disponível em: <https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/amt_airframe_vol2.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2015.

TOOLEY, M. **Aircraft digital electronic and computer systems**: principles, operation and maintenance. New York, NY, US: Elsevier, 2007.

_____; WYATT, D. **Aircraft electrical and electronic systems**. New York, NY, US: Elsevier, 2009.

Unidade 2

Eletrônica I – semicondutores

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. – 10ª ed. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

_____; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. – 8ª ed. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica (COMAER). Departamento de Aviação Civil (DAC). **MCA 58-15**: manual do curso mecânico de manutenção aeronáutica – aviônicos. Brasília: DAC, 2004. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/habilitacao/manualCursos.asp>>. Acesso em: 1º out. 2015.

LANDER, C. W. **Eletrônica industrial**: teoria e aplicações. – 2ª ed. – São Paulo: Makron Books, 1996.

MALVINO, A. P. **Eletrônica**. – 4ª ed. – São Paulo: Makron Books, 1995.

MARQUES, A. E. B.; CRUZ, E. C. A.; CHOUERI JÚNIOR, S. **Dispositivos semicondutores**: diodos e transistores. – 6ª ed. – São Paulo: Érica, 2001.

McGRAW-HILL, S.; GUSSOW, M. **Eletricidade básica**. – 2ª ed. – São Paulo: Makron Books, 1996.

SEABRA, A. C. **Amplificadores operacionais**: teoria e análise. – 10ª ed. – São Paulo: Érica, 2000.

SILVA, G. M. da. **Termopares**: dispositivos utilizados para medir temperatura. Slides. 2016. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecnica/maprotec/termopares-dispositivos-utilizados-para-medir-temperatura.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2016.

TOOLEY, M. **Aircraft digital electronic and computer systems**: principles, operations and maintenance. – 1ª ed. – UK: Elsevier, 2007.

WYATT, D; TOOLEY, M. **Aircraft electrical and electronic systems**: principles, maintenance and operation. – 1ª ed. – UK: Elsevier, 2009.

Unidade 3

Eletrônica II – técnicas digitais

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica (COMAER). Departamento de Aviação Civil (DAC). **MCA 58-15**: manual do curso mecânico manutenção de aeronaves – aviônicos. Brasília: DAC, 2004. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/habilitacao/manualCursos.asp>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

DE LOURENÇO, A. C. *et. al.* **Circuitos digitais**. – 4ª ed. – São Paulo: Érica, 2001.

IDOETA, I. V.; CAPUANO, F. G. **Elementos de eletrônica digital**. – 31ª ed. – São Paulo: Érica, 2000.

MALVINO, A. P. **Microcomputadores e microprocessadores**. São Paulo: McGraw Hill, 2008.

TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S. **Sistemas digitais: princípios e aplicações**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

TOOLEY, M. **Aircraft digital electronic and computer systems: principles, operations and maintenance**. – 1st ed. – United Kingdom, UK: Elsevier, 2007.

WYATT, D; TOOLEY, M. **Aircraft electrical and electronic systems: principles, maintenance and operation**. – 1st ed. – United Kingdom, UK: Elsevier, 2009.

Unidade 4

Eletrônica III – comunicação de dados

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica (COMAER). Departamento de Aviação Civil (DAC). **MCA 58-15: manual do curso mecânico manutenção de aeronaves – aviônicos**. Brasília: DAC, 2004. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/habilitacao/manualCursos.asp>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

ISLA. **Exemplos de programas em Pascal**. 2016. Disponível em: <<https://algoritmia.wikispaces.com/7.9+Exemplos+de+programas+em+PASCAL>>. Acesso em: 5 dez. 2015.

TOOLEY, M. **Aircraft digital electronic and computer systems: principles, operations and maintenance**. – 1st ed. – UK: Elsevier, 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (UFES). **Fortran**. 2016a. Disponível em: <<http://www.inf.ufes.br/~thomas/fortran/primo.f>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

_____. **Programação**. 2016b. Disponível em: <<http://programacao1.wikidot.com/exemplos1>>. Acesso em: 24 fev. 2016.

WYATT, D.; TOOLEY, M. **Aircraft electrical and electronic systems: principles, maintenance and operation**. – 1st ed. – UK: Elsevier, 2009.

YOUNG, P. H. **Técnicas de comunicação eletrônica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

Unidade 5

Instrumentos

ABRAPIV. **Aula 01**: o que é o voo por instrumentos (IFR). 2016. Disponível em: <http://www.abrapiv.com.br/?page_id=1052>. Acesso em: 15 dez. 2015.

AIRCRAFT MAINTENANCE ENGINEERING – AVIONICS. **Electronic instrument system (EIS)**. 2011. Disponível em: <<http://avionicengineer.blogspot.com.br/2011/03/electronic-instrument-systems-eis.html>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

BOLLER, C.; BUDERATH, M. **Fatigue in aerostructures - where structural health monitoring can contribute to a complex subject**. 2007. Disponível em: <<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1851/561#ref-18>>. Acesso em: 12 dez. 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **RBHA 91**: regras gerais de operações para aeronaves civis. 2003. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/biblioteca/rbha/rbha091.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

_____. Instituto de Aviação Civil (IAC). Divisão de Instrução Profissional (DIP). **Generalidades sobre instrumentos**. In: **Mecânico de Manutenção Aeronáutica**: aviônicos I. Rio de Janeiro: IAC, 2002. pp. 1-11. Disponível em: <<http://aviacaomarte.com.br/avionico/>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

_____. Instituto de Aviação Civil (IAC). Divisão de Instrução Profissional (DIP). **Instrumentos de navegação**. In: **Mecânico de Manutenção Aeronáutica**: aviônicos I. Rio de Janeiro: IAC, 2002. pp. 1-27. Disponível em: <<http://aviacaomarte.com.br/avionico/>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

_____. Instituto de Aviação Civil (IAC). Divisão de Instrução Profissional (DIP). **Instrumentos de voo**. In: **Mecânico de Manutenção Aeronáutica**: aviônicos I. Rio de Janeiro: IAC, 2002. pp. 1-51. Disponível em: <<http://aviacaomarte.com.br/avionico/>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA (EUA). U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration (FAA). **FAA-H-8083-6**: advanced avionics handbook. Oklahoma City, OK: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2009. Disponível em: <https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/advanced_avionics_handbook/media/FAA-H-8083-6.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2015.

_____. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration (FAA). **FAA-H-8083-31**: aviation maintenance technician handbook – airframe. v. 2. Oklahoma City, OK: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2012. Disponível em: <https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/amt_airframe_vol2.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2015.

_____. National Transportation Safety Board (NTSB). **Safety recommendation A-08-053 through 55**. 2008. Disponível em: <http://www.nts.gov/_layouts/ntsb.recsearch/Recommendation.aspx?Rec=A-08-055>. Acesso em: 10 nov. 2015.

HANGAR 33. **Conheça as velocidades aeronáuticas**. 2014. Disponível em: <<http://blog.hangar33.com.br/conheca-as-velocidades-aeronauticas/>>. Acesso em: 28 out. 2015.

NAGABHUSHANA, S. **Aircraft instrumentation and systems**. – 1st ed. – New Delhi, India: I.K. International Publishing House Pvt. Ltd., 2010.

SKYBRARY. **Gyroscopic flight instruments**. 2016. Disponível em: <http://www.skybrary.aero/index.php/Gyroscopic_Flight_Instruments>. Acesso em: 16 nov. 2015.

TOOLEY, M. **Aircraft digital electronic and computer systems**. – 2nd ed. – London, UK: Routledge, 2013.

WYATT, D. F. **Aircraft flight instruments and guidance systems: principles, operations and maintenance**. – 1st ed – New York, US: Routledge, 2014.

Leituras complementares

AIRSPPEED INDICATOR SIMULATION. Sam. 2011. Youtube. 0m26s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=HM7ZMPpbeDA>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

AVIÕES DE CAÇA QUEBRANDO A BARREIRA DO SOM. Bruno Pinto. 2008. Youtube. 1m13s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=QJ8JSSrsUYo>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

CITHE: GIROSCOPO/GIROSCÓPIO. Centro instruccion técnica de aeronaves. 2014. Youtube. 5m08s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=VycrS3VYjeM>>. Acesso em: 16 mar. 2016.

CRJ 900/200 STALL PROTECTION TEST. M train999. 2012. Youtube. 0m47s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=QJ8JSSrsUYo>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

FÍSICA ANIMADA: PRINCÍPIO DE BERNOULLI (HIDRODINÂMICA). Marcos Coller. 2010. Youtube. 8m59s. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=_2zfdqz8F3E>. Acesso em: 16 mar. 2016.

HOW IT WORKS ALTIMETER. Shidifu111. 2014. Youtube. 2m03s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=OiVCX04YJMY>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

Gabarito

Unidade 1 - Eletrônica aplicada – aviônicos

Capítulo	Questão 1	Questão 2	Questão 3	Questão 4	Questão 5
1	A	C	D	B	C
2	D	A	B	B	D

Unidade 2 – Eletrônica I – semicondutores

Capítulo	Questão 1	Questão 2	Questão 3	Questão 4	Questão 5
1	A	B	B	C	B
2	B	B	D	C	D
3	A	B	A	B	C
4	D	D	D	C	C
5	A	B	C	B	C
6	C	D	B	C	C

Unidade 3 – Eletrônica II – técnicas digitais

Capítulo	Questão 1	Questão 2	Questão 3	Questão 4	Questão 5
1	C	B	A	D	B
2	D	C	C	A	D
3	D	B	D	C	B
4	A	D	B	A	A
5	B	C	B	D	B
6	B	D	A	B	D
7	C	A	D	B	D

Unidade 4 – Eletrônica III – comunicação de dados

Capítulo	Questão 1	Questão 2	Questão 3	Questão 4	Questão 5
1	B	C	B	D	C
2	D	C	C	A	D
3	D	B	D	C	B
4	D	C	C	D	A

Unidade 5 – Instrumentos

Capítulo	Questão 1	Questão 2	Questão 3	Questão 4	Questão 5
1	C	D	D	A	B
2	B	D	D	A	C
3	B	D	B	A	B
4	C	D	D	A	B
5	A	B	D	D	B
6	A	B	D	D	B
7	A	B	D	C	B
8	A	C	B	C	A
9	B	C	A	D	C
10	C	C	A	B	D
11	A	D	B	C	D

