

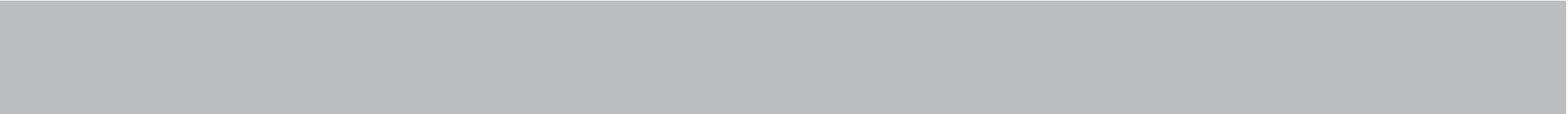
Coleção UAB–UFSCar

Tecnologia Sucroalcooleira

Eletricidade na Agroindústria II

**Alberto Moreira Jorge Júnior
Antonio Frederico Comin**

**Introdução à Instrumentação
Eletrônica e Controle de
Sistemas para Engenharia
Agroindustrial**



Introdução à Instrumentação Eletrônica e Controle de Sistemas para Engenharia Agroindustrial



**Reitor**

Targino de Araújo Filho

Vice-Reitor

Adilson J. A. de Oliveira

Pró-Reitora de Graduação

Claudia Raimundo Reyes

**Secretária Geral de Educação a Distância – SEaD**

Aline Maria de Medeiros Rodrigues Reali

Coordenação SEaD-UFSCar

Glauber Lúcio Alves Santiago

Marcia Rozenfeld G. de Oliveira

Sandra Abib

Coordenação UAB-UFSCar

Daniel Mill

Sandra Abib

**Coordenador do Curso de
Tecnologia Sucroalcooleira**

Gilberto Miller Devós Ganga

UAB-UFSCar

Universidade Federal de São Carlos

Rodovia Washington Luís, km 235

13565-905 – São Carlos, SP, Brasil

Telefax (16) 3351-8420

www.uab.ufscar.br

uab@ufscar.br



EdUFSCar

Conselho Editorial

Ana Claudia Lessinger

José Eduardo dos Santos

Marco Giulietti

Nivaldo Nale

Oswaldo Mário Serra Truzzi (Presidente)

Roseli Rodrigues de Mello

Rubismar Stolf

Sergio Pripas

Vanice Maria Oliveira Sargentini

EdUFSCar

Universidade Federal de São Carlos

Rodovia Washington Luís, km 235

13565-905 – São Carlos, SP, Brasil

Telefax (16) 3351-8137

www.editora.ufscar.br

edufscar@ufscar.br

Alberto Moreira Jorge Júnior
Antonio Frederico Comin

Introdução à Instrumentação Eletrônica e Controle de Sistemas para Engenharia Agroindustrial

São Carlos



EdUFSCar

2015

© 2015, Alberto Moreira Jorge Júnior e Antonio Frederico Comin

Supervisão

Douglas Henrique Perez Pino

Revisão Linguística

Clarissa Galvão Bengtson

Daniel William Ferreira de Camargo

Kamilla Vinha Carlos

Paula Sayuri Yanagiwara

Diagramação

Izís Cavalcanti

Juan Toro

Vagner Serikawa

Capa e Projeto Gráfico

Luís Gustavo Sousa Sguissardi

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária da UFSCar

J82i

Jorge Júnior, Alberto Moreira.

Introdução à instrumentação eletrônica e controle de sistemas para engenharia agroindustrial / Alberto Moreira Jorge Júnior, Antonio Frederico Comin. -- São Carlos : EdUFSCar, 2015.

154 p. – (Coleção UAB-UFSCar).

ISBN – 978-85-7600-407-3

1. Engenharia eletrônica. 2. Instrumentação. 3. Automação. 4. Sistema agroindustrial. I. Título.

CDD – 621.38 (20ª)

CDU – 621.38

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	11
---------------------------	----

UNIDADE 1: Circuitos e máquinas elétricas

1.1 Primeiras palavras	17
1.2 Problematizando o tema	17
1.3 Texto básico para estudo	17
1.3.1 Circuitos elétricos – Noções	18
1.3.1.1 Funcionamento do gerador	18
1.3.1.2 Corrente elétrica	18
1.3.1.3 Potência elétrica	20
1.3.2 Máquinas elétricas	21
1.3.2.1 Transformadores	21
1.3.2.1.1 Exercícios resolvidos	24
1.3.2.2 Motores elétricos	24
1.3.3 Perda de energia nos condutores	26
1.3.3.1 Exercícios resolvidos	28
1.3.4 Diagramas unifilares e multifilares	29
1.4 Considerações finais (resumo)	30
1.5 Atividades individuais	31
1.5.1 Exercícios propostos (transformadores)	31
1.5.2 Exercícios propostos (cálculo de condutores)	31
1.6 Estudos complementares	32

1.6.1 Saiba mais	32
1.6.2 Referências bibliográficas	33

UNIDADE 2: Circuitos eletrônicos

2.1 Primeiras palavras	37
2.2 Problematizando o tema	37
2.3 Texto básico para estudo	37
2.3.1 Circuitos eletrônicos – Noções	38
2.3.1.1 Retificadores e filtros	38
2.3.1.2 Multiplicadores de tensão e reguladores	45
2.3.1.3 Semicondutores de potência	48
2.3.1.4 Transístores	53
2.3.1.4.1 Exercícios resolvidos	56
2.3.1.4.2 Exercícios resolvidos	59
2.3.1.4.3 Transístores operando como chave	63
2.3.1.4.4 Exercícios resolvidos	65
2.3.1.5 Circuitos integrados	67
2.3.1.5.1 Circuitos reguladores de tensão	68
2.3.1.5.2 Circuitos osciladores/temporizadores	70
2.3.1.5.2.1 Exercícios resolvidos	71
2.3.1.5.3 Circuitos optoacopladores	72
2.3.1.5.4 Amplificadores operacionais	73
2.3.1.5.5 Amplificadores operacionais – Dicas	82
2.3.1.5.6 Circuitos digitais básicos	82
2.3.2 Álgebra de Boole – Conceitos	90
2.3.2.1 Postulados e teoremas booleanos	90
2.3.2.2 Simplificação lógica	92
2.3.2.3 Manipulações lógicas	94
2.3.2.3.1 Exercícios resolvidos	96
2.4 Considerações finais (resumo)	98
2.5 Atividades individuais	98

2.5.1	Exercícios propostos	98
2.6	Estudos complementares	100
2.6.1	Saiba mais	100
2.6.2	Referências bibliográficas	101

UNIDADE 3: Comandos elétricos

3.1	Primeiras palavras	105
3.2	Problematizando o tema	105
3.3	Texto básico para estudo	105
3.3.1	Dispositivos de comando, proteção e sinalização	105
3.3.1.1	Comando	105
3.3.1.2	Sinalização	110
3.3.1.3	Proteção	111
3.3.2	Sistemas simples de comandos	114
3.3.2.1	Comando de motor trifásico	115
3.3.3	Acionamento e proteção de motores	119
3.4	Considerações finais (resumo)	122
3.5	Atividades individuais	122
3.5.1	Exercício proposto	123
3.6	Estudos complementares	123
3.6.1	Saiba mais	123
3.6.2	Referências bibliográficas	123

UNIDADE 4: Automação e controle

4.1	Primeiras palavras	127
4.2	Problematizando o tema	127
4.3	Texto básico para estudo	127
4.3.1	Esquema conceitual de instrumentos de medição e controle	128
4.3.2	Caracterização de um sistema de medição	128
4.3.2.1	Análise de um sistema de medição	129
4.3.3	Instrumentação	129
4.3.4	Sensores de proximidade	134
4.3.5	Sistema de automação	139
4.3.5.1	Princípios e definições básicas	139
4.3.5.2	Diagramas e equações básicas do PID	140
4.3.5.2.1	Controle PID	141
4.3.5.2.2	Sintonia PID	142
4.3.5.3	Idade tecnológica	143
4.3.6	Inversores de frequência	143
4.3.6.1	Conversão de energia	144
4.3.6.2	Introdução ao controle de motores e eletrônica de potência	145
4.3.6.2.1	O transistor IGBT	145
4.3.7	Fonte de tensão inversora com PWM (“Pulse Width Modulation”)	147
4.4	Considerações finais (resumo)	150
4.5	Atividades individuais	151
4.5.1	Exercícios propostos	151
4.6	Estudos complementares	151

4.6.1 Saiba mais.....	151
4.6.2 Referências bibliográficas.....	152

APRESENTAÇÃO

Este livro é composto, basicamente, de tópicos que envolvem circuitos elétricos e eletrônicos (digitais e analógicos), comandos elétricos e dispositivos, sensores, automação e inversão de frequência, e controle de velocidade de motores. Todos esses itens serão abordados levando-se em consideração a sua interpretação e compreensão.

O texto está dividido em quatro unidades, que abrangem os vários aspectos já citados.

Unidade 1 – Circuitos e máquinas elétricas

Nesta unidade, serão revistos alguns conceitos de Física Geral e Eletricidade, como os de corrente, tensão e, principalmente, potência elétrica. Serão revisitados também os conceitos de motores e transformadores, além da noção básica para a instalação de equipamentos, projetando a fiação sem que haja queda de tensão e recapitulando o modo como é a leitura de desenho de circuitos em diagramas unifilares e multifilares.

Como você deve saber, os conceitos mencionados acima são de extrema importância. Eles enfatizam que a instalação elétrica é o primeiro passo para um projeto bem-sucedido e que a maioria das cargas industriais é composta de indutores (motores e transformadores) e de resistores (utilizados, sobretudo, em fornos).

Nesta unidade, então, vamos revisar os seguintes conceitos: funcionamento do gerador, corrente elétrica, potência elétrica, potência ativa, potência reativa, potência aparente e máquinas elétricas: transformadores e motores. Eles estão intimamente interligados, e você já deve tê-los visto em outras disciplinas. A razão de ser do tema é reaprender a calcular o cabeamento de alimentação e rever noções de transformadores nas aplicações práticas.

Unidade 2 – Circuitos eletrônicos

Nesta unidade, serão introduzidos os conceitos de dispositivos eletrônicos básicos (diodos, transistores bipolares, transistores de efeito de campo, semicondutores de potência e dispositivos ópticos; e circuitos integrados: reguladores de tensão, osciladores e amplificadores operacionais) e a álgebra de Boole. Dessa forma, o leitor terá condições de realizar pequenos projetos de controle e amplificação, além de conseguir entender os princípios de otimização de comandos elétricos a serem estudados na próxima unidade.

O mundo da eletrônica é vasto, mas, no seu dia a dia, o leitor está em contato constante com os conceitos a serem estudados na presente unidade. Por exemplo: a fonte que carrega a bateria de seu celular transforma corrente alternada em corrente contínua, para o funcionamento dos circuitos eletrônicos; o som de 2000 W de seu carro possui amplificadores que captam sinais muito pequenos de tensão e os amplificam, para que você possa ouvi-los; o sintetizador de seu teclado possui circuitos eletrônicos osciladores; o seu computador pessoal utiliza os conceitos de lógica da álgebra de Boole, para o seu funcionamento.

Nesta unidade, portanto, serão apresentados os principais conceitos da eletrônica básica, para que o leitor possa entendê-los e utilizá-los nas unidades seguintes, conseguindo realizar pequenos projetos eletrônicos e otimizar os circuitos de comandos elétricos que surgirão no dia a dia de trabalho. Além dos conceitos de eletrônica, é extremamente importante a familiarização com os conceitos de portas lógicas na forma de chaves, pois isso será relevante para a próxima unidade.

Unidade 3 – Comandos elétricos

Nesta unidade, vamos realizar uma introdução dos princípios de controle de motores elétricos por meio de comandos, utilizando contatores e relés. Também aprenderemos sinalização, proteção e ligação de motores, ou seja, fundamentos de acionamentos elétricos convencionais. Assim, você poderá utilizar, principalmente, os conceitos da álgebra de Boole e suas simplificações.

Você deve estar acostumado a ligar motores em sua casa, isto é, o simples fato de você apertar um botão ou mover uma chave leva o motor ao funcionamento. Entretanto, na indústria, tais motores são imensos, e os riscos para o usuário são grandes. Para o acionamento desse tipo de motores, é preciso um distanciamento do operador, de modo que o relé – que, pelo tamanho, é chamado de contator – o faça com segurança. Além disso, alarmes e proteção contra esse tipo de cargas são essenciais para a segurança do equipamento.

Aprenderemos, então, os principais conceitos que regem os comandos elétricos de acionamento de máquinas e motores com segurança para o operador e para o equipamento. Apresentaremos os fundamentos de acionamentos elétricos por meio do uso de relés, sinalização e proteção, além das formas de ligação de motores trifásicos.

Unidade 4 – Automação e controle

Na última unidade do livro, aprenderemos o básico de instrumentação, medição e controle, noções às quais devem ser aplicados os conceitos da Unidade 2, pois os sensores analisados aqui necessitam de amplificação para atuar ou ser lidos por um computador. Também caracterizaremos os sistemas de medição, analisaremos os sistemas de automação e, por fim, estudaremos os inversores de frequência e controle eletrônico de velocidade de motores elétricos.

Você já deve ter tido contato diário com alguns dos itens analisados. Por exemplo: um sistema detector de incêndio possui um sensor de temperatura/fumaça que liga a bomba de incêndio de forma automática; o seu carro, quando a luz de temperatura do motor acende, possui um transdutor que converte a temperatura em um sinal elétrico; o seu ferro de passar roupas, assim como a sua geladeira, possui um sistema simples de controle de temperatura. Como você pode observar, seu mundo é cheio de sensores, transdutores e controles, que atuarão no momento necessário, para que “as coisas” aconteçam automaticamente.

Logo, nesta unidade, vamos revisar os seguintes conceitos: esquema conceitual de instrumentos de medição e controle, caracterização de sistemas de medição, princípios de instrumentação, sensores de proximidade, sistemas de automação, inversores de frequência e fontes de tensão inversora com PWM. Tais conceitos estão intimamente interligados às unidades anteriores.

UNIDADE 1

Circuitos e máquinas elétricas

1.1 Primeiras palavras

Nesta unidade, vamos rever alguns conceitos já discutidos em outras disciplinas do curso de Tecnologia Sucroalcooleira, tais como Física Geral II e Eletricidade para a Agroindústria I. Entre eles, estão o de corrente, o de tensão e, principalmente, o de potência elétrica. Também serão recapituladas as noções de motores e transformadores, além do conceito básico de eletricidade, para que você possa instalar seus equipamentos projetando a fiação sem que haja queda de tensão e revendo o modo como é a leitura de desenho de circuitos em diagramas unifilares e multifilares.

1.2 Problematizando o tema

Como você deve saber, os conceitos mencionados anteriormente são de extrema importância. Os professores devem ter enfatizado que a instalação elétrica é o primeiro passo para um projeto bem-sucedido e que a maioria das cargas industriais é composta de indutores (motores e transformadores) e de resistores (utilizados, sobretudo, em fornos). Neste momento, você já deve estar lembrando como calcular o cabo para ligar seus equipamentos, ou como desenhar ou interpretar um diagrama proposto. Caso contrário, não se preocupe! Nós lembraremos juntos pelo menos a parte mais importante desses conceitos.

1.3 Texto básico para estudo

Neste tópico, vamos revisar os seguintes conceitos: funcionamento do gerador, corrente elétrica, potência elétrica, potência ativa, potência reativa, potência aparente e máquinas elétricas: transformadores e motores. Esses conceitos estão intimamente interligados, e você já deve tê-los visto em outras disciplinas. A razão de ser desse tema é reaprender a calcular o cabeamento de alimentação e rever noções de transformadores nas aplicações práticas.

1.3.1 Circuitos elétricos – Noções

O circuito elétrico mais simples é composto de um gerador (ou fonte), de um receptor (ou carga do circuito) e de condutores que os interligam.

1.3.1.1 Funcionamento do gerador

Um gerador elétrico muito simples, de corrente alternada, é formado de uma espira plana que se move sob a ação de um campo magnético uniforme. Tal espira gira em torno de um eixo perpendicular à direção das linhas de fluxo do campo magnético aplicado. A variação do valor do fluxo que atravessa a espira móvel induz nela uma força eletromotriz (fem).

Assim, a força eletromotriz resulta do movimento relativo que há entre a espira e o campo magnético. Um dos terminais fica, então, eletricamente energizado em relação ao outro terminal.

A força eletromotriz é medida em volt (V) e é chamada de *tensão* ou *voltagem* – simbolizada por E (para os geradores) e U ou V (para os circuitos). A tensão é também denominada *diferença de potencial elétrico* (ddp).

Se um circuito elétrico externo interliga os terminais do gerador, a energia das cargas elétricas dos terminais do gerador se propaga pelas cargas elétricas desse circuito, que, energizadas, põem-se em movimento através dele.

1.3.1.2 Corrente elétrica

Como você já aprendeu, quando as cargas elétricas se movem, elas transferem ao circuito receptor a energia que receberam no gerador. No circuito, essa energia é transformada em outra forma de energia.

O movimento de cargas é a corrente elétrica (quantidade de cargas que passam por segundo, *coulombs* por segundo) – simbolizada por I e medida em amperes (A).

Quanto maior for a quantidade de energia necessária para pôr em movimento as cargas elétricas do circuito, maior será a resistência elétrica de tal circuito.

A movimentação das cargas será, portanto, menor quanto maior for a dificuldade ou resistência (R) imposta pelo circuito à passagem das cargas.

Para conseguir a movimentação das cargas, é necessária uma diferença de potencial de valor tanto maior quanto maior for a movimentação desejada e também quanto maior for a resistência do circuito:

$$U = R \cdot I$$

Tal equação é denominada Lei de Ohm.

A razão entre tensão e corrente tem como unidade o *ohm* (Ω).

A energia elétrica associada a um resistor, que dissipa potência ativa em watts (W), pode ser calculada por:

$$E = V \cdot I \cdot t$$

Em que E é energia em W · h; V, tensão em volts; I, corrente em amperes; e t, tempo em segundos.

Componentes do circuito

Nos circuitos elétricos, como se vê diariamente, você tem a possibilidade de inserir vários tipos de equipamento, assim como na indústria. No entanto, a cada tipo de equipamento estão associados apenas três tipos de componente: resistores, capacitores e indutores. Como exemplo, podemos citar:

- motores: são indutores que têm um pequeno componente resistivo;
- fornos elétricos: são resistores que têm um pequeno componente indutivo;
- fornos de micro-ondas: têm um grande componente capacitivo e indutivo.

A cada um desses componentes está associada uma forma de resistir à passagem de corrente elétrica, ou seja:

- resistor: a resistência elétrica, que é dada em ohm (Ω) e, idealmente, não defasa a corrente da tensão, gera calor, que é transformado em trabalho (fornos) ou perda (fiação, aquecimento em motores etc.). Seu símbolo é R;
- capacitor: tem associada a ele uma reatância capacitiva, resistindo à passagem da corrente elétrica por meio de um campo elétrico. O capacitor adianta a corrente com relação à tensão, idealmente não gera trabalho ou calor e só armazena potência em forma de campo elétrico. A reatância capacitiva tem o símbolo X_c e é dada em ohm (Ω);

- indutor: tem associada a ele uma reatância indutiva, resistindo à passagem da corrente elétrica por meio de um campo magnético. O indutor atrasa a corrente com relação à tensão, idealmente não gera trabalho ou calor e só armazena potência em forma de campo magnético. A reatância indutiva tem o símbolo X_L e é dada em ohm (Ω).

A impedância é a soma vetorial de todos os resistores e reatâncias do circuito, tem o símbolo Z e é dada em ohm (Ω).

1.3.1.3 Potência elétrica

Para o intuito deste tópico, nos interessa apenas a potência ativa. A conversão da energia elétrica por unidade de tempo é denominada potência ativa.

A potência ativa (P) é medida em watts (W) e pode ser calculada pelo produto da tensão (V), pela corrente (I) e pelo fator de potência do circuito (FP):

$$P = V \cdot I \cdot FP$$

Cada componente do circuito tem a função de converter a energia elétrica em um determinado tipo de energia. Por exemplo:

Motor elétrico → mecânica, lâmpada → luminosa, bateria em recarga → química, resistores → térmica.

As cargas perdem energia para transpor a resistência do circuito. Essa energia é convertida em energia térmica, que produz aquecimento por efeito Joule.

O efeito Joule é útil nos resistores de aquecimento, mas muito inconveniente em todos os outros dispositivos.

A energia convertida por efeito Joule pode ser calculada por:

$$E = Ri^2t$$

Potência ativa, reativa e aparente

Como você deve se lembrar, existem, no circuito, três tipos de potência:

- potência ativa: associada aos resistores, é responsável pelo aquecimento, gerando trabalho (fornos) ou perda por aquecimento (na fiação, nos enrolamentos de motores e transformadores etc.) e, idealmente, não

provocando defasagem entre a corrente e a tensão. Essa potência é dada em watts (W);

- potência reativa: associada aos (i) indutores (reativo-indutiva): idealmente, não gera calor ou trabalho, apenas armazenando energia em forma de campo magnético, é dada em VAR (Volt-Ampere Reativo); (ii) capacitores (reativo-capacitiva): idealmente, não gera calor ou trabalho, só armazenando energia em forma de campo elétrico, é dada em VAR (Volt-Ampere Reativo);
- potência aparente: fornecida pela fonte ao circuito, a soma vetorial das outras potências, é dada em VA (Volt-Ampere).

1.3.2 Máquinas elétricas

1.3.2.1 Transformadores

Um transformador é uma máquina elétrica que, ligada a uma fonte de tensão alternada, produz uma tensão também alternada de valor igual ou diferente.

Constituição

O transformador, também conhecido como trafo, é formado de dois ou mais conjuntos de enrolamentos ou bobinas montados no mesmo núcleo.

Os indutores do transformador, normalmente, são ligas de cobre ou de alumínio, e o núcleo pode ser feito de diversos materiais, dependendo do fim a que se destina tal transformador. Os materiais mais comuns usados no núcleo são o ar, o ferro laminado e o ferrite.

Símbolos:

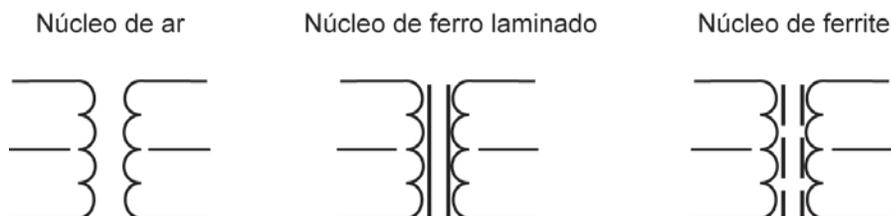


Figura 1

Os transformadores têm seu funcionamento na indução eletromagnética: uma tensão alternada aplicada a um dos enrolamentos gerará, por meio da corrente, um campo magnético também alternado; esse campo será induzido

nos outros enrolamentos (chamados de enrolamentos secundários, em que se apresenta a tensão induzida) por uma tensão tanto maior quanto maior for seu número de espiras. Como a corrente do enrolamento a que se aplica a tensão (chamado de enrolamento primário) é inversamente proporcional ao número de espiras deste (o número de espiras influi na indutância, e esta, na reatância), temos que, quanto menos espiras houver no enrolamento primário (a que se aplica a tensão), maior será a tensão de saída do transformador. A fórmula simplificada que relaciona as tensões e o número de espiras em um transformador é dada a seguir:

$$V_s = V_p N_s / N_p$$

A relação entre as correntes e o número de espiras é vista a seguir:

$$I_s N_s = I_p N_p$$

Em que p é primário; s, secundário; V, tensão; I, corrente; e N, número de espiras.

Perdas no transformador

O cálculo de um transformador não é tão simples como o apresentado anteriormente. Nele, devem ser consideradas as perdas descritas a seguir, mas ele é uma boa aproximação da prática de campo.

Os transformadores de linha de transmissão e mesmo aqueles utilizados na distribuição de energia elétrica apresentam grande eficiência, sendo quase máquinas perfeitas, com rendimento aproximado de 98%. As perdas no transformador decorrem, principalmente, da histerese, das correntes parasitas e das perdas no cobre:

1. *Perdas no cobre*: resultam da resistência dos fios de cobre nas espiras primárias e secundárias. As perdas pela resistência do cobre são perdas sob a forma de calor e podem ser minimizadas com diferentes tipos de liga ou com o aumento do diâmetro dos fios dos enrolamentos.
2. *Perdas por histerese*: a energia é transformada em calor na reversão da polaridade magnética do núcleo transformador.
3. *Perdas por correntes parasitas*: quando uma massa de metal condutor se desloca num campo magnético ou é sujeita a um fluxo magnético móvel, circulam por ela correntes induzidas, que produzem calor em virtude das perdas na resistência do ferro.

Os transformadores são usados como:

- transformadores de tensão (por exemplo, de 220 V para 110 V, como você conhece);
- transformadores de corrente (chamados de TCs e usados na medição de grandes valores de corrente);
- acopladores de impedância;
- isoladores galvânicos.

Identificação dos transformadores

1. *Pelo tamanho*: quanto maior o valor de corrente disponível no secundário (lado da tensão transformada), maior é o diâmetro do fio condutor com que se faz esse enrolamento. Para conseguir maior corrente no secundário, é necessário um valor maior de corrente no primário (tensão aplicada), o que, por sua vez, exige um condutor mais grosso também nesse enrolamento. Dessa forma, transformadores para altas correntes ocupam espaço proporcionalmente maior.

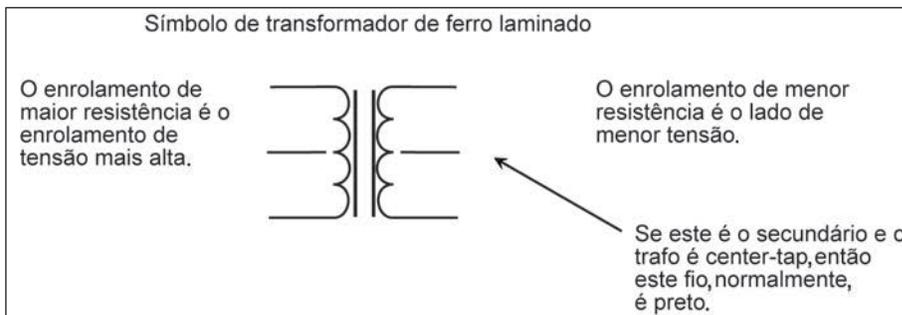


Figura 2

2. *Pelas cores dos fios*: os transformadores com tomada central no secundário (center-tap) têm, no secundário, duas cores: uma em um fio (o fio da tomada central, em inglês *center-tap*) e a outra nos dois outros fios.
3. *Pelas medidas de resistência*: no enrolamento de alta-tensão, encontram-se três terminais, um de cada cor, sendo a preta comum à ligação de 127 V e 220 V.

Visualmente, identificam-se dois grupos de fios, um de cada lado do transformador: um é o primário e o outro, o secundário.

1.3.2.1.1 Exercícios resolvidos

Aplicada uma tensão de 60 Vca a um enrolamento de 4000 espiras de um transformador de dois enrolamentos, sendo o outro de 8000 espiras, calcular a tensão induzida.

Resposta: $V_s = 60 \cdot 8000/4000 = 120 \text{ Vca}$.

Considerando-se que o secundário do trafo da questão anterior alimenta uma carga de $Z = 50 \Omega$, calcular a corrente de secundário e a de primário.

Resposta: a corrente de secundário será $I = V_{sec}/Z = 120/50 = 2,4 \text{ A}$ e a de primário será $I_p = I_s \cdot N_s/N_p = 2,4 \cdot 8000/4000 = 4,8 \text{ A}$.

1.3.2.2 Motores elétricos

Para o intuito deste tópico, os motores elétricos convertem energia elétrica em mecânica ou, mais especificamente, em torque ou conjugado. Os motores funcionam pela atração ou repulsão dos polos magnéticos produzidos pelos eletroímãs dos quais são formados.

Podem ser classificados, conforme sua alimentação, em motores de corrente contínua e motores de corrente alternada:

1. Motores de corrente contínua

São fabricados em modelos com e sem escovas:

- 1.1 Os motores de corrente contínua sem escovas podem ser simples, de dois terminais, ou mais complexos, de vários terminais, denominados *motores de passos*. Os motores CC sem escovas simples são muito utilizados – por exemplo, em ventiladores de computadores –, por serem extremamente silenciosos e duráveis. Os motores de passos podem ter seu eixo posicionado em passos ou frações da volta, de acordo com sua alimentação, que, aliás, é especial e proveniente de circuitos eletrônicos que possibilitam não só o posicionamento do eixo mas também o controle do sentido e da velocidade de giro. Nos tipos usados nos ventiladores dos computadores, a alimentação externa é por dois terminais, mas, internamente, ela é distribuída a vários terminais;

- 1.2 Os motores elétricos de corrente contínua com escovas apresentam tipos de grandes potências e facilidade de mudança em sua velocidade de giro, além de poder girar nos dois sentidos, bastando, para isso, que se inverta a polaridade de sua alimentação.

2. Motores de corrente alternada

- 2.1 Os motores de corrente alternada se classificam segundo o sincronismo do rotor com relação ao campo do estator e segundo o número de fases que os alimentam;

- 2.2 Quanto ao sincronismo, podem ser *síncronos* e *assíncronos*.

Motores síncronos: têm essa denominação, porque seu rotor gira em velocidade igual à do campo girante, em que a velocidade de seu eixo é constante e determinada pela frequência da rede de alimentação e pela sua constituição, independentemente da carga. Esses motores podem ser usados como geradores de energia elétrica desde que um outro motor lhe gire o eixo.

Motores assíncronos: têm essa denominação, porque seu rotor, também chamado de induzido, não acompanha a rotação do campo girante do estator, ficando com velocidade menor que a do campo (por volta de 5% abaixo) – diferença de velocidade conhecida como *escorregamento*. Apresentam baixo torque de partida. A velocidade de rotação dos motores assíncronos é determinada pela frequência de alimentação (aumentando-se a frequência, aumenta-se a velocidade), pela sua constituição e pela carga (por causa do escorregamento, aumentando-se a carga, a rotação diminui).

Tais motores são classificados em de rotor bobinado e de rotor em curto-circuito ou gaiola de esquilo. Apresentam a vantagem de ser de construção bem mais simples que a dos síncronos, por isso são mais baratos. Os motores com rotor bobinado apresentam anéis coletores, nos quais se faz, com escovas, a conexão do rotor com um reostato, que controla o torque do motor – coisa útil para diminuir sua corrente de partida. Esse motor exige manutenção para a limpeza e, eventualmente, troca das escovas e anéis.

Os motores de rotor em curto-circuito, que são os mais comuns, não têm anéis ou escovas, e isso é uma grande vantagem, pois exigem baixa manutenção. No entanto, esses motores não têm controle próprio de torque, o que requer formas externas de controlar sua corrente de partida quando eles são de grandes potências (acima de 5 cv).

A velocidade de rotação do campo é

$$V = \frac{120f}{p}$$

Em que V é velocidade em rotações por minuto (rpm); f , frequência da alimentação em hertz; e p , número de polos do motor.

2.3 Quanto ao número de fases, o motor pode ser monofásico ou trifásico:

O motor chamado de monofásico é alimentado por meio de dois condutores, obedecida a sua tensão nominal. Os motores monofásicos de maiores potências exigem a utilização de capacitor e/ou dispositivo interno de partida chamado de chave centrífuga de partida.

Os motores trifásicos devem ser ligados, obrigatoriamente, a três fases e, portanto, por meio de três condutores. Não necessitam de capacitor nem de chave centrífuga de partida, o que reduz a frequência de manutenção. Os motores trifásicos podem ter o seu sentido de rotação invertido, bastando, para isso, que se troquem entre si duas das três fases que os alimentam.

3. Motores universais

São os utilizados em máquinas de pequeno porte que necessitam de grande torque de partida, como é o caso das máquinas portáteis de furar, máquinas de costurar, batedeiras, liquidificadores, enceradeiras e lixadeiras.

São motores de escovas, por isso exigem manutenção para a troca delas.

1.3.3 Perda de energia nos condutores

Nos condutores, é totalmente indesejável que haja o efeito Joule, que se reflete em seu aquecimento e em diminuição da tensão disponível para o circuito. Para reduzir ao máximo a perda de energia, a resistência dos condutores deve ser a menor possível, o que significa que a área de secção transversal tem de ser a maior possível.

A área de secção transversal mínima é calculada em função de dois parâmetros: capacidade de corrente e queda de tensão admissível.

A área escolhida para o condutor deverá ser tanto maior quanto maior for a corrente e a distância entre a fonte e o circuito.

A escolha da área do condutor é denominada *dimensionamento do condutor*.

Dimensionamento de condutores

O dimensionamento do condutor que servirá a uma instalação deve, em primeiro lugar, levar em consideração a corrente a ser conduzida e, em segundo, a queda de tensão admissível no circuito.



Figura 3

Os fabricantes de condutores fornecem tabelas com os condutores fabricados, que são identificados pelas suas áreas e capacidades correspondentes em amperes (*ampacidade*):

- pela capacidade de corrente, basta procurar na tabela que área suporta a corrente da carga.

A tabela a seguir mostra a capacidade de corrente de fios Prysmian de cobre isolados com PVC quando instalados em combinações de dois ou três condutores e à temperatura de 50 °C. Outras condições determinam outros valores de capacidade, devendo ser procuradas nas tabelas dos fabricantes:

Tabela 1

Capacidade de corrente (A)		
Secção nominal mm ²	Dois condutores carregados	Três condutores carregados
1,0	13,5	12
1,5	17,5	15,5
2,5	24	21
4	32	28
6	41	36
10	57	50
16	76	68
25	101	89
35	125	111
50	151	134
70	192	171
95	232	207
120	269	239
150	309	272
185	353	310
240	415	364

- pela queda de tensão, pode-se usar a fórmula a seguir, que fornece a área em função da queda de tensão, corrente e distância com fórmulas distintas, para o sistema monofásico ou CC e para o trifásico.

Para o sistema monofásico ou CC:

$$S = \frac{2 \cdot I \cdot L}{56 \cdot u}$$

Em que S é bitola em mm²; I, corrente em amperes; u, queda de tensão absoluta em volts; e L, distância da fonte em metros.

Para o sistema trifásico:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L}{56 \cdot u}$$

Deverá ser escolhida a maior entre as bitolas conseguidas por cada método (ampacidade e queda de tensão).

1.3.3.1 Exercícios resolvidos

1. Deseja-se alimentar um circuito de iluminação (monofásico) de 7 kW (potência elétrica), tensão de 440 V e fator de potência 0,8 que se encontra a 200 metros do gerador. Qual deve ser o condutor para essa função? Considere uma queda admissível de 3%.

Resposta: a corrente no sistema monofásico é calculada por:

$$I = \frac{P}{V \cdot \eta \cdot \cos \varphi}$$

Em que I é corrente em amperes; P, potência em watts; V, tensão em volts; η , rendimento; e $\cos \varphi$, fator de potência.

Considerando-se o rendimento $\eta = 1$, tem-se:

$$I = \frac{7000}{440 \cdot 0,8} = 19,89A$$

- pelo critério da capacidade de corrente, usando a tabela, o condutor deve ser o de 2,5 mm²;
- pelo critério da queda de tensão, tem-se:

$$S = \frac{2 \cdot 19,89 \cdot 200}{56 \cdot 400 \cdot 0,03} = 10,76 \text{ mm}^2$$

O condutor deve ser, então, o de **16 mm²**. Aceitando-se uma queda de tensão um pouco maior, poderia ser usado, nesse caso, o condutor de 10 mm², que está muito próximo do valor calculado.

2. Necessita-se escolher o condutor para alimentar um motor trifásico de 25 cv, 380 V, rendimento de 84% e fator de potência 0,85 que dista 100 metros do gerador. Admite-se uma queda de 4%.

Resposta: a corrente de um motor trifásico pode ser calculada pela mesma fórmula usada no Exemplo 1 desde que se transforme a potência de cv em watts (multiplicando-se o valor em cv por 736) e se multiplique a tensão por $\sqrt{3}$.

Outra opção é usar a fórmula já modificada, dada a seguir, com a potência em cv, na qual já se encontra o fator $\sqrt{3}$ para a tensão no denominador.

$$I = \frac{736 \cdot P_n}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \eta \cdot \cos \varphi}$$

Em que P_n é potência em cv.

Substituindo os valores, tem-se:

$$I = \frac{736 \cdot 25}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,84 \cdot 0,85} = 39,20 \text{ A}$$

- pelo critério da capacidade de corrente, usando a tabela, o fio deve ser o de 10 mm²;
- pela queda de tensão:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 39,20 \cdot 100}{56 \cdot 380 \cdot 0,04} = 7,97 \text{ mm}^2$$

O condutor escolhido deve ser, então, o de **10 mm²**.

1.3.4 Diagramas unifilares e multifilares

Os diagramas elétricos podem ser feitos de acordo com o modelo unifilar ou multifilar, conforme seu objetivo.

O diagrama unifilar tem por objetivo mostrar as interligações entre equipamentos sem grandes detalhes quanto aos pontos de conexão existentes neles.

No exemplo a seguir, no gerador, há apenas uma linha quando, na verdade, há pelo menos cinco.

No transformador, há duas linhas quando, na verdade, há oito.

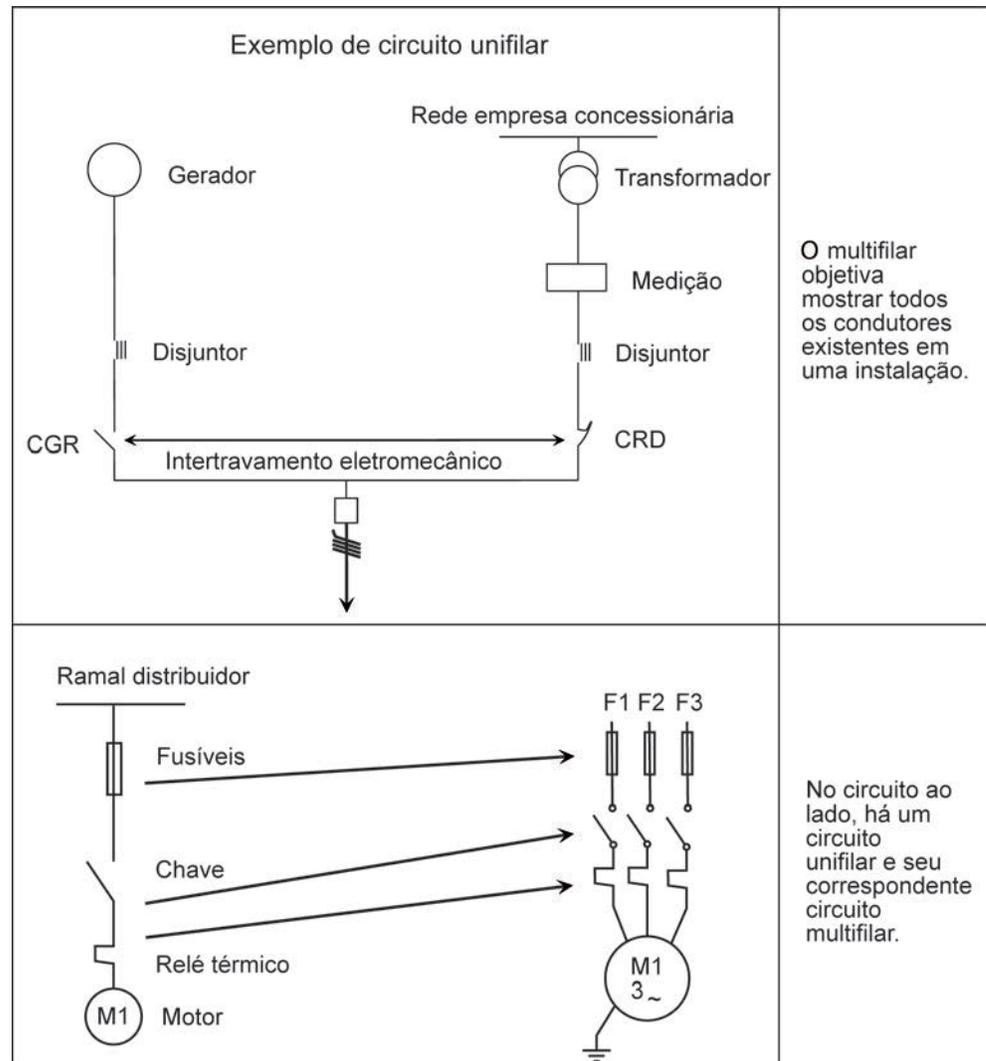


Figura 4

1.4 Considerações finais (resumo)

Como você pôde ver, trabalhamos com alguns assuntos já abordados em outras disciplinas do curso. É muito importante que você tenha aprendido a calcular a fiação, pôr em prática os conceitos de transformadores e de motores e ler diagramas mono e multifilares.

1.5 Atividades individuais

Estas atividades devem ser realizadas individualmente e têm como objetivo fixar os conhecimentos adquiridos com este texto.

1.5.1 Exercícios propostos (transformadores)

1. Com $N_p = 5000$ espiras e uma tensão alternada de 50 V, calcule o número de espiras necessárias para produzir 250 V. Resposta: 25000 espiras.
2. Calcule a tensão que deve ser aplicada ao enrolamento de 36000 espiras de um transformador, para que este induza, em um seu enrolamento de 4500 espiras, uma tensão de 220 V. Resposta: $V_p = 1760$ V.
3. Quando o secundário do transformador da questão anterior for conectado a uma carga cuja resistência é de 20Ω , qual será o valor da corrente dele? E quanto ao primário do transformador? Resposta: $I_s = 11$ A; $I_p = 1,4$ A.
4. Calcule a tensão que deve ser aplicada ao enrolamento de 9000 espiras de um transformador, para que este induza, em um seu enrolamento de 45000 espiras, uma tensão de 220 V. Resposta: $V_p = 44$ V.
5. Quando o secundário do transformador da questão anterior for conectado a uma carga cuja resistência é de 40Ω , qual será o valor da corrente dele? E quanto ao primário do transformador? Resposta: $I_s = 5,5$ A; $I_p = 27,5$ A.

1.5.2 Exercícios propostos (cálculo de condutores)

1. Um motor trifásico é instalado a 90 metros do gerador; admite-se uma queda de 3% nos condutores de sua instalação.
Na placa do motor, encontram-se $P_n = 30$ cv; $V_n = 220/380$; $\eta = 0,9$; $\cos\phi = 0,85$.
Dimensione os condutores. Resposta: # 35 mm².
2. Na placa de um motor trifásico, encontram-se $P_n = 40$ cv; $V_n = 440/760$; $\eta = 0,9$; $\cos\phi = 0,85$.
Dimensione os condutores para a instalação do motor a 120 metros do gerador, admitida uma queda de tensão de 4%. Resposta: # 16 mm².

1.6 Estudos complementares

Caso você tenha tempo e deseje aprender um pouco mais, eis algumas sugestões.

1.6.1 Saiba mais

Lembre-se: você não é um especialista em instalações. Você está adquirindo conhecimentos para poder pelo menos discutir o assunto. Antes de qualquer procedimento, estude bastante e, se necessário, solicite o auxílio de um especialista na área.

- Dicas de instalações elétricas residenciais da Prysmian, que traz uma revisão dos tópicos *instalações*, *cabos*, *potência* etc. Faça o download do manual em:

<http://br.prysmiangroup.com/br/files/manual_prysmian.pdf>

- Dicas de instalações elétricas residenciais da Prysmian. Faça o download do manual em:

<<http://br.prysmiangroup.com/br/files/dicas01.pdf>>

- Dicas de instalações elétricas prediais e industriais da Prysmian. Faça o download do manual em:

<<http://br.prysmiangroup.com/br/files/dicas02.pdf>>

- Cálculo de transformadores em:

<<http://en.wikipedia.org/wiki/Transformer>> (O site em português foi retirado do ar, pois houve suspeita de violação de direitos autorais; o site do Geocities não está completo.)

- Geradores e motores em:

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Gerador>>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_elétrico>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_de_corrente_alternada>

Pesquise também nos links relacionados.

1.6.2 Referências bibliográficas

ARNOLD, R. *Fundamentos de eletrotécnica*. São Paulo: Pedagógica Universitária, 1975.

ARNOLD, R.; STEHR, W. *Máquinas elétricas*. São Paulo: Pedagógica Universitária, 1975.

CLOSE, C. M. *Circuitos lineares*. São Paulo: Edusp; LTC, 1975. v. 1-2.

COTRIM, A. A. M. B. *Instalações elétricas*. São Paulo: McGraw-Hill, 1992.

DAWES, C. L. *Curso de eletrotécnica: corrente alternada*. Porto Alegre: Globo, 1981. v. 2.

MARTIGNONI, A. *Transformadores*. Porto Alegre: Globo, 1973.

NEWMAN, D. G. *Circuits analysis*. São José: Engineering Press Inc., 1986.

SCHILLING, D. L.; BELOVE, C.; CASABO, J. C. *Circuitos eletrônicos discretos e integrados*. Barcelona: Marcombo, 1973.

UNIDADE 2

Circuitos eletrônicos

2.1 Primeiras palavras

Nesta unidade, vamos realizar a introdução aos dispositivos eletrônicos básicos (diodos, transístores bipolares, transístores de efeito de campo, semicondutores de potência e dispositivos ópticos; e circuitos integrados: reguladores de tensão, osciladores e amplificadores operacionais) e à álgebra de Boole. Dessa forma, você terá condições de realizar pequenos projetos de controle e amplificação além de conseguir entender os princípios de otimização de comandos elétricos a serem estudados na próxima unidade.

2.2 Problematizando o tema

O mundo da eletrônica é vasto. Por isso mesmo, você, no seu dia a dia, deve ter contato constante com conceitos que serão estudados aqui, nesta unidade. Vejamos alguns exemplos: a fonte que carrega a bateria de seu celular transforma corrente alternada em corrente contínua, para o funcionamento dos circuitos eletrônicos; o som de 2000 W de seu carro possui amplificadores que captam sinais muito pequenos de tensão e os amplificam, para que você possa ouvi-los; o sintetizador de seu teclado possui circuitos eletrônicos osciladores; o seu computador pessoal utiliza os conceitos de lógica da álgebra de Boole, para o seu funcionamento. Como você pode observar, são coisas de seu dia a dia que talvez você não saiba como funcionam, mas, juntos, nós tentaremos entendê-las.

2.3 Texto básico para estudo

Neste tópico, vamos aprender os principais conceitos da eletrônica básica, para que você possa entender os conceitos a serem utilizados nas unidades seguintes, realizando pequenos projetos eletrônicos e otimizando os circuitos de comandos elétricos que surgirão no seu dia a dia de trabalho. Além dos conceitos de eletrônica, é extremamente importante que você se familiarize com os conceitos de portas lógicas na forma de chaves, pois eles lhe serão úteis na próxima unidade.

2.3.1 Circuitos eletrônicos – Noções

2.3.1.1 Retificadores e filtros

Diodo

O diodo é um dispositivo formado de dois cristais semicondutores de silício (ou germânio), cada um deles dopado com elementos com excesso de elétrons (portadores negativos) ou falta de elétrons [excesso de vacâncias (portadores positivos)]. Quando um semicondutor é dopado com elementos com excesso de elétrons, ele recebe a denominação Tipo N (Negativo); já quando é dopado com excesso de vacâncias, Tipo P (Positivo).

Quando os dois cristais são unidos (na verdade, eles já são fabricados unidos e dopados independentemente, por meio de máscaras), forma-se uma junção, chamada de PN, constituindo um diodo, com um “gap” de energia bastante elevada (de 0,6 a 1,0 eV para o Si e de 0,2 a 0,4 eV para o Ge). Esse “gap” é formado em decorrência da difusão de cargas positivas e negativas em torno da interface composta da junção PN, conforme apresentado na figura a seguir:

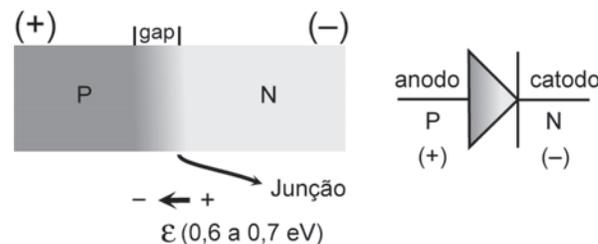


Figura 5

O diodo pode ser polarizado diretamente, isto é, quando o semicondutor P é polarizado positivamente e o semicondutor N é polarizado negativamente (em que há condução) ou, ao contrário, quando o diodo é polarizado reversamente (em que não há condução), de acordo com a figura a seguir:

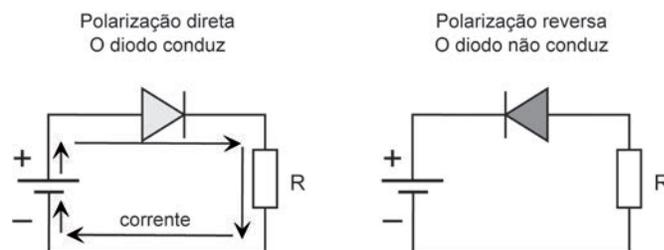


Figura 6

Quando o diodo é polarizado diretamente, o “gap” diminui, apresentando, assim, uma baixa resistência de condução, segundo a figura a seguir:

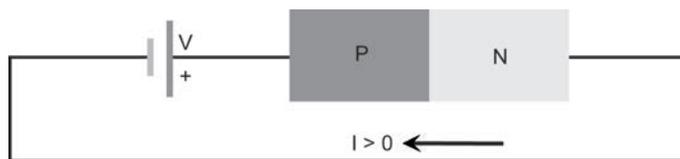


Figura 7

Quando o diodo é polarizado reversamente, esse “gap” aumenta, com o crescimento da tensão, e acaba apresentando uma altíssima resistência à condução. Nesse caso, diz-se que o diodo não conduz, conforme a figura a seguir:

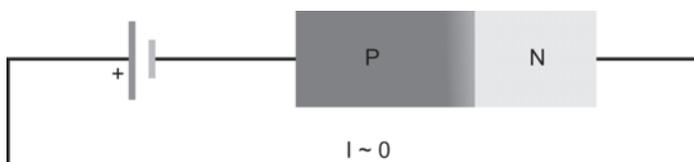


Figura 8

Na figura a seguir, vê-se o símbolo de um diodo, em que a seta aponta sempre para o lado negativo (ou o lado menos positivo em relação ao lado P):

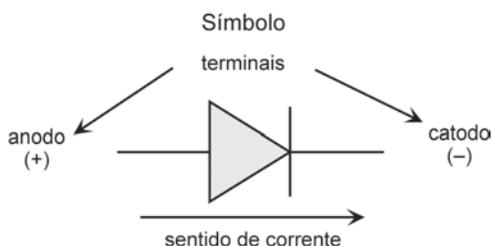


Figura 9

As características apresentadas anteriormente fazem que, em muitas situações, o diodo possa ser considerado como uma chave liga-desliga. Quando o diodo conduz, essa chave está ligada (*fechada*); quando o diodo está cortado (não conduzindo), está desligada (*aberta*). Tais aspectos valem quando se tem o diodo como um componente ideal. No diodo real, isso não ocorre, isto é, sempre haverá uma queda de tensão na condução e sempre haverá uma corrente reversa de não condução, ainda que pequenas.

No gráfico $V \times I$ de um diodo real, a seguir, observa-se que a corrente direta (I_f), do lado esquerdo, relaciona-se com a tensão direta (V_f), que cresce de forma não linear com a corrente, pois, para um aumento muito grande da corrente,

tem-se um pequeno aumento da tensão nos terminais do diodo (variando de 0,5 a 1,5 V para o Si):

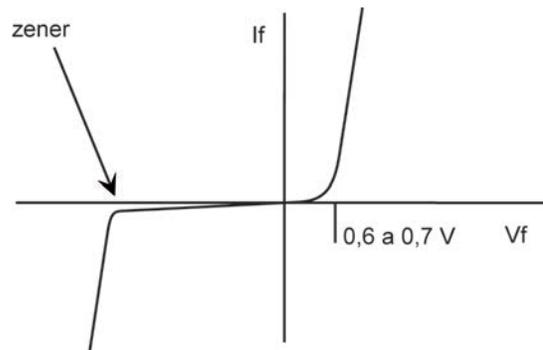


Figura 10

Como em qualquer outro componente, no diodo também precisam ser respeitados os limites de corrente e tensão, que não devem ser ultrapassados em virtude do risco de danos provocados pelo aquecimento gerado pelo efeito Joule. Dentre os parâmetros principais, destacam-se:

- I_f – corrente direta máxima que o diodo pode conduzir;
- V_r – tensão reversa máxima que o diodo pode suportar sem conduzir (VKA);
- V_f a I_f – queda de tensão (V_f) quando o diodo está conduzindo determinado valor de corrente (I_f).

Quando está reversamente polarizado, o diodo conduz uma corrente muito pequena, menor que 0,01 μA , mas que pode dobrar a cada aumento de temperatura de 10 $^{\circ}\text{C}$. O diodo pode receber uma tensão reversa até um valor que não ultrapasse o de tensão de ruptura, também chamado tensão Zener. Nessa condição, o diodo volta a conduzir por um efeito denominado avalanche, danificando-se.

Na figura a seguir, apresentamos alguns diodos retificadores, em que a marca representa o lado N:

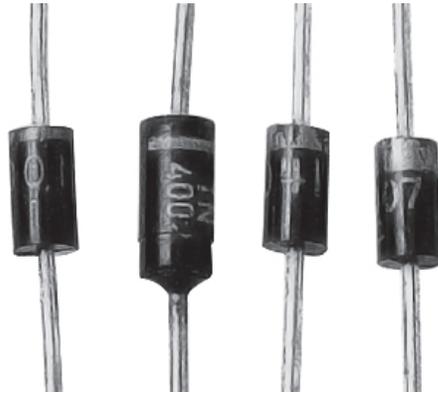


Figura 11

Aplicações típicas

Em virtude das características descritas anteriormente, ou seja, chaveamento e queda de tensão praticamente nula e fixa, o diodo pode ser utilizado em inúmeras aplicações.

Retificações

Os circuitos eletrônicos necessitam, para o seu perfeito funcionamento, de uma tensão de alimentação contínua (CC ou DC). A tensão disponibilizada pela concessionária de energia elétrica é alternada (AC ou CA). Dessa forma, é necessário converter a tensão AC em tensão DC. Os circuitos que fazem tal conversão são chamados de retificadores, os quais, juntamente com os filtros e reguladores de tensão, permitem que uma tensão alternada seja convertida em tensão contínua. Nesses circuitos, os diodos são ligados em série à carga, de modo que esta só receberá alimentação caso aqueles estejam diretamente polarizados. A ligação em série provoca uma pequena queda de tensão no diodo (de 0,6 a 0,7 V para o Si e de 0,2 a 0,4 V para o GE).

Retificação de meia onda

No circuito a seguir, no semiciclo positivo, o diodo está polarizado diretamente e, numa primeira aproximação, comporta-se como uma chave fechada. Assim, toda a tensão da fonte está aplicada na carga.

No semiciclo negativo, o diodo estará polarizado reversamente, portanto o diodo está cortado, comportando-se como uma chave aberta. Dessa maneira, quando alimentado por tensão alternada, esse circuito só permite que a carga seja alimentada na metade da onda em que a polaridade é direta. Por isso, chama-se *retificador de meia onda*:

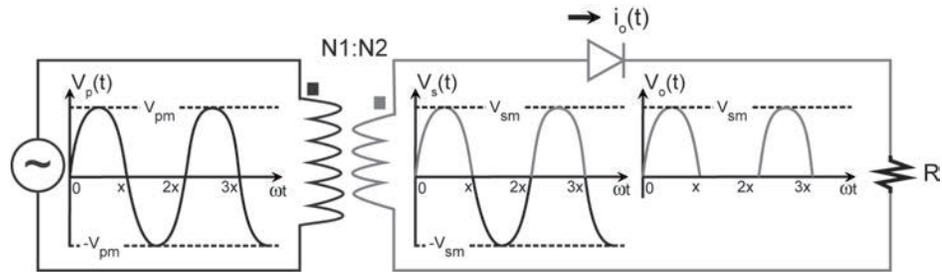


Figura 12

Como podemos observar, o diodo só conduz quando a tensão de entrada é positiva [semiciclo positivo (azul)], pois, nessas condições, o diodo está polarizado diretamente. No caso prático, interessa-nos saber o valor médio da onda de saída (valor-DC ou valor medido por um voltímetro para DC). Se o valor de pico da senoide de entrada for V_M , o valor médio da tensão na carga (R) será dado por:

$$V_{DC} = \frac{V_{pico}}{\pi}$$

A tensão média (V_{DC}) é a tensão medida por um voltímetro em escala DC.

Para essa mesma forma de onda, o seu valor eficaz (RMS – tensão medida por um voltímetro em escala AC) é dado por:

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{2}$$

Retificação de onda completa

Os circuitos retificadores de onda completa são mais eficientes que os de meia onda, pois usam o semiciclo negativo da tensão da rede. Existem dois tipos de retificador de onda completa: retificador com derivação central (center-tap), que utiliza transformadores e apenas dois diodos, e retificador em ponte, que utiliza quatro diodos.

Retificação de onda completa com transformador de derivação central

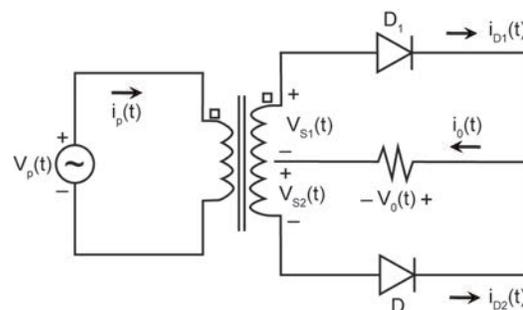


Figura 13

Nessa forma de retificação, a carga é alimentada alternadamente por cada um dos diodos, pois, devido à derivação central, eles receberão metade da onda total de saída, com defasagem de 180°. Em outras palavras, quando tivermos um semiciclo positivo em D_1 , teremos um semiciclo negativo em D_2 , e somente D_1 conduzirá (e vice-versa). As formas de onda de entrada e saída estão apresentadas na figura a seguir:

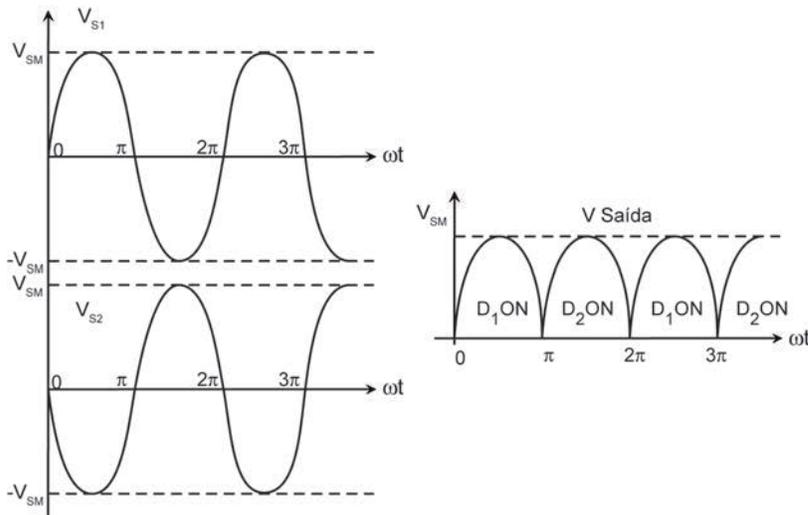


Figura 14

Nesse caso, o circuito usa apenas metade da tensão disponível no secundário do transformador além de ficar restrito à obrigatoriedade do uso de um transformador com derivação central (center-tap).

Se a entrada do retificador for alimentada por uma tensão senoidal ($V_e = V_p \cdot \text{sen } \omega t$), então a tensão média na carga será dada por:

$$V_{DC} = \frac{2 \cdot V_M}{\pi}$$

Retificação de onda completa com ponte de diodos

Esse circuito não exige transformador com tomada central, necessitando, porém, de quatro diodos, como o circuito a seguir apresenta:

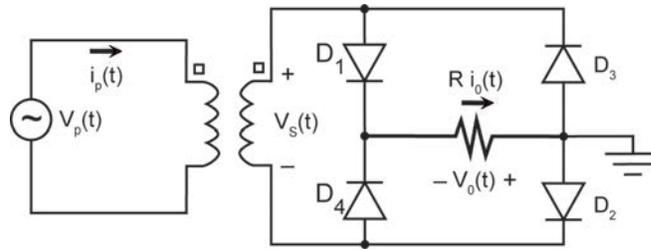


Figura 15

O retificador de onda completa com ponte de diodos tem o seguinte princípio de funcionamento, conforme será apresentado na próxima figura.

No semiciclo positivo da tensão de entrada (linha cheia), V_p , os diodos D_1 e D_2 conduzem enquanto os diodos D_3 e D_4 estão polarizados reversamente. É importante ressaltar que existem dois diodos no caminho da corrente, portanto há uma queda de tensão na saída (em R) que será da ordem de 1,4 V. Dessa forma, para tensões de entrada abaixo de 1,4 V, não há tensão na carga.

No semiciclo negativo (linha pontilhada), D_3 e D_4 conduzem enquanto D_1 e D_2 estão cortados. Observe que a corrente na carga sempre tem o mesmo sentido (setas cheias e pontilhadas):

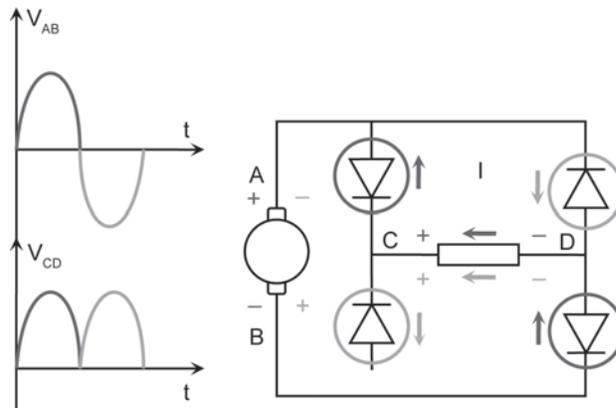


Figura 16

A frequência da tensão de saída é o dobro da de entrada, e a corrente média por cada diodo é a metade da corrente da carga.

Filtros

Como você pode observar, após a retificação existe uma ondulação na tensão de saída dos retificadores que é extremamente indesejável na maioria das aplicações. Assim, utilizam-se filtros para transformar essa ondulação em tensão DC constante ou praticamente constante.

Os filtros podem ser passivos ou ativos. Os filtros ativos, normalmente, são construídos com o uso de circuitos integrados reguladores de tensão. Os filtros passivos são construídos com indutores em série com a carga (muito pouco utilizados) ou capacitores em paralelo com a carga (extremamente utilizados), segundo a figura adiante. O cálculo da capacitância necessária depende da corrente solicitada pela carga, frequência da tensão de saída e flutuação (“ripple”) aceitável após o filtro, que se dá por:

$$C = I / (f \cdot V_{\text{ripple}})$$

Nos filtros passivos, por maior que seja a capacitância, sempre haverá um valor de ondulação. O ripple é um parâmetro que indica a qualidade de uma fonte DC: quanto menor o ripple, melhor a fonte. O ripple, que é expresso em porcentagem do valor médio, pode ser calculado da seguinte forma:

$$\text{Ripple} = V_{\text{ripple}} \cdot 100\% / V_{\text{cc}}$$

Por exemplo: uma fonte com tensão nominal de 15 V tem uma variação 0,1 V, assim:

$$\text{Ripple} = 0,1/15 = 0,00667 \text{ ou } 0,667\%.$$

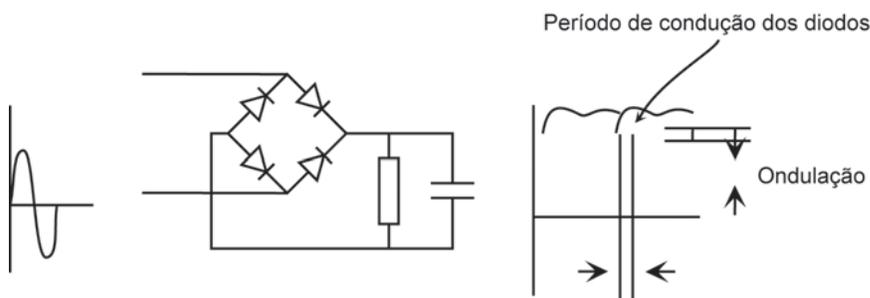


Figura 17

2.3.1.2 Multiplicadores de tensão e reguladores

Multiplicador de tensão

São circuitos usados para obter grandes valores de tensões DC. No circuito da figura a seguir, quando a tensão está no semiciclo negativo, o primeiro capacitor (C1) se carregará com o valor de pico da tensão de entrada (V_{pp}) com a polaridade indicada na figura. Nessa condição, D1 conduz, e D2 estará cortado. No próximo semiciclo positivo, D1 estará cortado, e D2 conduz. C2 se carregará com, aproximadamente, $2 V_p$.

Dobrador de tensão

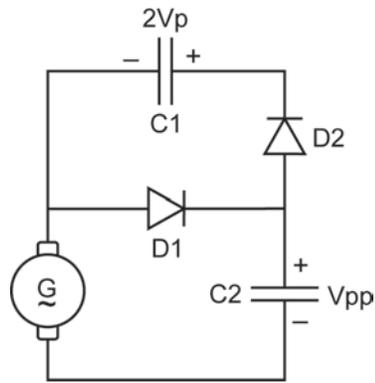


Figura 18

Diodo Zener

Diodos Zener são diodos projetados para operar na região de ruptura (ou tensão Zener). Nessa região, grandes variações de corrente produzem pequenas variações de tensão, permitindo a construção de um regulador de tensão. A próxima figura mostrará o símbolo de um diodo Zener e a curva característica indicando a região de operação.

O diodo Zener é fabricado, especificamente, para trabalhar com polarização reversa, ou seja, o anodo aqui recebe tensão negativa em relação ao catodo, com tensões de ruptura de 2,2 a algumas poucas dezenas de volts:

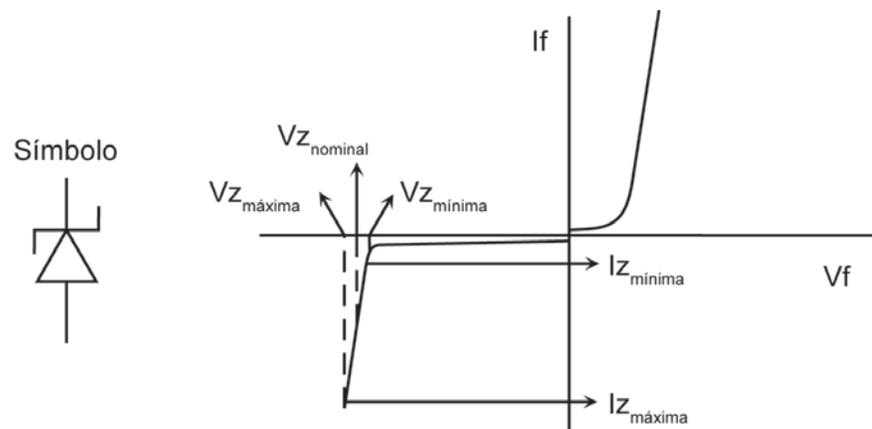


Figura 19

A estabilização de tensão, realizada pelo Zener, dá-se pela corrente que ele conduz e que também atravessa um resistor de polarização posto em série com o Zener (ver figura a seguir), colocando-o dentro da faixa de operação da figura anterior.

O valor do resistor de polarização, RZ, é dado pela equação:

$$R_z = \frac{V_e - V_z}{I_z + I_s}$$

Em que V_e é tensão de entrada; V_z , tensão de saída = tensão do Zener; I_z , corrente do Zener; e I_s , corrente da carga ou de saída.

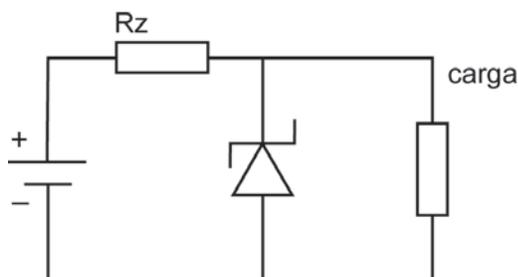


Figura 20

A corrente do Zener, I_z , deve ser calculada em função de sua potência máxima e, por segurança, ser dividida por dois.

Note que a corrente da carga já causa uma queda de tensão em RZ, porém o valor de RZ é tal que essa queda é menor que a desejada, sendo complementada apenas pela corrente do Zener.

Conforme a curva característica da figura anterior, observe que, caso a corrente de carga diminua, a tensão a ela aplicada tenderá a subir e, com isso, a corrente do Zener aumentará. Caso a corrente da carga venha a aumentar, sua tensão tenderá a cair, mas a corrente do Zener diminuirá. Desse modo, a corrente em RZ será sempre a necessária para que a carga (em paralelo com o Zener) fique com sua tensão estabilizada.

O diodo Zener usado como proteção

Quando um circuito é alimentado por uma fonte, o diodo pode ser usado como proteção contra surtos (possíveis aumentos do valor de tensão). Nesse caso, diferentemente da aplicação anterior, o diodo Zener deve ter um valor maior que a tensão da fonte, pois só deverá entrar em condução caso a tensão da fonte tenha seu valor aumentado. Nesse tipo de circuito, um fusível é posto em série com o diodo, e, se a tensão aumentar, o diodo entrará em condução e queimará o fusível, que, por sua vez, desligará a fonte do circuito protegido.

Também nessa forma de ligação, o diodo Zener protege o circuito contra inversões de polaridade da tensão aplicada.

Diodo emissor de luz

O diodo emissor de luz, mais conhecido por LED (“Light Emitting Diode”), é usado, especificamente, como indicador luminoso, não podendo ser empregado como retificador, já que sua corrente direta máxima é muito baixa (entre 1 e 15 mA) e sua máxima tensão reversa, muito baixa (5 v).

Símbolo



Figura 21

Quando a tensão de alimentação do LED excede a máxima permissível, ele deve ser alimentado com um resistor em série, para limitar a corrente do circuito – resistor que pode ser calculado da seguinte forma:

$$R = (V_t - V_{LED}) / I_{LED}$$

A potência do resistor pode ser calculada como:

$$P = (V_t - V_{LED}) I_{LED}$$

Verificação com ohmímetro

Para verificar o estado de um diodo ou identificar seus terminais, basta ligá-lo aos terminais de um ohmímetro. Se houver continuidade em apenas uma das polarizações, o diodo estará em bom estado.

O terminal anodo estará ligado ao terminal positivo quando estiver com indicação de continuidade.

2.3.1.3 Semicondutores de potência

Tiristores

Os tiristores são componentes de chaveamento, que é a forma de comando cuja parte comandada é totalmente energizada ou desligada, isto é, os tiristores funcionam em regime de liga-desliga.

A situação de corte ou condução é determinada por condições diversas, de acordo com o tipo do tiristor. Existem vários tipos de tiristor: diodo de quatro camadas, SCS, GTO, SCR, Diac e Triac. Apresentaremos, no entanto, apenas os mais comuns: o SCR, o Triac e o Diac.

SCR

O nome SCR provém do inglês “Silicon Controlled Rectifier”, que pode ser traduzido como *retificador (diodo) controlado de silício*. Embora o SCR, cujo símbolo está apresentado na figura a seguir, possua um comportamento similar ao do diodo comum, ele precisa de um sinal elétrico para ser disparado:

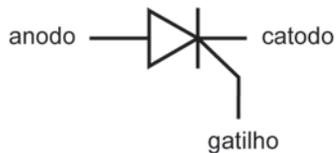


Figura 22

O SCR tem três terminais: o anodo, o catodo (como no diodo) e o “Gate”, que é o terminal que deve receber o sinal de disparo. O SCR é constituído de quatro camadas de material semicondutor PNPN (silício), originando três junções PN, conforme a figura a seguir:

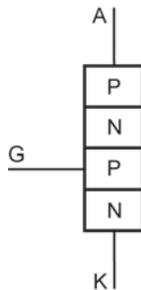


Figura 23

O *circuito equivalente* de um SCR corresponde a dois transístores complementares, em que o coletor de um está ligado à base do outro e o coletor do outro, à base do primeiro. Uma das bases corresponde ao terminal de disparo, “Gate” ou porta:

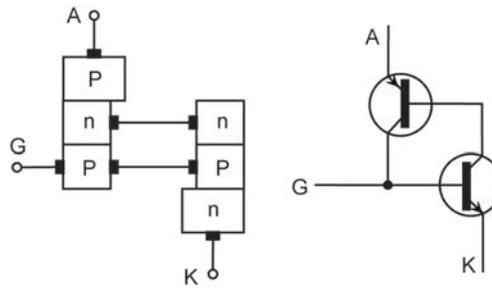


Figura 24

O sinal de disparo é um pulso (ou trem de pulsos) de tensão positiva em relação ao catodo.

Depois de disparado, o SCR começa a conduzir e continua conduzindo até que a corrente conduzida se aproxime de zero, a tensão direta caia a 0 (zero) V ou haja uma inversão de polaridade.

O valor de corrente abaixo do qual o SCR passa da condução ao corte chama-se *corrente de manutenção* e é fornecido pelo fabricante nas tabelas de dados do componente.

A figura a seguir apresenta o aspecto exterior de alguns SCRs:

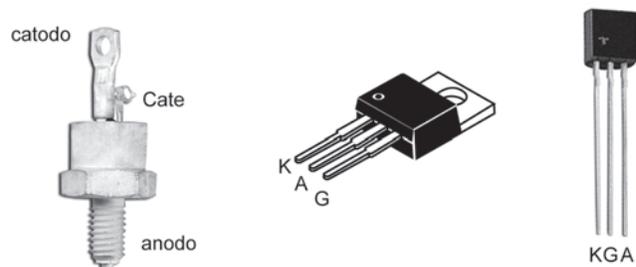


Figura 25

No exemplo a seguir, um circuito DC, a chave “start”, ao ser acionada, dá o sinal de disparo, que faz que o SCR entre em condução, acendendo a lâmpada, a qual permanecerá acesa até que a chave “stop” seja temporariamente acionada, desligando o circuito:

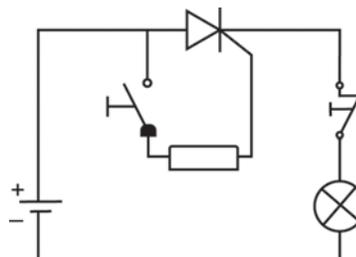


Figura 26

Os SCRs são mais utilizados em circuitos de corrente alternada (figura a seguir), pois, diferentemente do diodo comum, o SCR retifica a tensão alternada de maneira controlada, conduzindo corrente por períodos maiores ou menores de acordo com o circuito de disparo, que, por sua vez, é projetado para impor determinadas condições à carga:

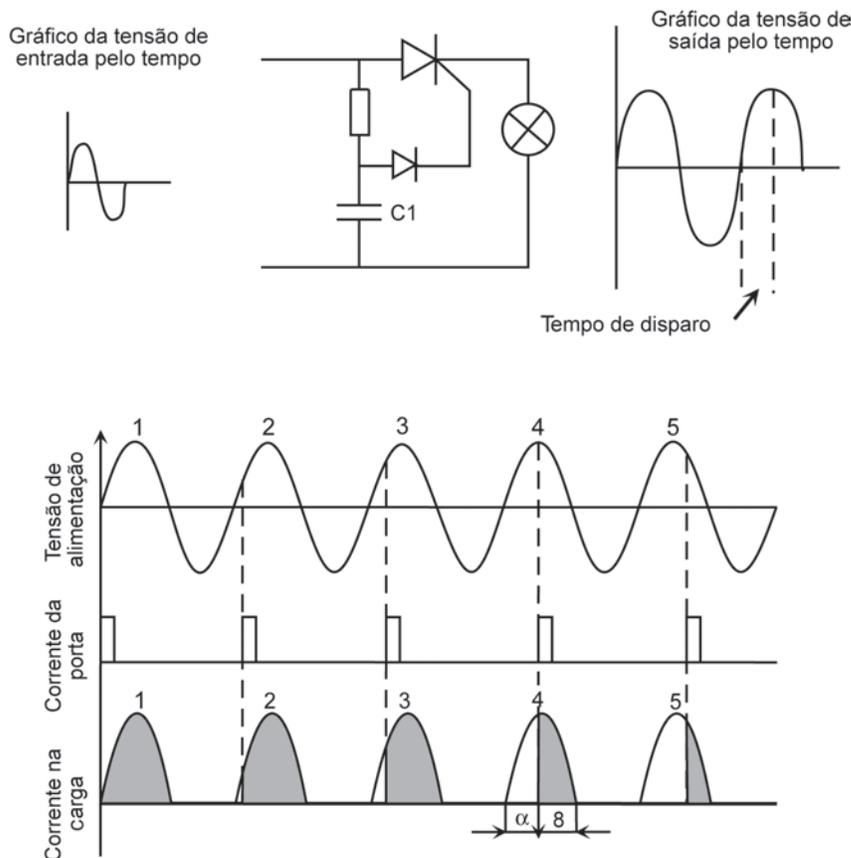


Figura 27

Nos semiciclos que polarizam o SCR reversamente, a carga não recebe tensão alguma; quando o SCR é polarizado diretamente, a carga só é energizada a partir do instante em que o capacitor C1 atinge a tensão de disparo do SCR, continuando energizada até que o semiciclo positivo termine.

O diodo colocado entre o circuito RC e o “Gate” do SCR tem a função de permitir que este seja disparado somente depois de o capacitor acumular a carga necessária e garantir o seu disparo. Na ausência do diodo, pode haver corrente de “Gate” a partir de qualquer valor de tensão no capacitor – embora tal corrente nem sempre seja suficiente para disparar o SCR.

Da mesma forma que o diodo comum, o SCR pode fazer parte de retificadores controlados de onda completa, utilizando-se os princípios já discutidos e acrescentando-se os circuitos de disparo.

Triac

O Triac, apresentado na figura a seguir, é um componente similar ao SCR, mas que conduz nos dois sentidos, o que o torna mais completo para utilização em corrente alternada.

O circuito da figura anterior, se fosse projetado com um Triac, conduziria nos dois sentidos e alimentaria a carga com tensão eficaz controlável de 0% a 100% do valor eficaz da fonte:

Símbolo

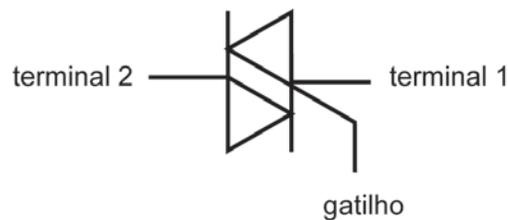


Figura 28

Como o SCR, o Triac possui três terminais, que se chamam "Gate", terminal principal 1 (MT1 ou A1) e terminal principal 2 (MT2 ou A2). No Triac, a tensão de disparo não tem polaridade definida, e o disparo se faz desde que haja corrente no circuito *gatilho-terminal 2*, não importando seu sentido.

Diac

O Diac também é um tiristor bidirecional, usado praticamente apenas em circuitos de acionamento (ver figura a seguir) de Triacs e SCRs, e funciona como um Triac, mas sem o "Gate". O disparo é feito pelo valor de tensão presente em seus terminais e o retorno ao estado de corte se dá nas mesmas condições dos tiristores já mencionados:

Símbolo

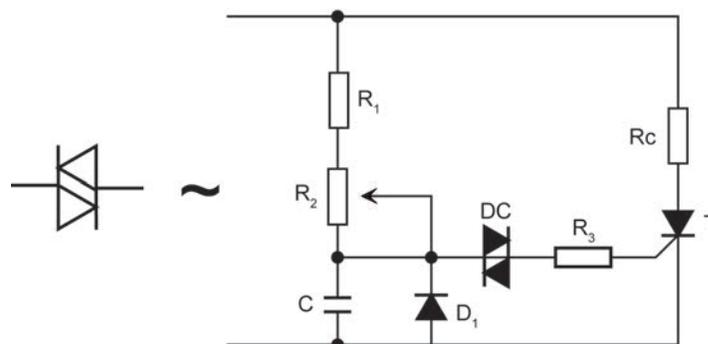


Figura 29

Como no caso dos diodos, os tiristores têm parâmetros de tensão e corrente máximas que, sob risco de danificarem o componente em alguns casos, devem ser respeitados.

No caso dos tiristores, os valores são:

- corrente máxima direta (I_f);
- tensão máxima em estado de corte (V_r);
- corrente mínima de disparo;
- tensão de disparo, tensão direta (V_f);
- corrente de manutenção: valor de corrente abaixo do qual o tiristor volta ao estado de corte.

2.3.1.4 Transístores

Tipos

Existem vários tipos de transístor, mas os principais são: bipolar, unijunção e unipolar ou de efeito de campo (Fet).

O transístor bipolar

O transístor bipolar, apresentado na figura a seguir, é um componente que amplifica sinais de corrente. Nele, a corrente que flui pelo terminal de controle (normalmente, a base) controla a corrente principal (normalmente, o coletor):

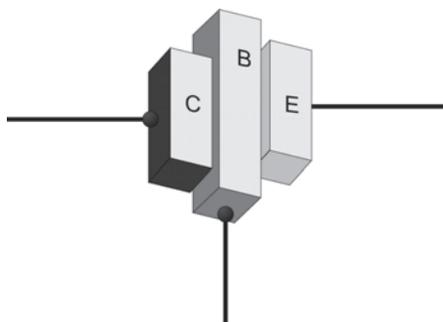


Figura 30

Estrutura

O transístor bipolar é, internamente, formado de duas junções “PN” ou “NP” (uma entre a base e o coletor e outra entre a base e o emissor), que são dispostas das formas apresentadas em breve, na seção Polarização, recebendo, conforme a dopagem, a denominação “PNP” ou “NPN”.

O cristal central é chamado de “base” e é o menos dopado e mais fino. É ele que controla a corrente.

Em uma das extremidades, temos o “emissor”, que possui maior dopagem que a base e espessura média. É ele que injeta ou emite cargas para o cristal-base.

Na outra extremidade, temos o “coletor”, que também possui maior dopagem que a base e maior espessura. É ele que coleta as cargas injetadas no cristal-base.

Polarização

Para que o transistor funcione adequadamente, ele deve ser polarizado (ligações com as fontes e sinais) de modo correto, segundo a sua função no circuito. Normalmente, o circuito de polarização é formado de fontes e resistores, que vão limitar as correntes e impor as tensões adequadas ao funcionamento do transistor.

Para que o transistor funcione adequadamente (ver figura a seguir), é necessário que a junção base-emissor esteja polarizada diretamente (se a base for P e o emissor, N, isto é, positivo na base e negativo no emissor; se for base N e emissor P, é o contrário) e a junção base-coletor seja polarizada reversamente (se a base for P e o coletor, N, isto é, positivo no coletor e negativo na base; se for base N e coletor P, é o contrário).

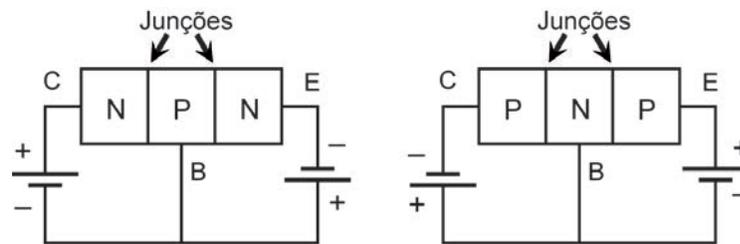


Figura 31

Símbolos do transistor bipolar

Os símbolos utilizados para representar as configurações descritas anteriormente (PNP ou NPN) podem ser observados na figura a seguir.

Para simplificar, a seta que sempre está no emissor aponta para o potencial mais negativo, para que o transistor possa funcionar. Dessa maneira, o transistor NPN terá a seta do emissor apontando para fora e o transistor PNP, para dentro:

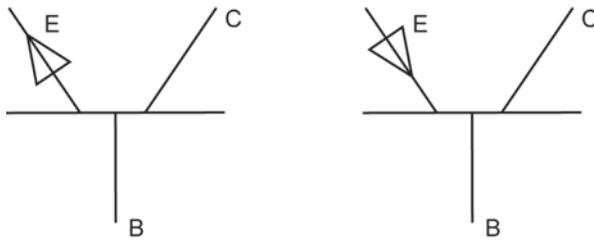


Figura 32

Efeito transistor

Do mesmo modo, no diodo, se polarizarmos qualquer junção do transistor diretamente com uma tensão acima de 0,7 V (anodo positivo em relação ao catodo), esta apresentará um valor muito baixo de resistência, e, se polarizarmos reversamente (anodo negativo em relação ao catodo), a resistência será muito alta (quase como um circuito aberto).

O efeito transistor aparecerá se a junção base-emissor for polarizada diretamente e a junção base-coletor, reversamente. Em outras palavras, a baixa resistência da junção base-emissor será transferida para a junção base-coletor; assim, a alta corrente que fluiria pelos terminais base e emissor será transferida para os terminais coletor e emissor, que recebem a denominação *resistor de transferência* (“transfer resistor”). Como o coletor estará em um potencial mais alto, o efeito transistor se dará pela atração da quase totalidade das cargas que penetram a região de base (pouco espessa) pelo coletor.

Correntes no transistor

Existem três correntes presentes no transistor: corrente de base, corrente de coletor e corrente de emissor.

A corrente de base, I_b , de menor intensidade, é tipicamente menor que 10% da maior corrente existente.

A corrente de coletor, I_c , de média intensidade, é controlada pela corrente de base.

A corrente de emissor, I_e , é a de maior intensidade, pois as outras duas correntes (de base e de coletor) convergem para o emissor:

$$I_e = I_b + I_c$$

Amplificação

A corrente de coletor é proporcional à de base, ou seja, ela é controlada pela corrente de base. Como comentado anteriormente, a corrente de base é muito menor que a de coletor, cerca de 10% de I_c (a maior). Dessa forma, ocorre uma amplificação.

A relação entre as correntes de base e de coletor é chamada *beta* (β):

$$\beta = I_c / I_b$$

Em que I_c é corrente de coletor; e I_b , corrente de base.

A corrente de coletor nem sempre será exatamente o produto de $\beta \cdot I_b$ e nunca será maior que este. O valor da corrente de coletor será

- determinado pela tensão da fonte e resistência da carga; ou
- determinado pelo β e corrente de base.

I_c sempre será, entre os dois valores anteriores, o menor.

Quando o valor for imposto pela carga (primeira condição), se dirá que o transistor está saturado.

Quando o valor for imposto por β , menor que o limitado pela carga (segunda condição), se dirá que o transistor está ativo.

Caso o valor limitado pelo transistor seja 0 (zero) (corrente de base igual a zero), então se dirá que o transistor está cortado.

2.3.1.4.1 Exercício resolvido

1. Caso um transistor com corrente de base de 2 mA e $\beta = 100$ tenha seu coletor ligado a uma fonte de 40 V em série com uma resistência de 100 Ω , qual será a corrente do coletor?

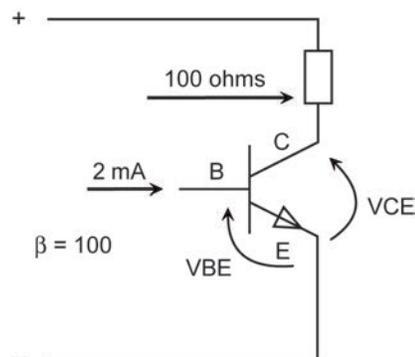


Figura 33

Resposta: a corrente de coletor será a menor entre dois valores.

$$I_c = \beta \cdot I_B = 100 \cdot 0,002 = 0,2 \text{ A}; I_c = V_{\text{FONTE}}/R_{\text{CARGA}} = 40/100 = 0,4 \text{ A}$$

Nesse caso, a corrente do coletor será 0,04 A, que é o menor dos valores, e o transistor estará saturado.

Tensões no transistor

Para que haja correntes no transistor, são necessárias tensões entre os terminais em que estas fluem:

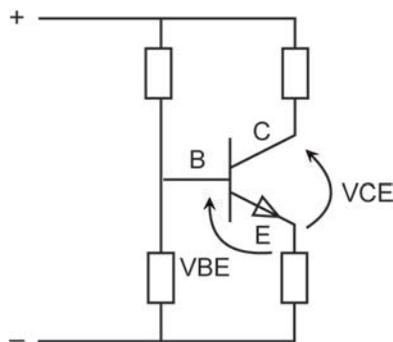


Figura 34

VBE – Tensão entre base e emissor, com um valor de, aproximadamente, 0,7 V (exatamente como um diodo), responsável pela corrente de base.

VCE – Tensão entre coletor e emissor, para que haja a corrente de coletor. A VCE diminui com a corrente de coletor, pois, como há um resistor no coletor, existe, nesse mesmo resistor, uma queda de tensão que é proporcional à corrente ($R \cdot I$), decrescendo a tensão entre coletor e emissor.

Observação: a VCE será máxima quando o transistor cortado não estiver conduzindo ($R \cdot I = 0$), média quando ele estiver ativo e, aproximadamente, 0 (zero) quando estiver saturado ($R \cdot I = \text{máximo}$).

Parâmetros do transistor

Assim como qualquer componente, o transistor possui limites para o seu funcionamento e segurança:

- máxima corrente de coletor ($I_{c\text{máx}}$): é a maior corrente de coletor, que não deve ser ultrapassada para que o transistor não se danifique pela dissipação de potência (geração de calor). Quanto maior a I_c , menor o ganho do transistor. A corrente de coletor deve ainda ser levada em consideração, já que o ganho do transistor diminui à medida que o valor

dessa corrente aumenta. Assim, para valores maiores de I_c , temos uma menor razão I_c/I_s (I_s = corrente de carga ou de saída);

- máxima tensão direta entre coletor e emissor ($V_{CEm\acute{a}x}$): quando V_{CE} é extrapolado, coletor e emissor passam a atuar como um diodo, vencendo as tensões das junções C-B e B-E e gerando uma corrente mesmo sem sinal na base. Tal corrente aquece o transistor por efeito Joule, danificando-o;
- máxima potência dissipável ($P_{m\acute{a}x}$): deve ser menor que $V_{CEm\acute{a}x} \cdot I_{CEm\acute{a}x}$. Se esse valor for ultrapassado, também haverá aquecimento por efeito Joule, danificando o transistor.

Verificação com ohmímetro

Lembrando que, no transistor, temos duas junções equivalentes a dois diodos; os mesmos testes de continuidade podem ser realizados no transistor, ou seja, utilizando um ohmímetro e polarizando diretamente as duas junções, como na figura a seguir. Quando houver continuidade diferente de 0 (zero) (da ordem de 600 ohms), somente nas direções diretas existirão indicativos de que o transistor estará bom. Dizemos *indicativos*, pois os testes completos devem ser realizados dinamicamente, ou seja, aplicando-se tensões variáveis e levando-se as curvas características do transistor (ver Figura 38):

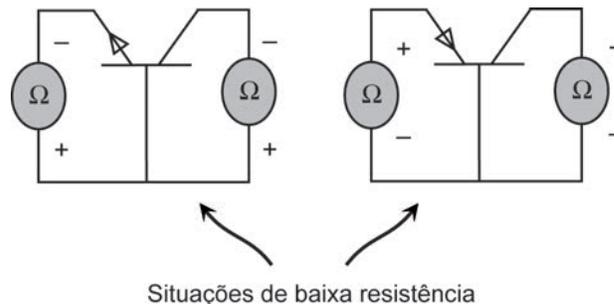


Figura 35

Configurações

As três configurações principais para a ligação do transistor são: base comum, coletor comum e emissor comum. A palavra *comum* indica o terminal que participa tanto da entrada quanto da saída, como demonstrado a seguir.

Cada uma das configurações apresenta características específicas, sendo usadas de acordo com a necessidade de cada projeto.

Base comum

Caracteristicamente, nessa configuração, o transistor apresenta ganho de tensão, sem defasagem entre a entrada e a saída, com impedância de entrada de 30 ohms a 1000 ohms.

Emissor comum

Caracteristicamente, nessa configuração, o transistor apresenta ganho de tensão e também de corrente e potência, com uma defasagem de 180° entre o sinal de saída e o de entrada. A impedância de entrada é da ordem de 300 k a 2 k ohms e a de saída, de 5 k ohms a 50 k ohms.

Desde que a corrente de base seja menor que $V_{\text{FONTE}}/R_{\text{CARGA}}$, ela pode controlar a corrente de carga, como apresentado no circuito abaixo, da seguinte forma:

1. calcular a corrente de carga ($I_{\text{CARGA}} = V_{\text{FONTE}}/R_{\text{CARGA}}$);
2. calcular a corrente de base ($I_{\text{BASE}} = I_{\text{CARGA}}/\beta$);
3. calcular a resistência de base ($R_{\text{BASE}} = (V_{\text{FONTE DA BASE}} - V_{\text{BE}})/I_{\text{BASE}}$). Note que, no exemplo a seguir, a tensão da fonte do circuito da base é de 5 V, e não 18 V, que é a fonte do circuito da coletora:

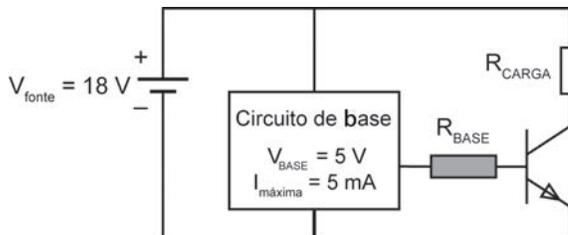


Figura 36

2.3.1.4.2 Exercícios resolvidos

1. Utilizando a figura anterior, calcule o resistor de base, para que o transistor não receba a tensão nominal. Dados:

$$\beta = 200$$

$$V_{\text{CARGA}} = 5 \text{ V}$$

$$R_{\text{CARGA}} = 50 \ \Omega$$

$$V_{\text{BE}} = 0,6 \text{ V}$$

Resposta:

$$1 - I_{\text{CARGA}} = 5/50 = 0,1 \text{ A}$$

$$2 - I_{\text{BASE}} = 0,1/200 = 0,0005 \text{ A}$$

$$3 - R_{\text{BASE}} = (5 - 0,6)/0,0005 = 8800 \text{ } \Omega$$

2. Utilizando a figura anterior, calcular o resistor de base, para que o transistor não receba a tensão nominal. Dados:

$$\beta = 200$$

$$V_{\text{CARGA}} = 18 \text{ V e } V_{\text{BE}} = 0,6 \text{ V}$$

$$R_{\text{CARGA}} = 500 \text{ } \Omega$$

Resposta:

$$1 - I_{\text{CARGA}} = 18/500 = 0,036 \text{ A}$$

$$2 - I_{\text{BASE}} = 0,036/200 = 0,00018 \text{ A}$$

$$3 - R_{\text{BASE}} = (5 - 0,6)/0,00018 = 24444,4 \text{ } \Omega$$

Observação: qualquer valor de resistência de base menor que esse levará a carga a receber tensão nominal.

Coletor comum

Caracteristicamente, nessa configuração, o transistor apresenta ganho de potência, alto ganho de corrente e ganho de tensão menor que 1. Da mesma forma que na configuração *base comum*, não há defasagem entre o sinal de entrada e o de saída.

A impedância de entrada é maior que 100 k ohms; a de saída, da ordem de 1 k ohm.

A configuração *coletor comum*, também conhecida como Seguidor de Emissor, destaca-se pela sua simplicidade e frequência de aplicação.

Nessa configuração, o sinal é aplicado entre base e emissor, e sua saída, entre emissor e referência da fonte de alimentação, como poderá ser visto na Figura 37.

A tensão na carga sempre será $V_{\text{BASE}} - V_{\text{BE}}$ ($V_{\text{BE}} \approx 0,6 \text{ V}$). Assim, para que haja condução, a tensão do circuito do coletor deverá ser maior que a tensão do circuito de base.

Essa configuração é muito utilizada em fontes reguladas de tensão, cuja fonte de sinal (que estará no circuito de base) tem amplitude ou tensão suficientes, mas não possui alta capacidade de corrente (circuitos de alta impedância de saída).

Por exemplo: no circuito a seguir, a tensão na carga é $V_{CARGA} = 6\text{ V} - 0,6\text{ V} = 5,4\text{ V}$ e a corrente na carga é $I_{CARGA} = V_{CARGA} / R_{CARGA} = 5,4 / 50 = 0,108\text{ A}$. Se o ganho do transistor for $\beta = 250$, a corrente de base será de, aproximadamente, $I_b = 0,000432\text{ A}$, que é muito menor que a corrente máxima do circuito da fonte de sinal na base ($I_{MÁX} = 0,4\text{ A}$):

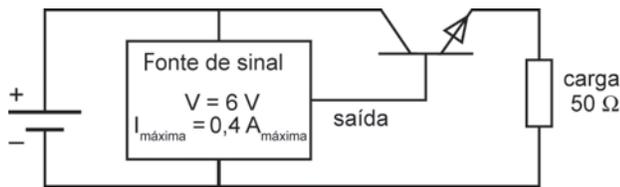


Figura 37

Curvas características

O funcionamento do transistor pode ser mais bem determinado com a análise de suas curvas características: corrente de coletor (I_c), corrente de base (I_b), tensão de coletor-emissor (V_{CE}) e tensão base-emissor (V_{BE}).

Formas de operação dentro das curvas características

O transistor pode operar em três regiões distintas dentro da curva de carga (gráfico I_c contra V_{CE} , na figura a seguir): na região de corte, região ativa ou região de saturação.

Na região de corte, a corrente de coletor é 0 (zero), porque a tensão de base é menor que a necessária para que a corrente de base seja gerada, ou ainda com polaridade contrária (junção base emissor reversamente polarizada).

Na região ativa, com polarização adequada, cada valor de I_b gera um valor proporcional de I_c :

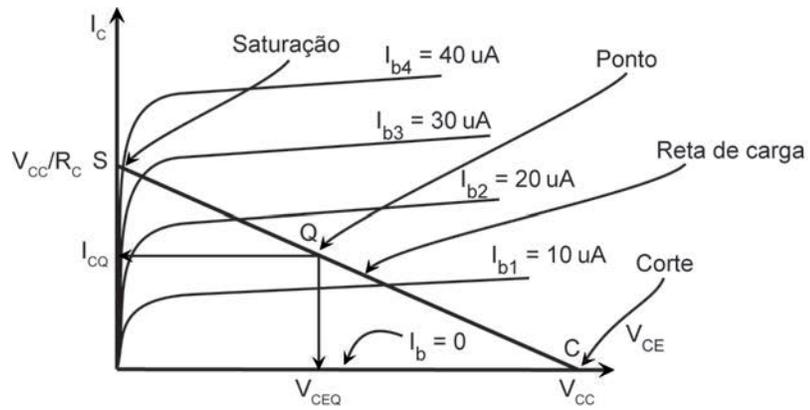


Figura 38

Na região de saturação, a corrente de coletor é a maior possível e aumentos de I_b não provocam aumentos de I_c , pois este já está na corrente máxima (saturado).

A operação nas regiões de corte ou saturação faz que o transistor opere em uma condição especial, chamada de operação em modo de chave.

Distribuição das posições dos terminais

As posições dos terminais (B, C e E), que podem estar dispostos de várias formas, podem ser encontradas nos manuais de dados dos transistores (“data sheets”).

Transistor de efeito de campo – Tec ou Fet

O transistor de efeito de campo (Tec) é mais conhecido pela sua sigla, em inglês, Fet (“Field Effect Transistor”) e, por isso, será abreviado dessa forma. A principal diferença externa entre o Fet e o transistor bipolar reside no fato de que o bipolar controla a corrente de saída (de coletor) por meio da corrente de entrada (de base); já no Fet, a corrente de saída é controlada pela tensão aplicada no terminal de entrada (“Gate”), como é mostrado a seguir:

Símbolos

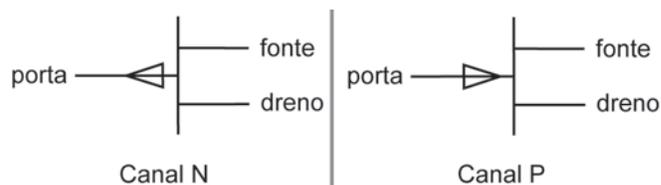


Figura 39

Curvas características do Fet

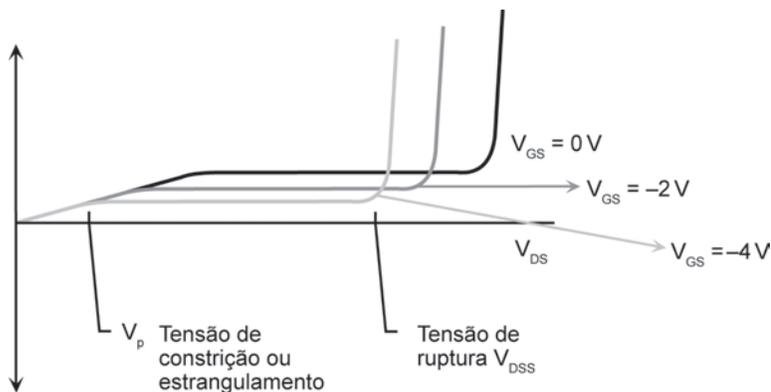


Figura 40

Observação: DS = Dreno-Fonte (“source”) e GS = “Gate-Source” (porta-fonte).

Existe a passagem de uma corrente no terminal de controle (porta ou “Gate”), mas ela é desnecessária e extremamente pequena, em virtude do tipo de construção do Fet, que tem uma resistência de entrada muito alta se comparada à do transistor bipolar. A resistência de entrada do Fet varia de acordo com o tipo, entre $10^7 \Omega$ e $10^{13} \Omega$ [10 M Ω (M = Mega) a 100 T Ω (T = Tera), que equivalem a 10 milhões e a 100 milhões de milhões de ohms, respectivamente]. Os Mosfet (“Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”) e os JFet, de junção (“Junction Field Effect Transistor”), são os que apresentam maior resistência.

Devido ao alto valor de sua alta impedância de entrada, o Fet é muito utilizado em circuitos amplificadores de tensão com baixo consumo de potência e baixa corrente de entrada.

2.3.1.4.3 Transistores operando como chave

Quando na região ativa ou de amplificação, o transistor opera como amplificador, isto é, existe proporcionalidade entre as suas correntes, em que vale a seguinte relação: $I_C = \beta \cdot I_B$. Em outros termos, a corrente de coletor é diretamente proporcional à corrente de base. Se o valor de I_B dobrar, o de I_C também dobrará. A constante de proporcionalidade β (beta) é um dos parâmetros do transistor, muitas vezes encontrado nos manuais como h_{FE} . Seu valor não é o mesmo para um determinado tipo de transistor, podendo variar numa razão de 1:5 para um mesmo tipo de transistor.

Na região de corte, em que o transistor se comporta como uma chave aberta, todas as correntes são da ordem de nA (nanoampere) para transistores de Si (silício) e de mA (miliampere) para transistores de Ge (germânio).

Para cortar um transistor, basta fazer $V_{BE} = 0$. A figura a seguir mostra um transistor polarizado no corte e o modelo equivalente simplificado (chave aberta):

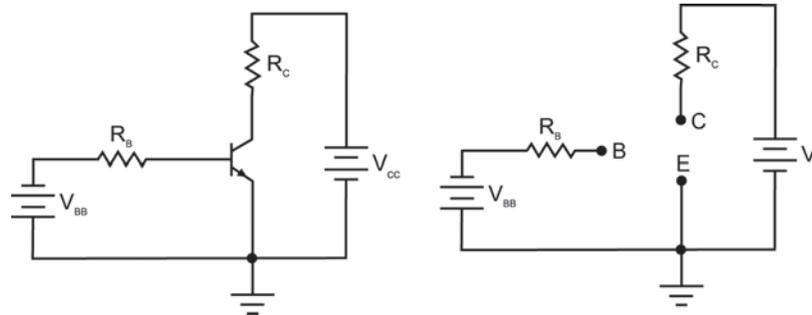


Figura 41

Quando saturado, o transistor simula uma chave fechada. A corrente de coletor é constante e segue a relação entre I_C e I_B , $I_C = \beta \cdot I_B$. Para saturar um transistor, a corrente de base deve ser maior que um determinado valor especificado pelas curvas características de coletor ou, pelo menos, igual a ele. A próxima figura apresentará um transistor saturado e o circuito equivalente (chave fechada).

Para uma melhor compreensão da passagem do corte para a saturação ou vice-versa, considere a configuração em emissor comum e as curvas características de coletor, que serão apresentadas adiante.

Inicialmente com $V_{BB} = 0$ e como $I_B = (V_{BB} - V_{BE})/R_B$ em V_{BB}/R_B , o transistor está cortado, isto é, $I_B = 0$ e $I_C = 0$.

O ponto de operação está localizado abaixo da reta de carga, ponto C. Nessas condições, $V_{CE} = V_{CC}$, e o transistor comporta-se como uma chave aberta. Existe apenas uma pequena corrente de fuga, da ordem de nA. Aumentando-se V_{BB} , se aumentará I_B (lembre que $I_B = V_{BB}/R_B$); assim, o transistor entrará na região ativa, em que $I_C = \beta I_B$, trabalhando como um amplificador, como visto anteriormente. Se I_B aumentar, I_C aumentará na mesma proporção. Há, porém, um valor de I_B para o qual um aumento adicional em I_B não provoca aumento em I_C . Nesse caso, diz-se que o transistor está saturado:

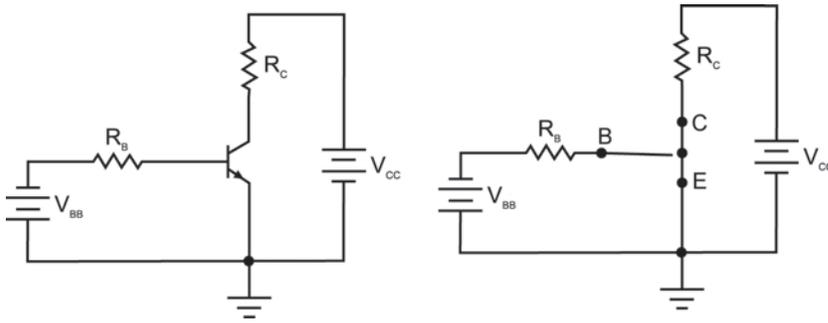


Figura 42

No gráfico da figura a seguir, essa corrente é I_{B4} . A saturação é, portanto, caracterizada por $I_C = \beta I_B$, em que $I_C = V_{CC}/R_C$ é a corrente de coletor na saturação (admitindo-se que $V_{CE} = 0$). Para que o transistor sature, deve-se observar a condição $I_B = I_C/\beta = V_{CC}/\beta$.

Na prática, o valor de β pode variar muito de transistor para transistor, de um mínimo (β_{\min}) a um máximo (β_{\max}). Para garantir a saturação do transistor, devemos usar o β_{\min} :

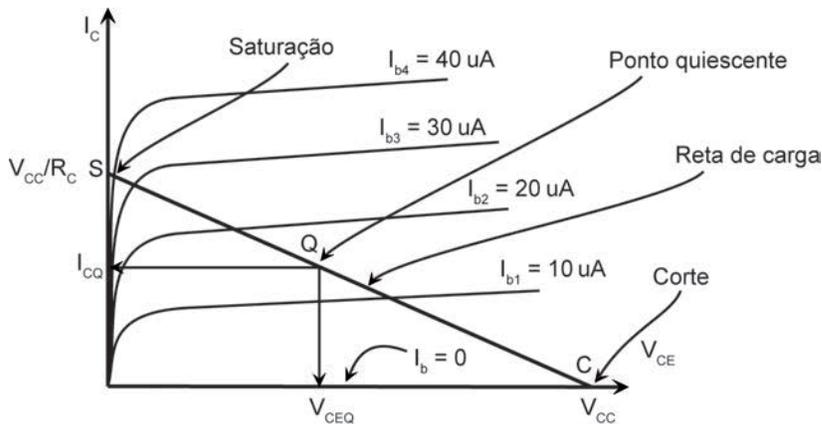


Figura 43

2.3.1.4.4 Exercícios resolvidos

1. Calcule R_B e R_C no circuito, comandado por um microcomputador, para que o transistor sature com $I_C = 10 \text{ mA}$. Considerar $\beta_{\min} = 100$, $V_{BE\text{sat}} = 0,7 \text{ V}$ e $V_{C\text{sat}} = 0$.

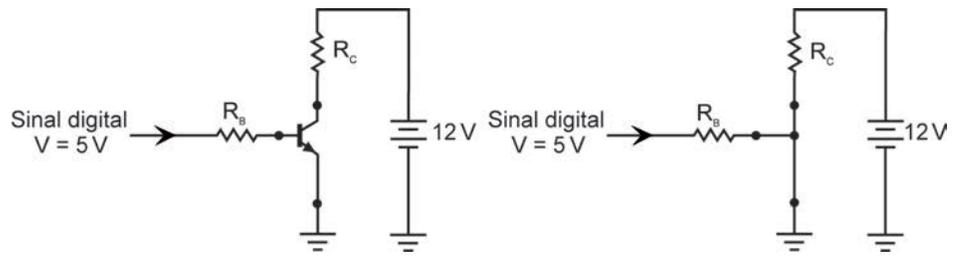


Figura 44

Resposta: $I_{C_{sat}} = 10 \text{ mA} = V_{CC}/R_C$, logo $R_C = 12 \text{ V}/10 \text{ mA} = 1 \text{ K} \Omega$

Para saturar $I_B = I_{C_{sat}}/\beta_{min} = 10 \text{ mA}/100 = 0,1 \text{ mA}$

Adota-se $I_B = 0,2 \text{ mA}$ e se considera $R_B = (V_B - V_{BE})/I_B = (5 - 0,7)/0,2 \text{ mA} = 21,5 \text{ K} \Omega$ (adotar o valor comercial imediatamente abaixo, que garantirá a saturação, no caso $R_B = 18 \text{ K} \Omega$).

2. Dimensione R_B , para que o transistor da figura a seguir, comandado por um microcomputador, acione o relé. Dados: relé $12 \text{ V}/40 \text{ mA}$, $\beta_{min} = 100$, $V_{Besat} = 0,7 \text{ V}$.

Resposta: $I_{C_{sat}} = 40 \text{ mA}$ para saturar o transistor $I_B = I_{C_{sat}}/\beta_{min} = 40 \text{ mA}/100 = 0,4 \text{ mA}$

No entanto, $R_B = (5 - 0,7)/0,4 = 4,3 \text{ V}/0,4 \text{ mA} = 10,75 \text{ K}$; para garantir a saturação, adota-se $R_B = 10 \text{ K} \Omega$.

Observação: a finalidade do diodo em paralelo com a bobina do diodo é eliminar a força contraeletromotriz gerada na bobina quando o transistor corta, protegendo, dessa forma, o transistor da alta-tensão no coletor.

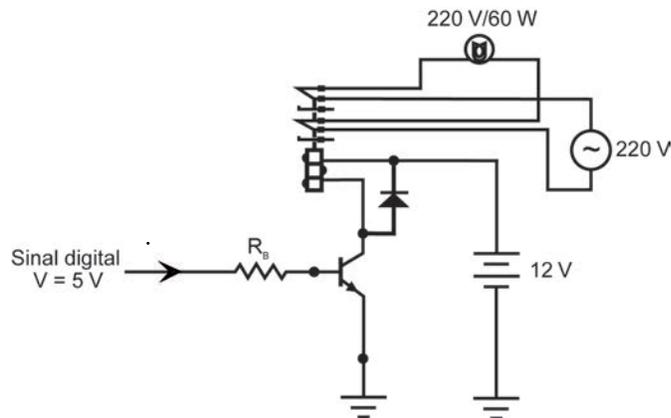


Figura 45

2.3.1.5 Circuitos integrados

Circuitos integrados

A partir da invenção do transistor em 1948, os circuitos eletrônicos vêm sofrendo constantes reduções no seu tamanho. Hoje, são fabricados os chamados circuitos integrados ou CIs, que são circuitos eletrônicos encapsulados, com função específica, apresentando seus terminais mais importantes externamente à cápsula.

A miniaturização conseguida pela indústria eletrônica possibilita a fabricação de circuitos integrados com até centenas de milhares de componentes internos, com reduzido volume externo. Com a fabricação em série, também houve uma redução considerável no preço final desses CIs.

Devido ao seu alto grau de miniaturização, os circuitos integrados estão presentes na maior parte dos equipamentos eletrônicos atuais, desde um simples rádio de pilhas a naves espaciais.

O tamanho e a forma de cada CI dependem de sua potência e do número de componentes internos, que podem ser de apenas duas unidades até milhões delas. Os CIs de maiores potências são, assim como outros componentes, parcial ou totalmente metálicos.

Dependendo de sua função, o CI pode apresentar diferentes números de terminais e várias formas de distribuição. De acordo com a distribuição, para aplicações normais, os CIs podem ser do tipo *alinhamento simples* (SIL – “Simple in Line”) ou *duplo* (Dil – “Dual in Line”), conforme a figura a seguir. Para aplicações de alta integração, como é o caso de computadores, as distribuições podem ser com diversas camadas de terminais:

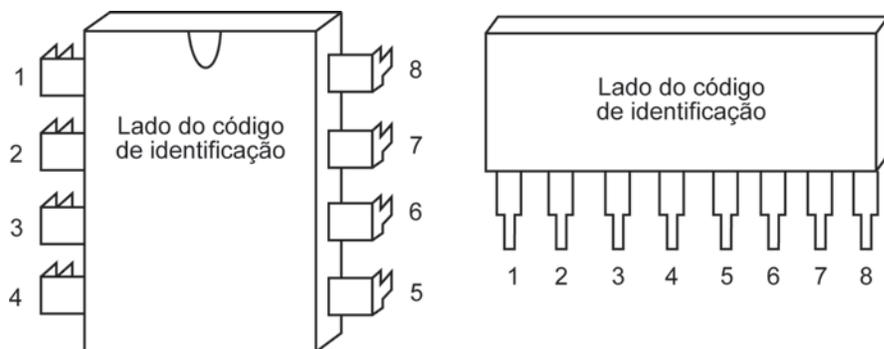


Figura 46

Da mesma forma que os transistores e demais semicondutores, os CIs também trazem, em seu corpo, uma identificação alfanumérica que permite a

localização de seus dados em publicações especializadas (“data sheets”). Na identificação de um CI, o número é precedido de letras que variam segundo o fabricante e alguns parâmetros de funcionamento.

Diferentemente dos componentes já mencionados, os terminais do CI, geralmente, não possuem nome e são identificados por números. Tal numeração, normalmente, não é impressa no CI. Assim, para a sua identificação, existe uma norma de distribuição, ou seja, (i) os de alinhamento simples são lidos da esquerda para a direita, considerando-se a vista frontal como aquela com o código impresso; (ii) os de alinhamento duplo são lidos no sentido anti-horário a partir de uma marca ou chanfro presente no lado de cima do CI (lado com o código impresso).

Existe um enorme número de tipos de CI disponível no mercado, tornando-se inviável a apresentação de todos eles no texto desta unidade, de modo que só serão apresentados os mais comuns, tais como:

- CI 78XX → regulador de tensão positiva (em que “XX” é substituído pela tensão regulada, por exemplo: “05” é um regulador de 5 V).
- CI 79XX → regulador de tensão negativa (em que “XX” é substituído pela tensão regulada, por exemplo: “12” é um regulador de -12 V).
- CI 555 → oscilador/temporizador.
- CI 4n 25 e 4n 35 → optoacopladores.
- CI 741 → amplificador operacional.
- CI 74XX → circuitos digitais (em que “XX” é substituído por números que identificam o tipo de circuito interno (portas NAND, AND, OR, NOR etc.); esses números também podem ser precedidos de letras que trazem informações como velocidade de operação, aplicações militares etc.).

2.3.1.5.1 Circuitos reguladores de tensão

Os reguladores de tensão 78XX e 79XX, frequentemente encontrados em fontes de circuitos eletrônicos em virtude de sua qualidade e simplicidade de montagem, são equipados com proteção interna contra sobrecorrente e sobre-temperatura, além de apresentarem ótima rejeição a ondulações (“ripple”), desde que a saída em paralelo com capacitores e a tensão a ser regulada sejam pré-filtradas.

Se os modos de ligação forem observados e a fonte de alimentação não for simétrica, o 78XX poderá ser usado no lugar do 79XX ou vice-versa. Caso

as condições não sejam satisfeitas, esses CIs só poderão ser substituídos por outros com identificação igual (78 ou 79):

Forma de ligação

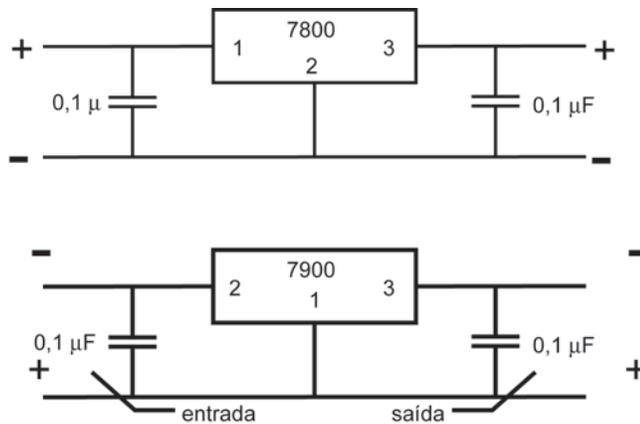


Figura 47

Observação: o fabricante sugere os melhores valores dos capacitores de entrada e de saída para a regulação e filtragem de frequências espúrias.

Circuitos reguladores de tensão ajustáveis

Entre os reguladores de tensão ajustáveis disponíveis no mercado, os mais simples são os da série LM 117, podendo operar com corrente (a depender do regulador usado) de 1 A a 3 A (série LM 150). Dois exemplos são apresentados a seguir:

Série LM 117:

- LM 317T = tensão máxima de entrada 35 V controlando 1 A.

Série LM 150:

- LM 350T = tensão máxima de entrada 35 V controlando 3 A.

Dos reguladores mais populares, a série LM 117 (o mais comum é o LM 317) dispõe de características que a põem à frente de qualquer regulador da série 78XX. Duas das características primordiais estão na estabilização eficiente e na grande rejeição de “ripple” e outros ruídos espúrios da rede elétrica.

Nesses CIs, assim como nos reguladores vistos anteriormente, há proteção contra curto-circuito. No circuito a seguir, vê-se uma fonte regulada típica, em que é usado o LM 317:

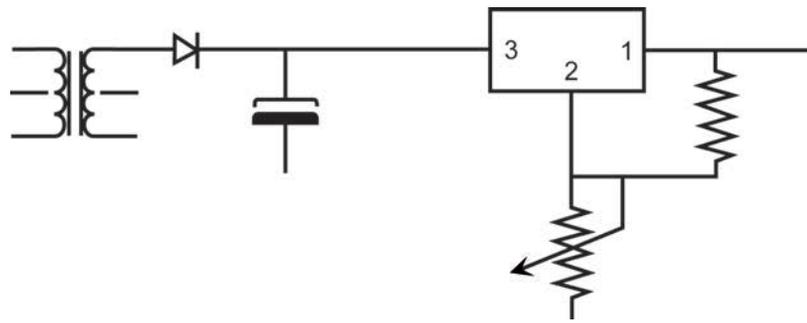


Figura 48

2.3.1.5.2 Circuitos osciladores/temporizadores

O CI 555 é o circuito oscilador/temporizador mais comum encontrado no mercado. Esse circuito integrado gera formas de onda de tensão retangular em modo biestável, monoestável e astável.

Funções dos pinos

A numeração a seguir corresponde à própria numeração dos pinos, versando o item 1, por exemplo, sobre a função do pino 1; o item 2, sobre a função do pino 2; e assim por diante:

1. Ligação ao negativo da fonte (3 V a 18 V);
2. Entrada: leva a saída ao nível alto quando recebe uma tensão inferior à da fonte ($V_{\text{FONTE}}/3$);
3. Saída (máxima = 25 mA);
4. Leva a saída ao nível baixo quando é conectado ao negativo da alimentação. Normalmente, fica ligado ao positivo;
5. Varia a frequência de oscilação da saída de acordo com a tensão a ele aplicada. Quando não for utilizado, deve ser conectado ao negativo da fonte com um capacitor de 0,1 μF ;
6. Entrada: leva a saída ao nível baixo quando recebe tensão maior que $(2/3) \cdot V_{\text{FONTE}}$;
7. Conectado internamente ao pino 1 por meio de um transístor quando a saída está em nível baixo;
8. Ligação ao positivo da fonte.

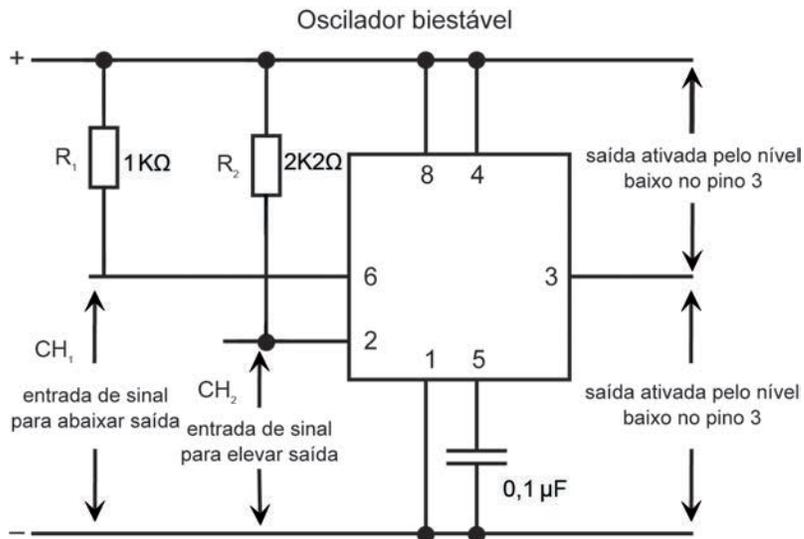


Figura 49

Nesse circuito, a saída se tornará alta tão logo o pino 6 receba tensão alta. A saída permanecerá alta até que o pino 2 receba tensão baixa.

2.3.1.5.2.1 Exercícios resolvidos

1. No circuito a seguir, com o 555, considere $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ e $C_1 = 100 \mu\text{F}$ com um LED acoplado na saída (por meio de um resistor em série). Calcule o tempo pelo qual o LED permanecerá aceso depois da aplicação do sinal de entrada.

Resposta: o LED permanecerá aceso por, aproximadamente, 10 segundos.

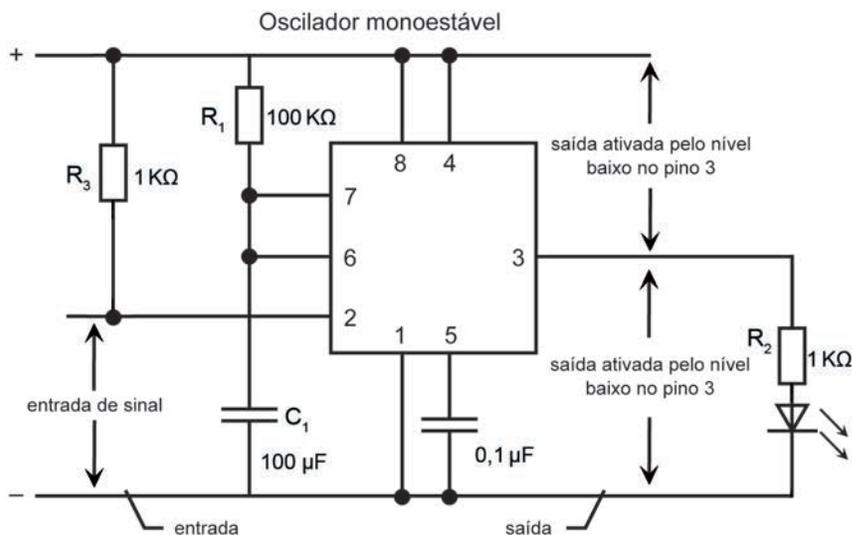


Figura 50

Nesse circuito, a tensão de saída mantém-se baixa até que o pino 2 receba tensão baixa. A partir daí, a saída se manterá alta por $T = 1,1 RC$, em que T é o período de nível alto em segundos, R é a resistência em ohms e C, a capacitância em faradays.

2. No circuito a seguir, com o 555, com um LED acoplado na saída (por meio de um resistor em série), calcule os valores de R_1 , R_2 e C_1 , para que o LED pulse sem a necessidade de um sinal de entrada.

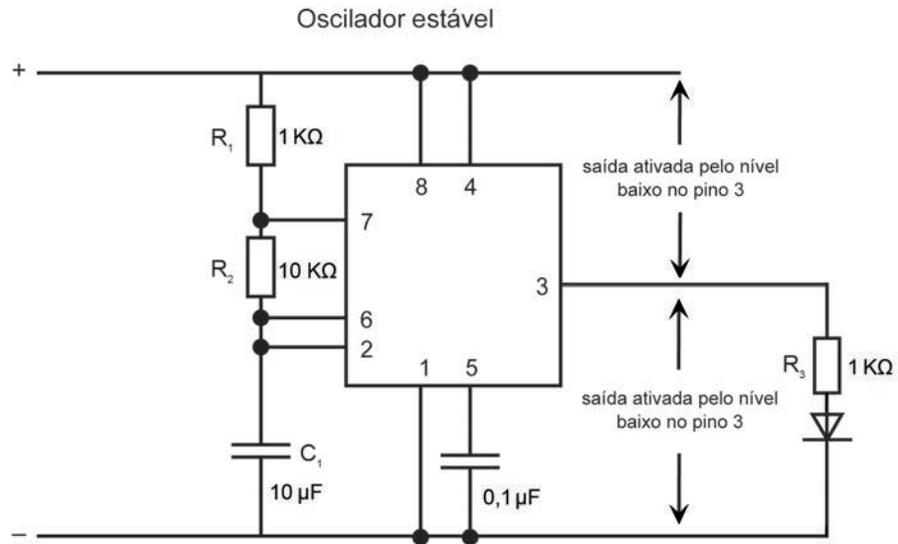


Figura 51

Resposta: o LED pulsará quando $R_1 = 1 \text{ k } \Omega$, $R_2 = 10 \text{ k } \Omega$ e $C_1 = 10 \text{ } \mu\text{F}$.

Nesse circuito, a saída gerará uma forma de onda quadrada entre o valor alto e o baixo sem a necessidade de sinal de entrada. O período do ciclo é de $T = 0,7 \cdot (2R_2 + R_1) \cdot C_1$, em que T é dado em segundos.

2.3.1.5.3 Circuitos optoacopladores

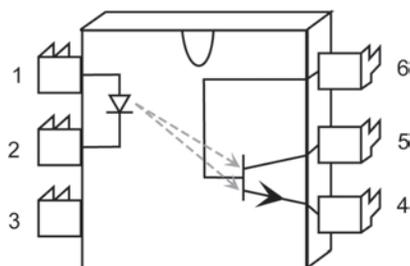
São circuitos integrados compostos, internamente, de um LED (diodo emissor de luz) e um fototransistor (ver próxima figura).

A tensão aplicada aos terminais do LED gera uma corrente (como em um diodo comum) que produzirá uma emissão de luz proporcional à tensão aplicada. O fototransistor, ao receber a emissão luminosa do LED, passa a conduzir entre o coletor e o emissor (como um transistor normal), com uma corrente proporcional à radiação luminosa gerada pelo LED.

Dessa forma, o transistor conduzirá proporcionalmente à tensão aplicada no diodo. A isolação entre o LED e o fototransistor é da ordem de até 2 kV.

Se uma carga for ligada no circuito emissor-coletor, a corrente poderá ser maior (até 5 mA) e controlada pela corrente do LED.

Se uma carga for ligada no circuito coletor-base, a corrente não será controlada, ou seja, o circuito funcionará como uma chave liga-desliga (“on-off”) comandada pelo LED. A corrente, nesse caso, é da ordem de 20 μA :



Pinagem:

- | | |
|------------|-------------|
| 1 – ânodo | 4 – emissor |
| 2 – cátodo | 5 – coletor |
| 3 – NC | 6 – base |

Figura 52

Observação: como o transistor é NPN, o terminal 4, como discutido anteriormente, deverá ter potencial menor (mais negativo) que os pinos 5 e 6.

Tabela 2 Optoacopladores.

Característica	Tipo	
	4N 25	4N 35
Corrente no LED (entrada) mA	60	80
Corrente na junção coletor-emissor	100	5
Corrente na junção base-coletor para saída “on-off”	100 μA	20 μA
Isolamento entre entrada e saída (kV)	2,5	> 1,5

2.3.1.5.4 Amplificadores operacionais

O amplificador operacional (AmpOP) é um circuito amplificador de altíssimo ganho de malha aberta (sem realimentação), por volta de 150000 x, e possui duas entradas diferenciais e uma saída. As entradas são chamadas diferenciais, pois o valor que o AmpOP amplifica é a diferença entre os valores aplicados a elas.

O ganho ou fator de amplificação é a razão entre a tensão de saída e a de entrada, ou seja,

$$V_s = (V_{e2} - V_{e1}) \cdot A$$

Em que V_s é tensão de saída; V_{e1} , tensão aplicada à entrada inversora; V_{e2} , tensão aplicada à entrada não inversora; e A , ganho, como apresentado na figura a seguir:

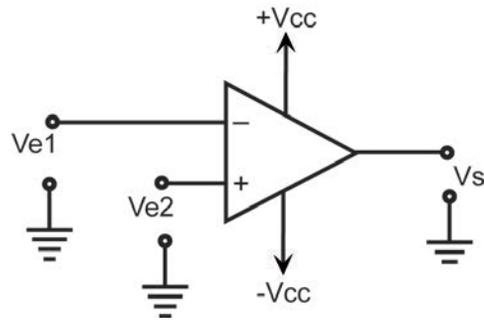


Figura 53

O ganho em um circuito realimentado com AmpOP é determinado por componentes externos, como os resistores.

Os terminais $-V_{cc}$ e $+V_{cc}$ são a alimentação negativa e positiva, respectivamente. Com essa alimentação é que o AmpOP alimenta a saída, limitando a tensão de saída aos valores da alimentação. Por exemplo: se a alimentação for de $+5\text{ V}$ e -5 V , a saída será limitada a esses valores, isto é, se o sinal de entrada for amplificado e atingir níveis superiores a $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$, a saída saturará e se limitará a $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$.

Configurações do AmpOP

Circuito comparador

Nessa configuração, não existe realimentação, ou seja, não é utilizado nenhum componente externo, e o circuito comparador é exatamente aquele mostrado na figura anterior, com o ganho máximo característico do AmpOP. Nesse tipo de configuração, qualquer diferença entre as entradas leva a saída a seus valores máximos.

Se:

$$\begin{aligned} V_{e2} > V_{e1} &\rightarrow V_s = +V_{cc} \\ V_{e2} < V_{e1} &\rightarrow V_s = -V_{cc} \\ V_{e2} = V_{e1} &\rightarrow V_s = 0\text{V} \end{aligned}$$

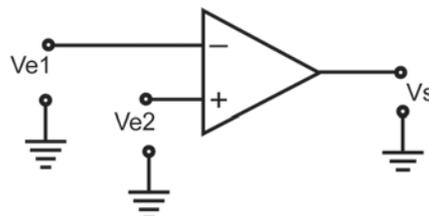


Figura 54

Circuito com realimentação positiva

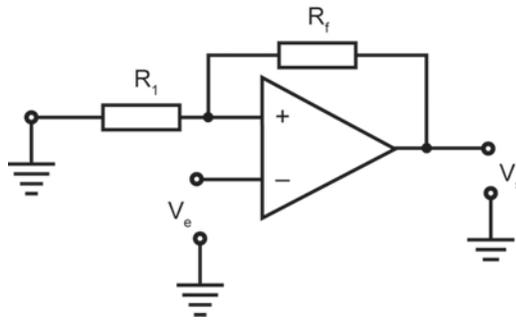


Figura 55

Para entender o funcionamento do circuito anterior, lembre-se de que a impedância de entrada de um AmpOP é muito grande e imagine que a corrente que entra no terminal positivo seja praticamente 0 (zero), isto é, a entrada do AmpOP é um circuito aberto. Pense em um divisor de tensão como aquele que você aprendeu em Física Geral II. Então, a tensão de entrada V_{e1} é aquela mostrada na figura a seguir, ou seja, ela é uma fração da tensão de saída igual a $R_1/(R_1 + R_f)$ e alimenta a entrada não inversora, realimentando o AmpOP positivamente:

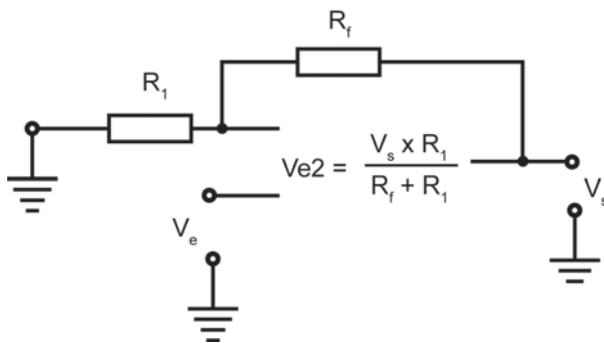


Figura 56

Assim que V_e for mais positiva que a fração realimentada, a saída se tornará saturada negativamente, tal como a fração realimentada. A partir desse momento, a saída se manterá negativa até que a tensão aplicada à entrada inversora se torne mais negativa que a fração realimentada.

Os valores de V_e que invertem a polaridade da saída são denominados *pontos de desengate* e serão tão mais afastados quanto menor for a fração realimentada, ou seja, quanto menor for R_f em relação a R_1 . Podem ser determinados por:

$$V_{desengate} = V_{fonte} \cdot R_f / R_1 + R_f$$

Essa configuração, se usada em substituição ao comparador, evita a oscilação da saída quando há o cruzamento dos valores de entrada.

Circuitos com realimentação negativa

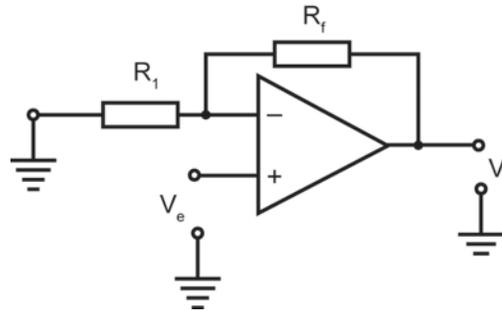


Figura 57

Ao aplicarmos uma parcela da tensão de saída na entrada inversora, conseguimos aplicar nesta uma tensão que é função da tensão aplicada no terminal usado como entrada de sinal, V_e , na figura adiante.

Com a realimentação negativa, existe a possibilidade de construção de circuitos amplificadores com ganho final controlado, o que propicia uma grande variedade de aplicações nos mais diversos campos da Eletrônica.

Circuitos com realimentação negativa – Não inversor

No circuito não inversor, a tensão de entrada é aplicada à entrada não inversora, o que significa que a tensão de saída tem a mesma polaridade da tensão de entrada. Não há inversão de fase entre o sinal de entrada e o de saída.

Observe que a tensão de saída alimenta um divisor de tensão formado de R_1 e R_f ($f = \text{“feedback”} = \text{realimentação}$) e que a tensão sobre R_1 é uma fração da tensão de saída, da mesma forma como descrito anteriormente. Essa tensão é aplicada à entrada inversora. A tensão na entrada inversora é igual a:

$$V_{inv} = V_s \cdot R_1 / (R_1 + R_f)$$

A saída assumirá o valor de tensão que leva à entrada inversora o valor o qual, aplicado à equação $V_s = (V_{e2} - V_{e1}) \cdot A$, mantém a saída estabilizada. Devido ao alto ganho, não haverá uma diferença de potencial considerável entre as entradas, o que permite usar a equação do parágrafo anterior rearranjada para a tensão de saída. Substituindo V_{inv} pela tensão não inversora, tem-se:

$$V_s = V_e \cdot (R_f + R_1)/R_1, \text{ ou seja, } A = (R_f + R_1)/R_1$$

Circuitos com realimentação negativa – Buffer

A configuração “buffer” é uma variante da configuração não inversora, em que $R_f = 0$, ou seja, a saída é ligada diretamente à entrada inversora, levando o ganho a ser 1. Assim, a tensão de saída é igual à de entrada não inversora.

Essa configuração, também chamada de *seguidor de tensão*, tem como uma de suas funções principais o casamento de impedância, pois a impedância de entrada do AmpOP é extremamente alta (idealmente infinita) e a impedância de saída, extremamente baixa (idealmente zero). Assim, $V_s = V_e$:

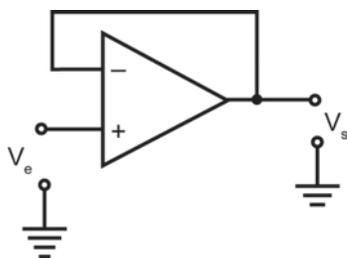


Figura 58

Circuitos com realimentação negativa – Inversor

Como sugere o nome, nessa configuração, o sinal de saída terá o sinal invertido em relação ao de entrada, pois, quando a entrada for positiva, a saída será negativa, para que o AmpOP consiga aproximar as tensões das entradas (V_{e1} e V_{e2}). A entrada não inversora é aterrada, e, com isso, a tensão de R_1 será a mesma aplicada à entrada da configuração. O circuito, então, funcionará como uma fonte de corrente para a malha de realimentação. Para a estabilidade do amplificador, costuma-se acoplar R_1 em paralelo a R_f , ligados à terra e à entrada não inversora.

A tensão de saída dessa configuração é dada por:

$$V_s = - V_e R_f/R_1, \text{ ou seja, } A = R_f/R_1$$

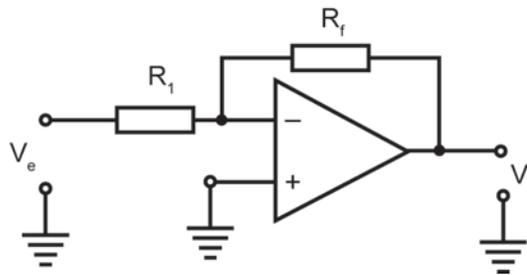


Figura 59

Circuitos com realimentação negativa – Somador inversor

A diferença dessa configuração para a anterior é que, nesta, se tem várias tensões aplicadas simultaneamente a vários resistores, que, por sua vez, são acoplados à entrada inversora. A tensão de saída é, então, a soma das tensões aplicadas às entradas:

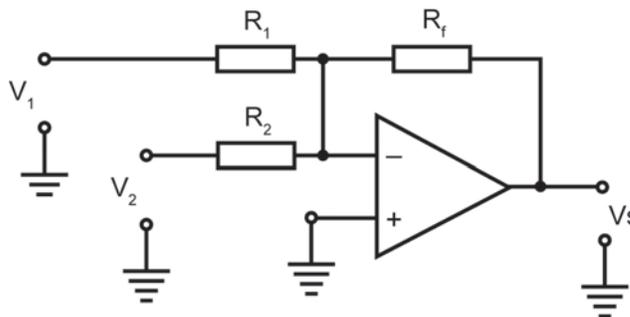


Figura 60

$$V_s = - (V_{e1} + V_{e2} + V_{en}) R_f/R_1, \text{ se } R_1 = R_2$$

ou

$$V_s = - (R_f \cdot V_1/R_1 + R_f \cdot V_2/R_2 + R_f \cdot V_3/R_3 + \dots)$$

Circuitos com realimentação negativa – Subtrator

Nessa configuração, também chamada de *amplificador diferencial*, quando $R_1 = R_2$ e $R_f = R_3$, a tensão de saída é:

$$V_o = R_f (V_2 - V_1)/R_1$$

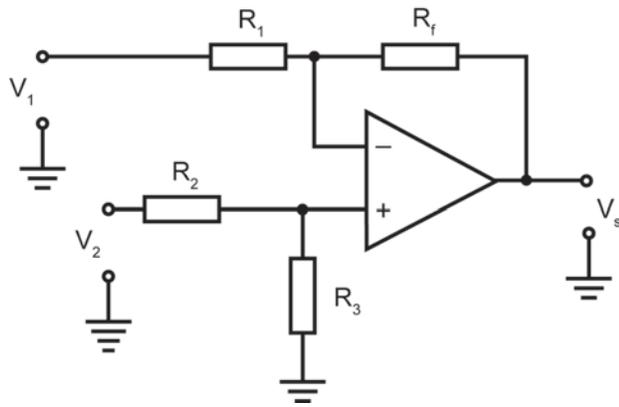


Figura 61

Circuitos com realimentação negativa – Integrador inversor

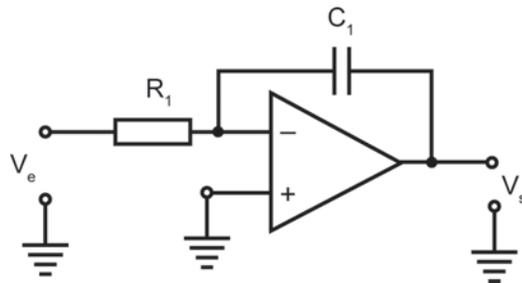


Figura 62

Nessa configuração, no lugar do resistor de realimentação (R_f), é colocado um capacitor, e, como a corrente dessa malha só depende da tensão e resistência de entrada, a tensão de saída – cujo valor final sempre será $+V_{cc}$ ou $-V_{cc}$, de acordo com a polaridade da tensão da entrada – será uma rampa com taxa de subida tanto maior quanto maior a tensão de entrada. Se a tensão de entrada for igual a 0 (zero), a tensão de saída será constante.

A tensão de saída pode ser calculada de forma simplificada:

$$V_s = [(-1/RC) \cdot \int V_e \cdot dt] + V_{s0}$$

Em que V_{s0} é tensão existente na saída, antes da aplicação da tensão de entrada.

Essa configuração apresentará uma tensão variável na saída, com taxa de crescimento diretamente proporcional ao módulo da tensão de entrada, sendo:

- crescente se a entrada for negativa;
- decrescente se a entrada for positiva;

- constante se a entrada for nula.

Observação: esse circuito é a base da função integral dos controladores eletrônicos analógicos.

Circuitos com realimentação negativa – Diferenciador (Derivador)

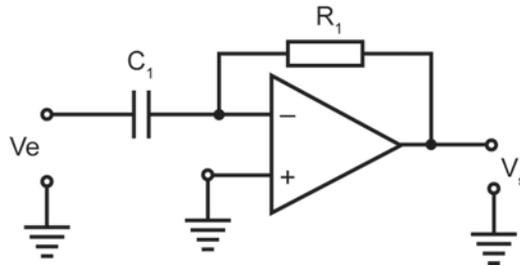


Figura 63

Nessa configuração, no lugar do resistor de entrada (R_1), é colocado um capacitor. A reatância capacitiva formada, como você se lembra ($X_c = 1/2\pi fC$), é tanto menor quanto maior a velocidade de variação da tensão aplicada (a frequência da equação). Assim, a tensão de saída será uma função da velocidade de variação da tensão de entrada.

O cálculo da tensão de saída pode ser realizado de forma simplificada:

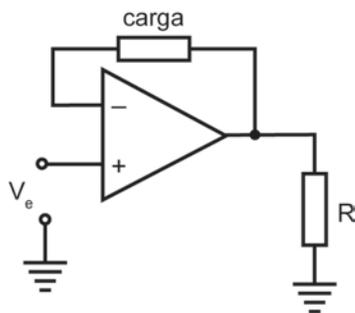
$$V_s = -\Delta_{Ve} R_F C / \Delta t$$

Essa configuração apresentará uma tensão variável na saída, diretamente proporcional à velocidade de variação da tensão de entrada, sendo:

- negativa se a entrada for crescente;
- positiva se a entrada for decrescente;
- nula se a entrada for constante.

Observação: essa configuração é a base da função derivativa dos controladores eletrônicos analógicos.

**Circuitos com realimentação negativa – Conversor tensão-corrente
(Carga flutuante)**

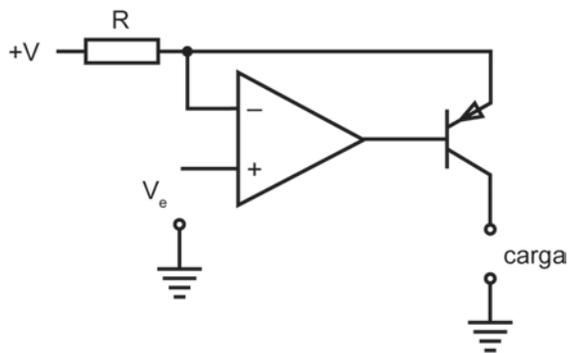


$$I_{RL} = V_e / R_B$$

Figura 64

$$I_{RL} = V_e / R_B$$

**Circuitos com realimentação negativa – Conversor tensão-corrente
(Carga aterrada)**



$$I_{RL} = (V_{CC} - V_e) / R$$

Figura 65

$$I_{RL} = (V_{CC} - V_e) / R$$

Pinagem do CI 741

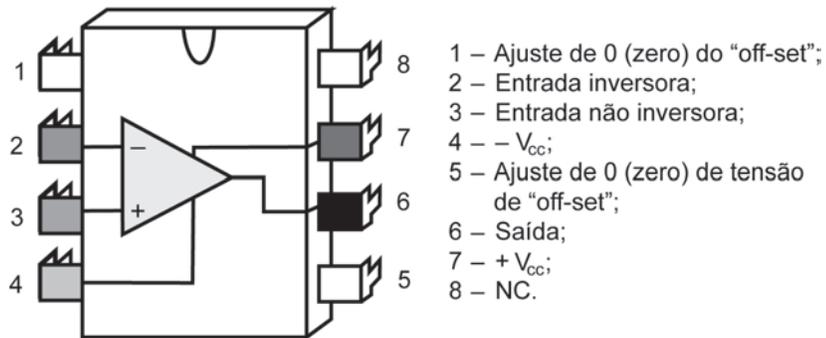


Figura 66

2.3.1.5.5 Amplificadores operacionais – Dicas

- Nunca opte por fazer um amplificador de alto ganho em um único estágio, porque isso pode provocar instabilidade; utilize sempre vários estágios.
- Procure não colocar resistores de valores muito altos.
- Para aplicações mais simples, opte sempre por amplificadores operacionais mais modernos que o 741, pois ele necessita ser compensado com componentes externos; tente utilizar equivalentes, como os da linha OP.
- O 741 é o amplificador operacional mais simples e antigo ainda presente no mercado. Existem diferentes tipos e qualidades, de acordo com as aplicações; um dos tipos que substituem o 741 é o da linha OP, com baixo "off-set" e excelente qualidade para aplicações mais simples.
- Para aplicações mais sofisticadas, utilize amplificadores especiais, com especificações da norma Mil (Militares) de preferência.
- No catálogo do fabricante, você encontra as limitações de cada amplificador operacional, entre elas a faixa de frequência de aplicação, que deverá ser controlada.

2.3.1.5.6 Circuitos digitais básicos

Os sistemas digitais são compostos de circuitos lógicos denominados *portas lógicas*. Existem três portas básicas que podem ser conectadas de maneiras diferentes, formando sistemas que variam de um relógio digital a um supercomputador.

A seguir, apresentaremos as características de algumas portas, bem como seus símbolos e circuitos equivalentes.

Porta And (E)

Essa porta pode ter duas ou mais entradas e uma única saída e funciona de acordo com a seguinte definição:

A saída de uma porta And será 1 se e somente se todas as entradas forem 1.

Na figura a seguir, temos o símbolo de uma porta And de 2 entradas (A e B), juntamente com um quadro que mostra todas as possibilidades de níveis de entrada com a respectiva saída. Tal quadro é chamado de Tabela-Verdade:

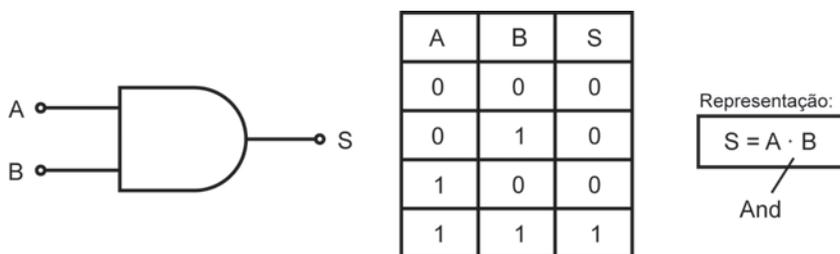


Figura 67

Representação com chaves:

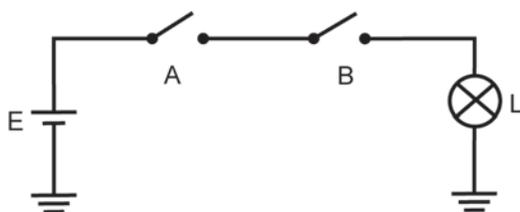


Figura 68

O circuito anterior executa a função And. Considere o nível lógico 1 igual à chave fechada e o nível lógico 0 (zero) igual à chave aberta.

Quando tivermos a condição da chave A aberta (0) e da chave B também aberta (0), não circulará corrente, e a lâmpada L ficará apagada (0).

Na condição de termos a chave A aberta (0) e a chave B fechada (1), também não circulará corrente, e a lâmpada continuará apagada (0). É fácil observar que a condição inversa [chave A (1) e chave B (0)] também resultará em lâmpada apagada (0).

Quando tivermos a condição da chave A fechada (1) e da chave B também fechada (1), a corrente poderá circular, e a lâmpada acenderá (1).

Verifique que a análise descrita anteriormente confirma a Tabela-Verdade da porta. Para o circuito And, portanto, podemos dizer que qualquer 0 (zero) na entrada leva a saída para 0 (zero).

Porta Or (Ou)

Essa porta também possui duas ou mais entradas e uma única saída e funciona de acordo com a seguinte definição:

A saída de uma porta Or será 1 se uma ou mais entradas forem 1.

Na figura a seguir, temos o símbolo de uma porta Or de duas entradas (A e B) e a respectiva Tabela-Verdade:

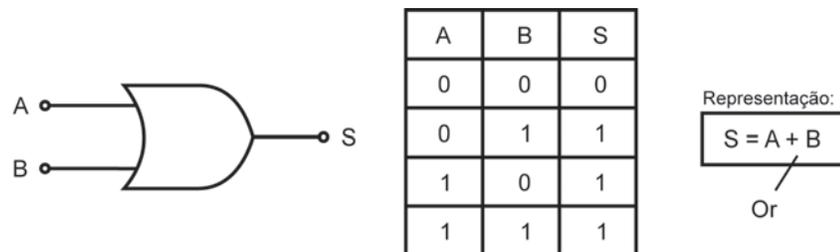


Figura 69

Representação com chaves:

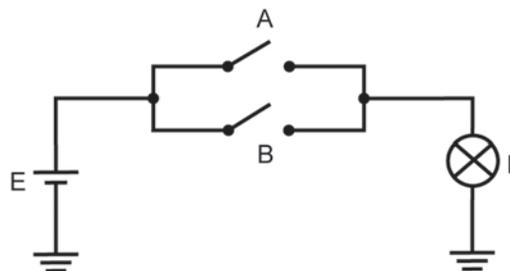


Figura 70

Para a análise do circuito da porta Or (Figura 70), serão mantidas as considerações utilizadas para a porta And, ou seja, chave aberta = nível lógico 0 (zero) e chave fechada = nível lógico 1 (um).

Quando a chave A estiver fechada e a chave B, aberta, teremos corrente circulando, e, conseqüentemente, a lâmpada L estará acesa.

A lâmpada também ficará acesa quando:

- chave A = aberta e chave B = fechada;
- chave A = fechada e chave B = fechada.

A lâmpada só estará apagada quando as duas chaves, A e B, estiverem abertas.

Ao analisar o circuito, novamente comparando-o com a Tabela-Verdade da porta, podemos dizer que, para um circuito Or, qualquer 1 na entrada leva a saída para 1.

Porta Not (Não)

Essa porta possui apenas uma entrada e uma saída e obedece à seguinte definição:

A saída de uma porta Not assume o nível lógico 1 somente quando sua entrada é 0 (zero) e vice-versa.

Isso significa que a porta Not é um inversor lógico, isto é, o nível lógico da sua saída será sempre o oposto do nível lógico da entrada. A figura a seguir apresenta o símbolo da porta lógica Not e sua Tabela-Verdade:

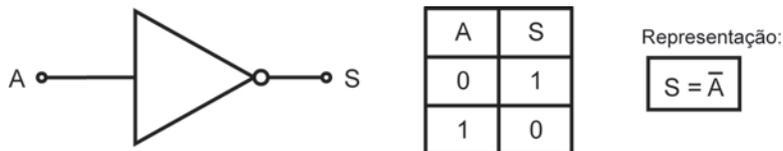


Figura 71

Representação com chaves:

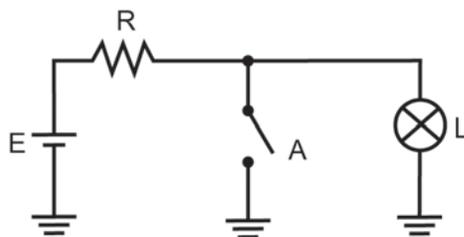


Figura 72

O circuito que executa a função Not é mostrado na figura anterior. Também serão mantidas as considerações utilizadas para as portas anteriores, ou seja,

chave aberta = nível lógico 0 (zero) e chave fechada = nível lógico 1 (um). Observe que o circuito se resume a uma chave ligada para o terra.

Quando a chave está aberta, a corrente circula pela lâmpada, que fica acesa. Quando a chave A fecha, a corrente circula pela chave, e, com isso, a lâmpada apaga. Assim, a Tabela-Verdade é verificada.

Portas Nand e Nor (Ne e Nou)

As portas lógicas Nand e Nor são, na realidade, combinações das portas básicas And, Or e Not. A figura a seguir apresenta uma porta Nand de duas entradas, com o símbolo, e a Tabela-Verdade. Note que a porta Nand é constituída de uma And seguida de um inversor (Not):

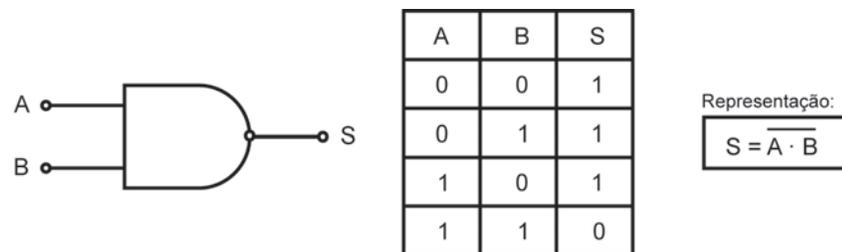


Figura 73

O circuito de uma porta Nand é demonstrado pela figura a seguir, em que é fácil verificar a Tabela-Verdade. Para uma Nand, podemos dizer que qualquer 0 (zero) na entrada leva a saída para 1.

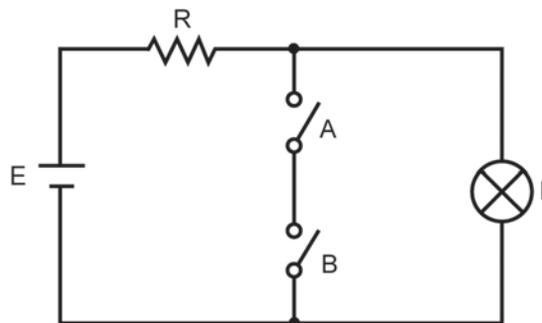


Figura 74

A figura a seguir apresenta o símbolo de uma porta Nor, que é uma combinação entre uma Or e um inversor (Not). Segundo a tabela correspondente, podemos dizer, com relação a uma Nor, que qualquer 1 na entrada leva a saída para 0 (zero):

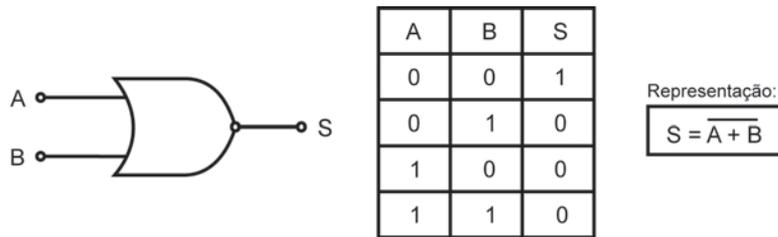


Figura 75

Analisando o circuito da figura a seguir, é fácil concluir que, quando qualquer uma das entradas, A ou B, estiver com 1 (fechada), a saída S (lâmpada L) estará com 0 (zero) (lâmpada apagada).

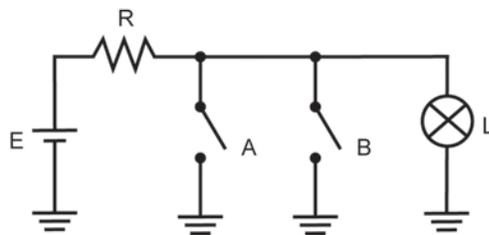


Figura 76

Porta Exclusive-Or (Ou Exclusiva)

A função que essa porta executa consiste em levar a saída para 1 quando as variáveis de entrada são diferentes entre si. A figura a seguir apresenta o símbolo de uma porta Exclusive-Or e sua Tabela-Verdade:

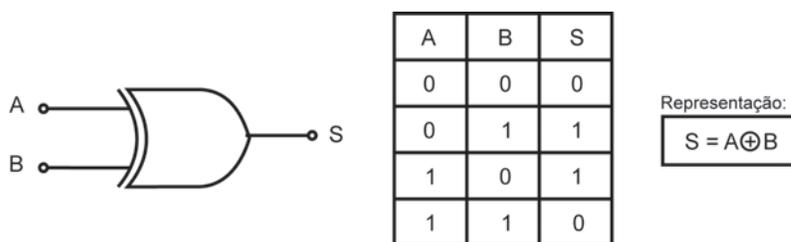


Figura 77

O circuito da figura a seguir verifica a tabela, utilizando as chaves. Na condição das chaves \bar{A} e \bar{B} abertas, não há caminho para a corrente circular, e a lâmpada não acende. Na condição das chaves \bar{A} e \bar{B} fechadas, também não há corrente circulando, e a lâmpada não acende.

Concluimos, então, que essa porta só terá nível 1 na saída quando suas entradas forem diferentes.

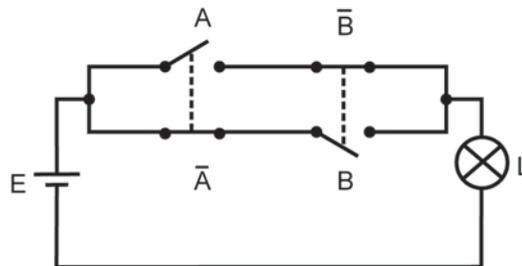


Figura 78

Porta Exclusive-Nor (Não Exclusiva ou Circuito-Coincidência)

Essa porta tem como função fornecer 1 na saída somente quando suas entradas forem iguais. A figura a seguir mostra o símbolo de uma porta Exclusive-Nor e sua Tabela-Verdade:

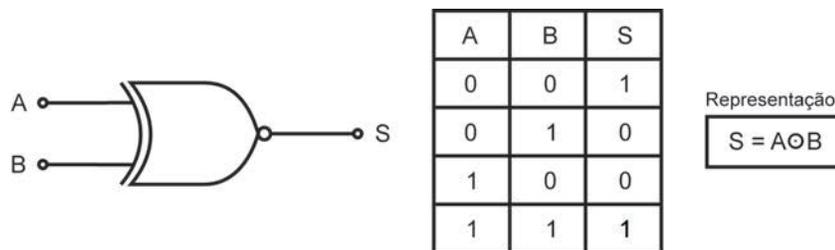


Figura 79

No circuito da figura a seguir, existem aquelas chaves que funcionam diferentemente das chaves \bar{A} e \bar{B} . Em outros termos, quando a chave \bar{A} está aberta, a chave A está fechada – o mesmo acontecendo com as chaves B e \bar{B} .

Dessa maneira, podemos verificar a Tabela-Verdade da porta por meio da seguinte análise: quando as chaves A e B estão abertas e as chaves \bar{A} e \bar{B} , fechadas, circula corrente pela lâmpada, que, a propósito, estará acesa. Quando a chave \bar{A} está fechada e a chave B, aberta (chave \bar{B} fechada), não circula corrente pela lâmpada, o que resulta em lâmpada apagada.

Na situação inversa, com a chave A aberta (chave \bar{A} fechada) e a chave \bar{B} fechada, ocorre a mesma coisa, e a lâmpada permanece apagada. Com as chaves A e B fechadas e as chaves \bar{A} e \bar{B} abertas, circula corrente pela lâmpada, que acende. Pode-se dizer, portanto, que a porta Exclusive-Nor terá 0 (zero) em sua saída quando as entradas forem diferentes:

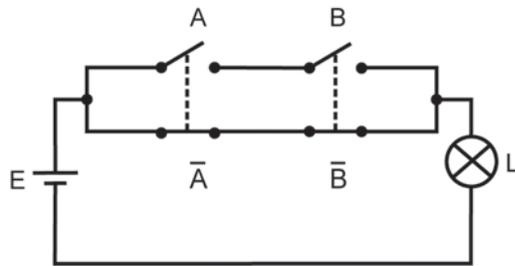


Figura 80

Quadro 1 Resumo.

Blocos lógicos básicos																		
Porta	Símbolo usual	Tabela verdade	Função lógica															
E AND		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	Função E: assume valor 1 quando todas as variáveis forem iguais a 1 e zero nos outros casos possíveis.
A	B	S																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
OU OR		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	Função OU: assume valor zero quando todas as variáveis forem iguais a zero e 1 nos outros casos.
A	B	S																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
NÃO NOT INVERSOR		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>\bar{A}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	A	\bar{A}	0	1	1	0	Função NÃO: inverte a variável aplicada à sua entrada.									
A	\bar{A}																	
0	1																	
1	0																	
NE NAND		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	Função NE: inverso da função E.
A	B	S																
0	0	1																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
NOU NOR		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	Função NOU: inverso da função OU.
A	B	S																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																
EX-OU EX-OR		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	Função EX-OU: assume valor 1 quando as variáveis forem diferentes e zero quando forem iguais.
A	B	S																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
EX-NOU EX-NOR		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	Função EX-NOU: inverso da função EX-OU.
A	B	S																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																

2.3.2 Álgebra de Boole – Conceitos

A álgebra booliana é uma técnica matemática utilizada quando se consideram problemas de natureza lógica. Com a evolução dos computadores, o uso da álgebra de Boole cresceu, de modo que é, hoje, uma ferramenta fundamental para engenheiros e matemáticos no desenvolvimento de projetos e problemas lógicos. No campo da Computação, ela é usada na descrição de circuitos, podendo assumir os valores lógicos 1 ou 0 (zero). É fácil perceber que a álgebra de Boole e os sistemas de numeração binária estão extremamente inter-relacionados, uma vez que todos trabalham com duas variáveis.

Na verdade, a álgebra de Boole é a fundamentação matemática da lógica digital, que poderá ser empregada intensivamente para a simplificação também dos circuitos com chaves digitais. Assim, espera-se que você tenha assimilado as descrições anteriores, fazendo uso da descrição de portas lógicas como chaves.

2.3.2.1 Postulados e teoremas booleanos

Toda a teoria de Boole está fundamentada em sete postulados, expostos a seguir:

Tabela 3 Postulados.

Postulado		Postulado	
P1	$X = 0$ ou $X = 1$	P5	$1 + 1 = 1$
P2	$0 \cdot 0 = 0$	P6	$1 \cdot 0 = 0 \cdot 1 = 0$
P3	$1 \cdot 1 = 1$	P7	$1 + 0 = 0 + 1 = 1$
P4	$0 + 0 = 0$		

Se você prestar atenção, verá que esses postulados representam exatamente as definições de adição e multiplicação lógicas, apresentadas anteriormente.

A partir da fundamentação dos postulados booleanos, podem-se apresentar os teoremas a eles relacionados.

Na álgebra de Boole, o teorema é uma relação fundamental entre as variáveis booleanas, cujo uso permitirá a simplificação de equações e manipulações lógicas em circuitos lógicos das mais variadas formas.

Teoremas

T1 – Lei comutativa

(a) $A + B = B + A$

(b) $A \cdot B = B \cdot A$

T2 – Lei associativa

(a) $(A + B) + C = A + (B + C) = A + B + C$

(b) $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C) = A \cdot B \cdot C$

T3 – Lei distributiva

(a) $A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$

(b) $A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$

T4 – Lei da identidade

(a) $A + A = A$

(b) $A \cdot A = A$

T5 – Lei da negação

(a) $\overline{\overline{A}} = A$

(b) $\overline{\overline{A}} = A$

T6 – Lei da redundância

(a) $A + A \cdot B = A$

(b) $A \cdot (A + B) = A$

T7 – (a) $0 + A = A$

(b) $1 \cdot A = A$

(c) $1 + A = 1$

(d) $0 \cdot A = 0$

T8 – (a) $\overline{\overline{A}} + A = 1$

(b) $\overline{\overline{A}} \cdot A = 0$

T9 – (a) $A + \overline{A} \cdot B = A + B$

(b) $A \cdot (\overline{A} + B) = A \cdot B$

T10 – Teorema de De Morgan

(a) $\overline{\overline{A} + \overline{B}} = \overline{\overline{A}} \cdot \overline{\overline{B}}$

(b) $\overline{\overline{A} \cdot \overline{B}} = \overline{\overline{A}} + \overline{\overline{B}}$

Observe que todos os teoremas são descritos de duas formas, sendo duais entre si. O termo *dual* significa que as operações Or e And podem ser intercambiáveis.

O dual de um teorema pode ser obtido pela substituição dos “1” por “0” e vice-versa e pela substituição da função lógica And por Or e vice-versa. Veja o exemplo a seguir:

T1 – Lei comutativa \rightarrow (a) $A + B = B + A \rightarrow$ (b) $A \cdot B = B \cdot A$

T6 – Lei da redundância \rightarrow (a) $A + A \cdot B = A \rightarrow$ (b) $A \cdot (A + B) = A$

T8 – (a) $\overline{\overline{A}} + A = 1 \rightarrow$ (b) $\overline{\overline{A}} \cdot A = 0$

Os três primeiros teoremas, T1, T2 e T3, mostram que as leis básicas de comutação, de associação e de distribuição da álgebra convencional também são válidas para as variáveis booleanas.

A lei da negação só é aplicável à lógica de duas variáveis, como é o caso da álgebra de Boole. A lei da redundância pode ser comprovada da seguinte maneira:

$(a) A + A \cdot B = A$ $A \cdot (1 + B) = A$ $A = A$	<p>[T7 (b)]</p>	<p>Pondo A em evidência, (b) $A \cdot (A + B) = A$</p> $A \cdot A + A \cdot B = A$ $A + A \cdot B = A$ $A \cdot (1 + B) = A \text{ [T7 (b)]}$ $A \cdot 1 = A$ $A = A$
---	-----------------	--

Os teoremas T7 e T8 são regras da álgebra booleana.

T9 pode ser demonstrado assim:

$A + \bar{A} \cdot B = A + B$	
$(A + \bar{A}) \cdot (A + B) = A + B$	[T3 (b)]
$1 \cdot (A + B) = A + B$	[T8 (a)]
$A + B = A + B$	[T7 (b)]

Uma das mais importantes ferramentas de manipulação lógica é o teorema T10, que também é conhecido como Teorema de De Morgan.

2.3.2.2 Simplificação lógica

Com o uso dos teoremas e postulados booleanos, conseguimos simplificar equações lógicas e, assim, minimizar a construção de circuitos lógicos, como pode ser visto pelos exemplos a seguir:

Exemplo 1

A saída de um circuito lógico obedece à seguinte equação:

$$S = A + A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B$$

Se utilizássemos essa equação para construir o circuito com portas lógicas, teríamos o circuito da figura a seguir, ou seja, duas portas Not, duas portas And e uma porta Or:

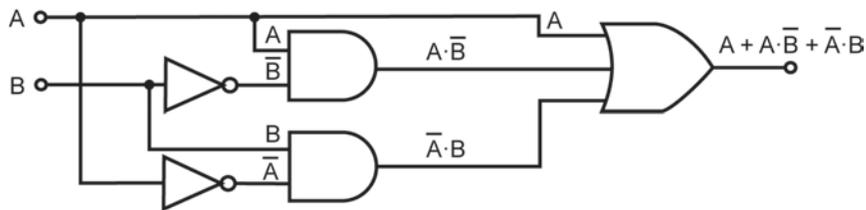


Figura 81

Ao lançarmos mão dos teoremas de Boole, simplificamos a equação:

$$\begin{aligned}
 A + A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B &= (A + A \cdot \bar{B}) + \bar{A} \cdot B \\
 &= A + \bar{A} \cdot B \quad [\text{T6 (a)}] \\
 &= A + B \quad [\text{T9 (a)}]
 \end{aligned}$$

Por meio da equação resultante, pode-se construir o circuito com apenas uma porta Or, conforme demonstrado pela figura a seguir. Isso significa que os dois circuitos representam a mesma função lógica:



Figura 82

Naturalmente, o circuito simplificado é o ideal, já que executa a mesma função lógica com um número reduzido de portas lógicas.

Exemplo 2

Simplifique a expressão $A \cdot (A \cdot B + C)$. Solução:

$$\begin{aligned}
 A \cdot (A \cdot B + C) &= A \cdot A \cdot B + A \cdot C \quad [\text{T3 (a)}] \\
 &= A \cdot B + A \cdot C \quad [\text{T4 (b)}] \\
 &= A \cdot (B + C) \quad [\text{T3 (a)}]
 \end{aligned}$$

2.3.2.3 Manipulações lógicas

A maior utilidade dos teoremas de Boole está mais na manipulação de variáveis lógicas do que na simplificação. Isso se deve ao fato de um circuito poder não estar em uma forma minimizada, mesmo após a simplificação. Em determinados casos, o processo de minimização torna-se trabalhoso quando realizado com simplificações lógicas. Como exemplo, considere a equação lógica $S = A + B$ e suponha que seja necessário implementá-la por meio de portas lógicas Nand.

Aplicando o teorema de De Morgan na equação anterior e negando duplamente o resultado, teremos:

$$\overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B} \quad [\text{De Morgan}]$$

$$A + B = \overline{\bar{A} \cdot \bar{B}} \quad [\text{Dupla negação}]$$

Observe a figura:

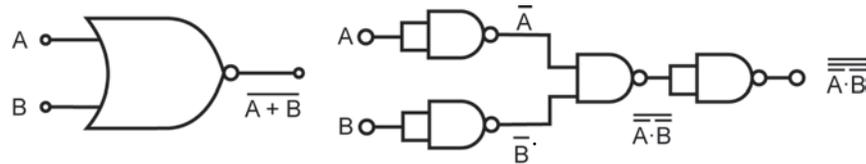


Figura 83

Na realidade, qualquer expressão lógica pode ser manipulada de forma a ser totalmente projetada por meio de portas Nand ou Nor, como mostram os exemplos a seguir:

Exemplo 3

1) Implemente as seguintes expressões lógicas:

a) $D = A + \bar{B} \cdot C$

b) $W = X \cdot \bar{Y} + \bar{X} \cdot Z$

Resposta:

a) $A + \bar{B} \cdot C = \overline{\overline{A + \bar{B} \cdot C}}$ [Dupla negação]

$\overline{\overline{A + \bar{B} \cdot C}} = \overline{\bar{A} \cdot \overline{\bar{B} \cdot C}}$ [De Morgan]

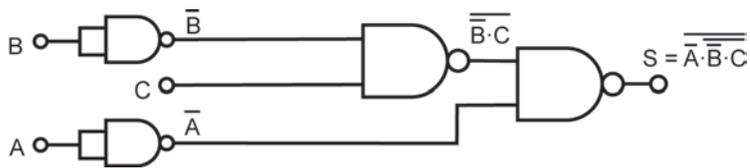


Figura 84

b) $X\bar{Y} + \bar{X}Z = \overline{\overline{X\bar{Y}} + \overline{\bar{X}Z}}$ [Dupla negação]

$\overline{\overline{X\bar{Y}} + \overline{\bar{X}Z}} = \overline{\overline{X\bar{Y}} \cdot \overline{\bar{X}Z}}$ [De Morgan]

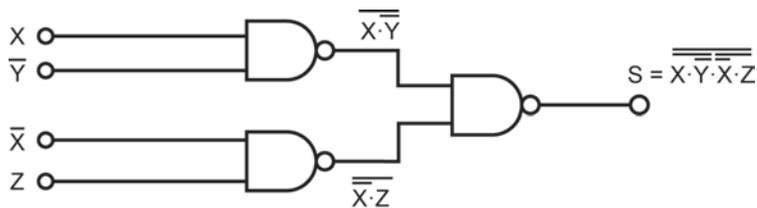


Figura 85

2) Projete as seguintes expressões lógicas com portas Nor:

a) $X \cdot \bar{Y} + Z$

b) $(U + V) \cdot (X + \bar{Y} + \bar{Z})$

Resposta:

a) Usando a dupla negação no primeiro membro da equação, temos:

$$X \cdot \bar{Y} + Z = \overline{\overline{X \cdot \bar{Y} + Z}}$$

Aplicando o teorema de De Morgan no termo complementar em (1), temos:

$$\overline{\overline{X \cdot \bar{Y} + Z}} = \overline{\overline{X + Y} + Z}$$

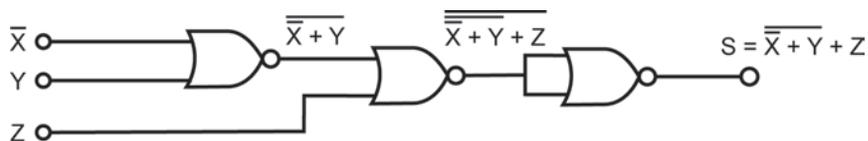


Figura 86

b) Usando dupla negação na equação, temos:

$$(U + V) \cdot (X + \bar{Y} + \bar{Z}) = \overline{\overline{(U + V) \cdot (X + \bar{Y} + \bar{Z})}}$$

Aplicando o teorema de De Morgan em (2), temos:

$$\overline{\overline{(U+V)} \cdot \overline{(X+\bar{Y}+\bar{Z})}} = \overline{\overline{(U+V)} + \overline{(X+\bar{Y}+\bar{Z})}}$$

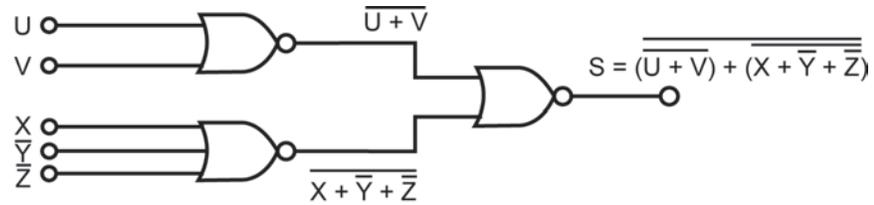


Figura 87

2.3.2.3.1 Exercícios resolvidos

1. Considere o circuito a seguir. Determine a relação entre a saída X e as entradas indicadas:

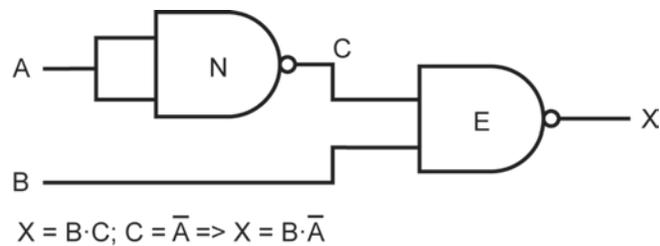


Figura 88

2. Este é um exemplo clássico, retirado de Schilling, Belove e Casabo (1973):

Um fazendeiro possui um cachorro enorme que é parte lobo, uma cabra e vários pés de couve. Possui ainda dois celeiros: um ao norte e outro ao sul. O homem, o cão, as couves e a cabra encontram-se no celeiro sul. O fazendeiro necessita trabalhar nos dois celeiros, mas, se o cachorro for deixado com a cabra, ele a morderá e, se a cabra ficar sozinha com as couves, ela as comerá. Para evitar esse desastre, o fazendeiro pediu-nos que construíssemos um computador portátil com quatro chaves, correspondentes a ele próprio, ao cão, à cabra e às couves. Se a chave estiver ligada a uma bateria, significará que o elemento a ela associado se encontra no celeiro sul; se estiver ligada à terra, significará que o elemento se encontra no celeiro norte. A saída do computador deverá ser conectada a uma lâmpada que se acenderá sempre que qualquer combinação de chaves resultar em uma das situações indesejáveis. Dessa forma, o fazendeiro poderá empreender suas tarefas usando o computador, para indicar-lhe que elemento levar com ele de um celeiro para o outro, evitando uma desgraça. Como construir esse computador? (SCHILLING; BELOVE; CASABO, 1973, p. 538).

Resposta:

Para projetarmos o computador, devemos estabelecer com muita precisão o que desejamos fazer.

Queremos acender a lâmpada quando ocorrer qualquer uma das quatro possibilidades seguintes:

1. O fazendeiro encontra-se no celeiro norte, E o cão E a cabra, no celeiro sul;
2. O fazendeiro, no celeiro norte, E a cabra E as couves, no celeiro sul;
3. O fazendeiro, no celeiro sul, E o cão E a cabra, no celeiro norte;
4. O fazendeiro, no celeiro sul, E a cabra E as couves, no celeiro norte.

Representaremos a situação “fazendeiro no celeiro sul” pela letra F. Logo, se ele não estiver lá, isto é, se estiver no celeiro norte, a situação será simbolizada pela letra F. As demais situações serão representadas por:

D = cão no celeiro sul

D' = cão no celeiro norte

C = couves no celeiro sul

C' = couves no celeiro norte

G = cabra no celeiro sul

G' = cabra no celeiro norte.

Podemos, agora, escrever a proposição lógico-simbólica que associa todas as possibilidades desastrosas:

$$L = F' \cdot D \cdot G + F' \cdot G \cdot C + F \cdot D' \cdot G' + F \cdot G' \cdot C'$$

Em que L indica que a lâmpada está acesa.

Cada termo da equação representa uma das quatro combinações possíveis para as quais desejamos que a lâmpada se acenda. Cada um deles necessita de uma porta E de três entradas. As saídas das quatro portas E serão as entradas de uma porta Ou de quatro entradas. Precisaremos também do complemento de cada uma das variáveis e, por isso, de quatro inversores.

Na próxima figura, encontra-se um circuito que realiza a equação anterior. Ele contém uma chave para cada carácter (F, D, G e C), uma bateria, uma lâmpada e as portas mencionadas. Verifique se funciona:

Circuito

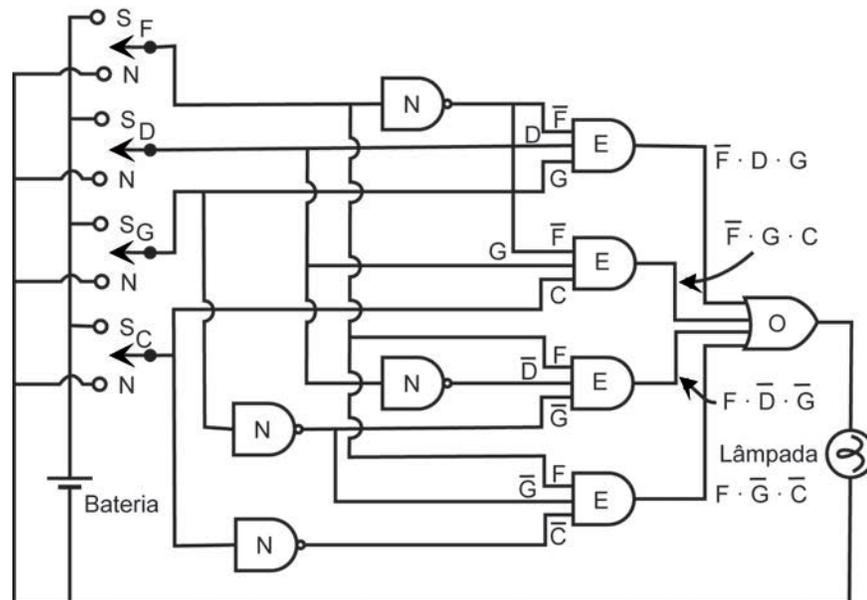


Figura 89

2.4 Considerações finais (resumo)

Como você pôde observar, a Eletrônica, nos níveis em que se necessita dela, não é tão complicada. Agora, acreditamos que você esteja apto a projetar pequenas fontes reguladas e amplificadores e a controlar pequenas cargas com o transistor trabalhando como chave. Com os circuitos digitais, esperamos que você tenha aprendido a trabalhar com chaves lógicas, mais precisamente no controle de portas baseado no modelo de chaves, que lhe facilitará o projeto de comandos elétricos.

2.5 Atividades individuais

Estas atividades devem ser realizadas individualmente e têm como objetivo fixar os conhecimentos assimilados ao longo do texto.

2.5.1 Exercícios propostos

1.

- Em um retificador de onda completa com transformador de derivação, você tem na entrada uma tensão de 20 Vrms. Calcule a tensão de saída.

- b) Agora, considere um retificador de meia onda.
- c) Considere um de onda completa com quatro diodos.
- d) Compare as diferenças de tensão e justifique.

2. Com base na figura do exercício resolvido 2.3.1.4.2, considere que a fonte é de 20 V e que a tensão de base é de 7 V com $I_{m\acute{a}x} = 8 \text{ mA}$. Calcule o resistor de base para as seguintes condições:

- a) $\beta = 200$, $V_{CARGA} = 5 \text{ V}$, $R_{CARGA} = 100 \Omega$.
- b) $\beta = 200$, $V_{CARGA} = 20 \text{ V}$, $R_{CARGA} = 1000 \Omega$.

3. Dimensione R_B , para que o transístor da figura do exercício resolvido 2.3.1.4.4 acione o relé. Dados: relé 12 V/20 mA $\beta_{min} = 100$ $V_{Besat} = 0,7 \text{ V}$.
Solução: $I_{Csat} = 20 \text{ mA}$ para saturar o transístor.

- 4. Projete um oscilador astável, para uma frequência de saída de 20 KHz (dica: frequência = 1/T).
- 5. Utilizando um amplificador operacional, projete um integrador para o sinal de saída do exercício 4, de forma a gerar uma onda triangular.
- 6. Considere o circuito a seguir. Determine a relação entre a saída X e as entradas indicadas:

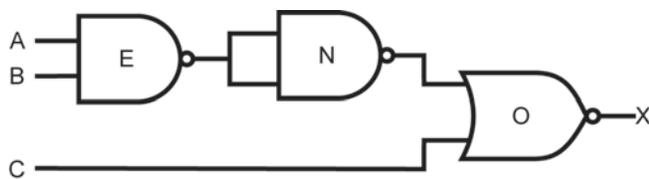


Figura 90

7. Utilizando os teoremas aprendidos anteriormente, reduza as funções lógicas a seguir. Observação: ' significa barra (negação).

$$f(A, B, C, D) = (A' + BC)(B + C'D)$$

$$f(A, B, C, D, E) = (A + (BC)')(D + BE)'$$

8. Simplifique a expressão: $A'BC' + A'BC + ABC'$.

9. Um aluno de mestrado, geralmente, pode realizar a defesa de sua dissertação quando

- já cursou todos os créditos requeridos;

- ou já convalidou todos os créditos requeridos;
- ou os créditos cursados ou convalidados totalizam os requeridos;
- e já foi aprovado no exame de proficiência de idiomas;
- e já foi aprovado no exame de qualificação do projeto de dissertação.

Represente a função lógica equivalente, simplificando-a.

2.6 Estudos complementares

Se você tiver tempo e desejar aprender um pouco mais, a seguir estão algumas sugestões.

2.6.1 Saiba mais

- Diodos:

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Diodo>>

- Transístores:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor#Bipolar_junction_transistor> (Em inglês, pois o site em português não está completo.)

- Amplificadores operacionais:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional>

- Circuitos digitais:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Circuito_digital>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Porta_lógica>

- Álgebra de Boole:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Álgebra_booliana>

Se você quiser aprender a simplificar com mais facilidade os seus circuitos digitais, estude *mapas de Karnaugh*:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Mapa_de_Karnaugh>

Pesquise também nos links relacionados.

2.6.2 Referências bibliográficas

- BOYLESTAD, R.; NASHELKY, L. *Electronic devices and circuit: theory*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1978.
- CIPELLI, A. M. V.; SANDRINI, W. J. *Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos*. São Paulo: Érica, 1986.
- CLOSE, C. M. *Circuitos lineares*. São Paulo: Edusp; LTC, 1975. v. 1-2.
- DEWAN, S. B.; STRAUGHEN, A. *Power semiconductor circuits*. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 1975.
- HOROWITZ, P.; ROBINSON, I. *Laboratory manual for the art of electronics*. Nova York: Cambridge University Press, 1981.
- HOROWITZ, P.; WILL, W. *The art of electronics*. Nova York: Cambridge University Press, 1980.
- MILLMAN, J.; HALKIAS, C. C. *Eletrônica: dispositivos e circuitos*. São Paulo: McGraw-Hill, 1981. v. 1-2.
- NEWMAN, D. G. *Circuits analysis*. São José: Engineering Press Inc., 1986.
- SCHILLING, D. L.; BELOVE, C.; CASABO, J. C. *Circuitos eletrônicos discretos e integrados*. Barcelona: Marcombo, 1973.
- TOOLEY, M. *Circuitos eletrônicos: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Campus, 2007.

UNIDADE 3

Comandos elétricos

3.1 Primeiras palavras

Nesta unidade, realizaremos uma introdução dos princípios de controle de motores elétricos por meio de comandos, utilizando contadores e relés. Também aprenderemos sinalização e proteção e ligação de motores, ou seja, fundamentos de acionamentos elétricos convencionais. Aqui, você poderá utilizar, principalmente, os conceitos da álgebra de Boole e suas simplificações.

3.2 Problematizando o tema

Você deve estar acostumado a ligar motores em sua casa. O simples fato de você apertar um botão ou mover uma chave leva o motor ao funcionamento. Na indústria, entretanto, esses motores são imensos, e os riscos para o usuário são grandes. Para o acionamento desse tipo de motores ou cargas, é necessário um distanciamento do operador, para que sejam acionados com segurança. O procedimento é feito com algo a que você está acostumado, o famoso relé, que, em nosso caso, é chamado de contator em virtude do tamanho. Além disso, alarmes e proteção para esse tipo de cargas são essenciais para a segurança do equipamento.

3.3 Texto básico para estudo

Neste tópico, aprenderemos os principais conceitos que regem os comandos elétricos de acionamento de máquinas e motores com segurança para o operador e o equipamento. Apresentaremos os fundamentos de acionamentos elétricos por meio do uso de relés, sinalização e proteção, além das formas de ligação de motores trifásicos.

3.3.1 Dispositivos de comando, proteção e sinalização

3.3.1.1 Comando

A chave, também denominada contato, tem a função de conectar e desconectar dois pontos de um circuito elétrico.

Feita de metal de baixa resistência elétrica e alta resistência mecânica, para suportar ciclos de ligar e desligar (comutação), muitos milhares de vezes a chave tem dois terminais: um deve ser ligado à fonte e o outro, à carga. E, como, nos cabos e fios elétricos, a estrutura metálica tem área de secção transversal

proporcional à corrente comandada pela chave, *quanto maior for a corrente que se deseja comandar, maiores serão as superfícies de contato e a chave.*

O valor de corrente a ser comandada também influencia a pressão de contato entre as partes móveis do contato: *maiores correntes exigem maiores pressões de contato*, para garantir que a resistência no ponto de contato seja a menor possível. A separação dos contatos na condição de desligamento deverá ser tanto maior quanto maior for a tensão para a qual o contato foi produzido.

A velocidade de comutação (ligar ou desligar) deve ser a mais alta possível, para evitar o desgaste provocado pelo calor proveniente do arco voltaico formado no desligamento do circuito em carga.

O contato pode ser do tipo com trava, como nos interruptores de lâmpadas, e também pode ser do tipo de impulso, com uma posição normal mantida por mola e uma posição contrária, mantida apenas enquanto dura o impulso de atuação do contato. A essas configurações dá-se o nome de contato fechado ou contato aberto, conforme a posição mantida pela mola.

Aberto: também chamado desligado, é mantido aberto por ação de uma mola, fechando-se quando acionado. Como a mola o mantém aberto, é ainda denominado *normalmente aberto* (NA ou, do inglês, NO).

Fechado: também chamado ligado, é mantido fechado por ação de uma mola, abrindo-se quando acionado. Como a mola o mantém fechado, é chamado também de *normalmente fechado* (NF ou, do inglês, NC).



Figura 91

O contato pode ter diversos tipos de acionamento, como por botão, pedal, alavanca, chave, rolete por gatilho, ou ação do campo magnético de uma bobina (eletroímã), formando, nesse último caso, um conjunto denominado contator magnético ou chave magnética.

Os símbolos de contatos acionados por rolete e botão podem ser vistos na figura a seguir:

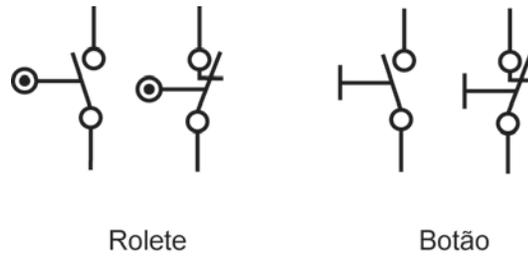


Figura 92

Chave magnética ou Contator magnético

São formados, basicamente, de um eletroímã e um conjunto de chaves operado pelo fluxo magnético do eletroímã quando energizado.

O símbolo de uma chave magnética, com a respectiva identificação, pode ser visto na figura a seguir. Os terminais do eletroímã são identificados por letras, em geral **a1** e **a2** ou **a** e **b**, e os das chaves, com numeração:

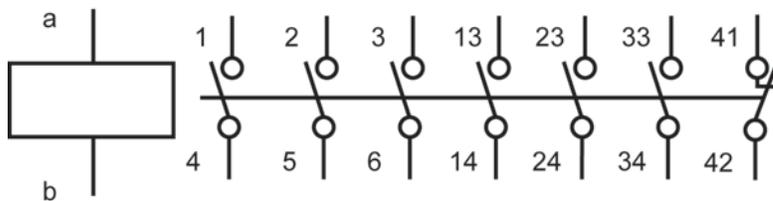


Figura 93

O número de chaves do contator é bem variado e depende do tipo, ou seja, de acordo com o fim a que se destinam as chaves do contator recebem denominações específicas:

Contatos principais: são robustos e se destinam a comandar altos valores de corrente, típicos de motores e outras cargas. São sempre do tipo NA. Sua identificação se faz com números unitários de 1 a 6, normalmente três contatos de entrada e três de saída.

Contatos auxiliares: bem menos robustos, são utilizados para comandar as baixas correntes de funcionamento das bobinas do contator, outras chaves magnéticas, sinalização e/ou alarmes sonoros. Os contatos auxiliares podem ser do tipo NA ou NF. A identificação dos contatos auxiliares se faz com dezenas de final 1 e 2 para os do tipo NF e com 3 e 4 para os do tipo NA. Essa numeração pode aparecer identificando terminais de contatos mesmo que sejam operados por qualquer outro tipo de acionamento, ainda que não seja magnético.

Assim como na utilização de qualquer outro equipamento, sempre obedeça às instruções de placa, isto é, à corrente e tensão de operação e ao valor e tipo (CA ou CC) da tensão de bobina:

- *contator de potência*: é construído apenas com contatos de alta potência;
- *contator auxiliar*: possui somente contatos auxiliares.

Aplicações do contator

1. A primeira aplicação, a mais óbvia, é a *ampliação da capacidade de corrente de um contato*. Em outras palavras, a corrente da bobina de comando é muito menor que a corrente comandada pelos seus contatos, assim se podem acionar cargas com correntes muito elevadas apenas com uma pequena corrente na bobina.
2. *Memorização de acionamento*: por meio de um dos contatos auxiliares, pode-se manter o contator acionado após um acionamento momentâneo da chave que o acionou:

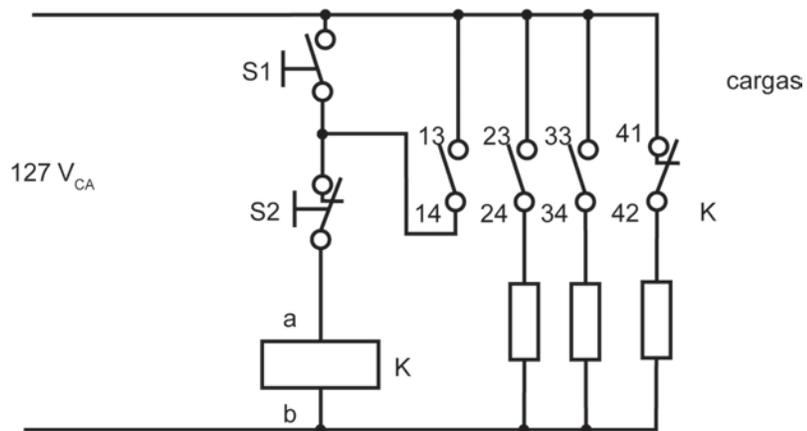


Figura 94

Após o acionamento da chave S1 (“start”, contato NA), as cargas ficarão acionadas como se a chave estivesse acionada, pois os contatos 13-14 manterão o contator acionado mesmo após a abertura da chave 1, até que a alimentação do contator seja desfeita pela chave S2 (“stop”, contato NF), inserido em série com o eletroímã.

3. *Multiplicação de contatos*: uma única chave aciona várias cargas, como no exemplo a seguir, em que S1 liga o eletroímã, que, por sua vez, aciona três cargas:

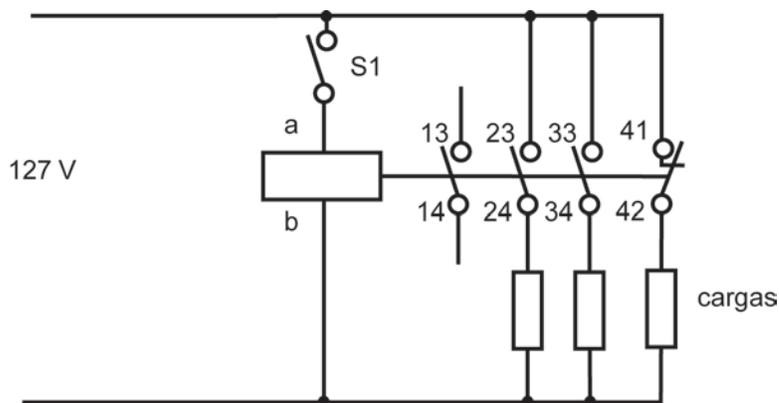


Figura 95

Associações de chaves

Neste tópico, é interessante você se lembrar da seção 2.3.1.5.6, da Unidade 2, “Circuitos digitais básicos”.

Série: faz-se com uma porta E. Associadas em série, as chaves só permitirão o acionamento da carga se todas estiverem fechadas. *Uma aplicação desse tipo de ligação ocorre em prensas industriais, em que o operador só consegue acionar a carga apertando duas chaves, uma com cada mão, ao mesmo tempo:*

A carga só será ligada quando todas as chaves estiverem fechadas, executando a lógica E.

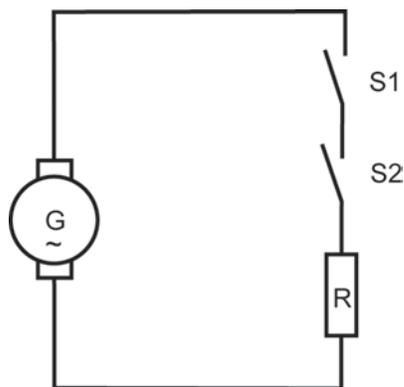


Figura 96

Paralelo: faz-se com uma porta Ou. Associadas em paralelo, as chaves acionarão a carga quando pelo menos uma delas estiver fechada.

A carga só será desligada quando todas as chaves estiverem abertas, executando a lógica Ou.

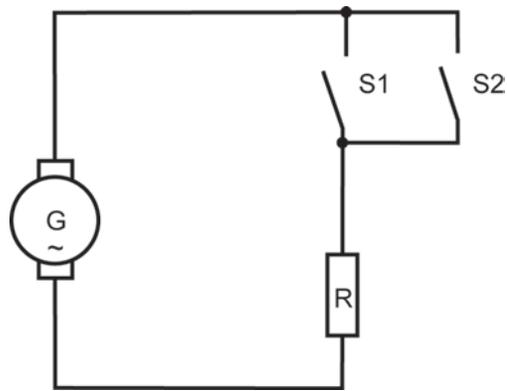


Figura 97

3.3.1.2 Sinalização

A sinalização de eventos é realizada por lâmpadas, buzinas e sirenes.

Lâmpadas são usadas para sinalizar situações normais e anormais, tendo um código de cor para cada tipo de situação:



Figura 98

Tabela 4

Cor	Significado	Explicação
Amarela	Atenção	Alteração de condições normais.
Vermelha	Perigo	Exigência de intervenção imediata na carga (altas temperaturas ou pressões).
Verde	Segurança Circuito desligado	Temperaturas ou pressões normais. A carga pode ser acionada.
Branca	Informação	Qualquer significado que se deseje avisar desde que não seja o das outras cores.

As buzinas e sirenes fazem a sinalização de condições de emergência, como vazamentos de gases, ou servem para dar informações em local onde a sinalização visual seja insuficiente:

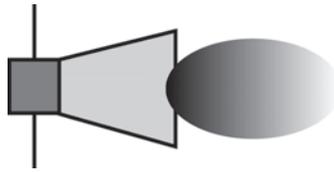


Figura 99

3.3.1.3 Proteção

Os dispositivos de proteção têm por objetivo proteger dos danos de sobrecorrentes (sobrecarga e curto-circuito) os equipamentos e condutores de uma instalação:



Figura 100

São compostos de:

- elemento fusível: é um fio ou fita de uma liga metálica dimensionada para fundir-se quando atravessado por corrente elétrica de determinado valor;
- corpo: feito de material isolante, é resistente a grandes pressões e deve evitar acúmulo de sujeira e umidade (em porcelana vitrificada de preferência, evite o uso de fusíveis de papelão ou plástico em qualquer situação). Serve também para sustentar o elemento fusível e os contatos do fusível. No corpo, há a indicação da corrente de atuação, tensão e seu tipo (rápido ou de retardo);
- areia corta-arco: no corpo dos fusíveis usados em instalações industriais, existe uma areia que tem por função extinguir o arco elétrico formado durante a queima do fusível, pois este está sob carga, e a corrente do arco voltaico pode manter o circuito em funcionamento;
- contatos: devem ser de boa qualidade e evitar oxidação, pois são eles que fazem o contato do elemento fusível com o porta fusível (dispositivo que, fixo no circuito, serve de encaixe para o fusível);
- dispositivo de verificação de queima: serve para evitar que o operador tenha que entrar em contato com o fusível para testá-lo quando queimado (pequeno botão, geralmente vermelho, que se solta do corpo em caso de atuação).

Os fusíveis, de acordo com seu formato e forma de conexão, podem ser:

- **NH** – para circuitos de alta potência e conectados por encaixe por meio do próprio porta-fusíveis, para a proteção do operador.
- **Diazed** – para circuitos de baixa potência e conectados por rosca por meio do porta-fusíveis. O próprio suporte do fusível protege o operador contra choque elétrico.
- **Neozed** – menor que o Diazed, esse fusível é usado para a proteção de circuitos de comando.



Figura 101

Velocidade

O fusível interrompe o circuito segundo uma curva pré-calibrada de sobre-corrente. O tempo de atuação diminui à medida que aumenta o valor relativo da sobrecarga, devendo atuar instantaneamente em curto-circuito.

A velocidade de ação dos fusíveis varia conforme sua aplicação:

- a) *Rápidos*: de atuação rápida, são utilizados em cargas comuns que não tenham corrente de partida alta;
- b) *De retardo*: são utilizados em motores elétricos e outros circuitos que necessitem de uma corrente de partida alta, pois não devem atuar durante os picos de corrente existente nos instantes da partida. Na partida dos motores, há corrente com cerca de oito a dez vezes o valor nominal, porém, caso a corrente se mantenha alta após os instantes iniciais, o fusível de retardo agirá como um rápido.

A escolha do fusível deve ser feita de acordo com a corrente, tensão e velocidade (rápido ou de retardo).

Disjuntores

O disjuntor é um dispositivo eletromecânico (do tipo termomagnético) também utilizado na proteção contra sobrecorrentes, mas com a vantagem de poder ser religado várias vezes, chegando a milhares de vezes e dependendo do

fabricante. Assim, o disjuntor interrompe a corrente de um circuito antes que os efeitos térmicos dessa corrente possam se tornar perigosos ao tal circuito. O disjuntor serve tanto como chave quanto como proteção.

A parte magnética do disjuntor é responsável pela atuação em curtos-circuitos, e a térmica, pela atuação em sobrecargas:



Figura 102

Símbolos

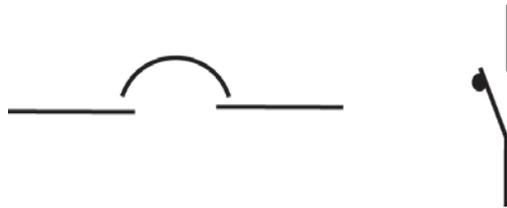


Figura 103

Relés

Os relés são dispositivos que, por meio de seus contatos, atuam no comando de chaves magnéticas de potência. Na verdade, os relés, em sua maioria, são contatores de pequeno porte ou potência.

No caso dos relés térmicos, que atuam sem bobina e se desligam quando existe uma sobrecorrente atuando no circuito, é atribuída a função de proteção. Um relé térmico é constituído, basicamente, de um par bimetálico (como os que controlam a temperatura de ferros de passar roupa), que tem coeficientes de dilatação térmica diferentes. Ao ser aquecido, o par bimetálico se encurva e desliga o circuito:



Figura 104

Par bimetálico atuando no relé térmico.

Símbolos dos relés

Alguns relés têm simbologia própria, como é o caso dos temporizadores e sobrecorrentes térmicos.

Assim como os disjuntores, as chaves desses relés, quando separadas de seu atuador, têm símbolos específicos:

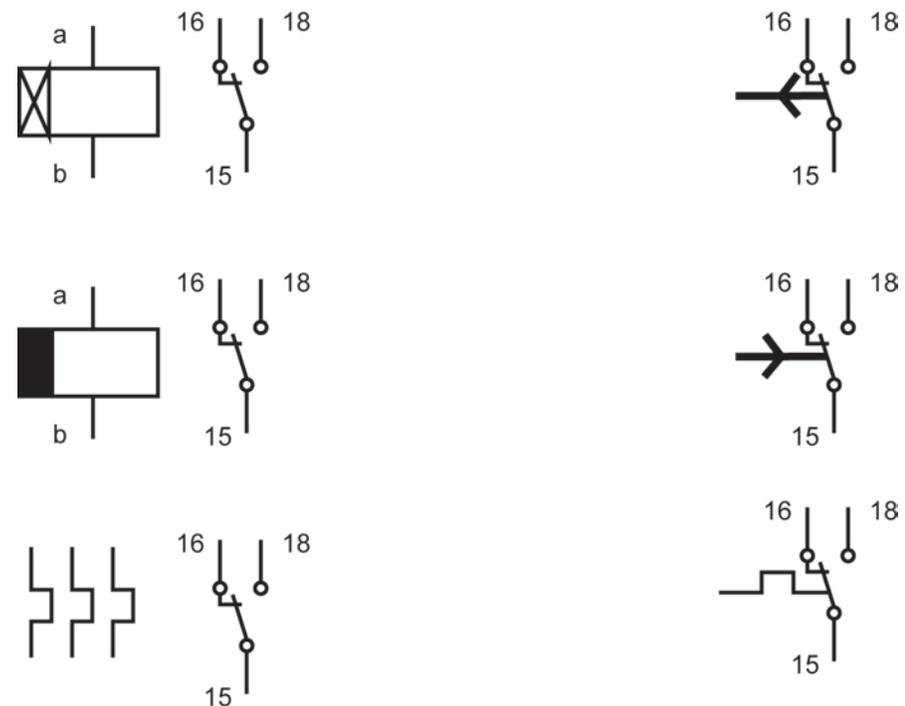


Figura 105

3.3.2 Sistemas simples de comandos

A partir da aplicação da álgebra de Boole, estudada anteriormente, é possível obter não somente a construção dos comandos analisados aqui mas também a sua otimização.

3.3.2.1 Comando de motor trifásico

Com botão de retenção mecânica

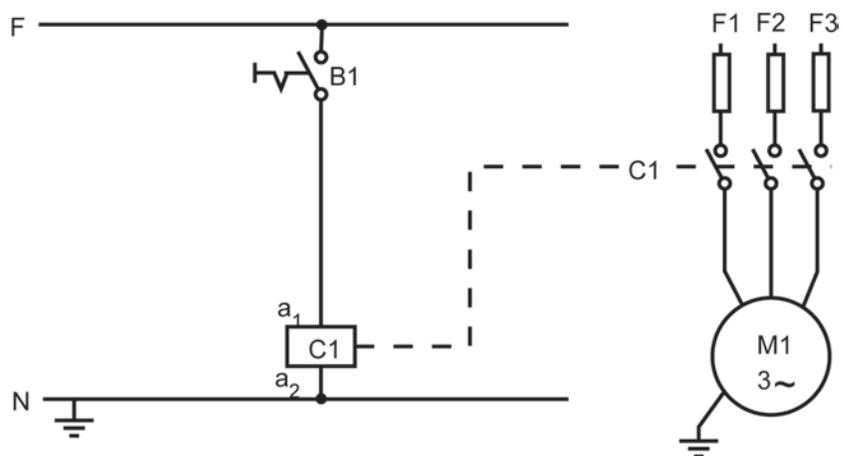


Figura 106

Com autorretenção, sinalização e proteção por relé térmico

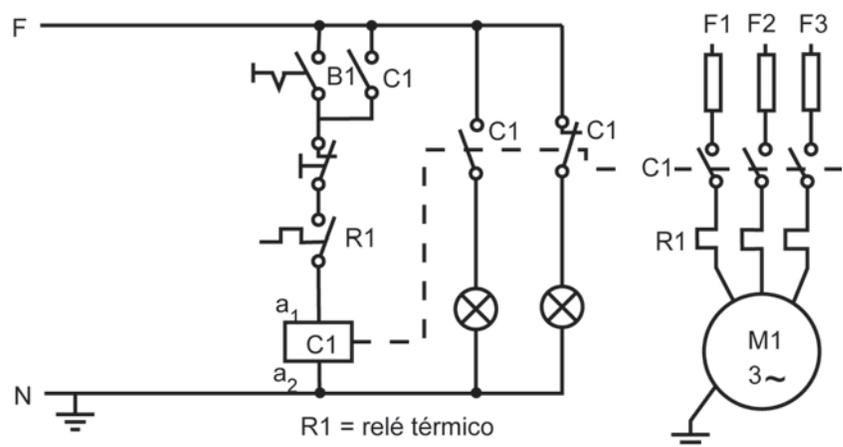


Figura 107

Sistema de controle de nível para chaves de nível com indicação de ligada e desligada

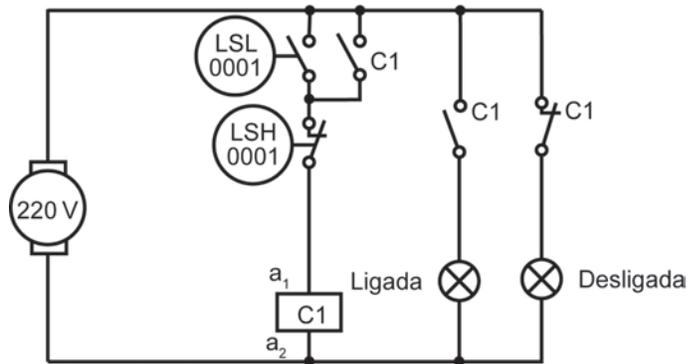


Figura 108

LSL = nível de líquido baixo

LSH = nível de líquido alto

A figura a seguir apresenta um sistema análogo ao anterior, com alarme de nível muito alto intertravado com o acionamento da bomba, impedindo-a de funcionar até que cesse a condição de alarme e haja reconhecimento (LSHH = nível de líquido muito alto):

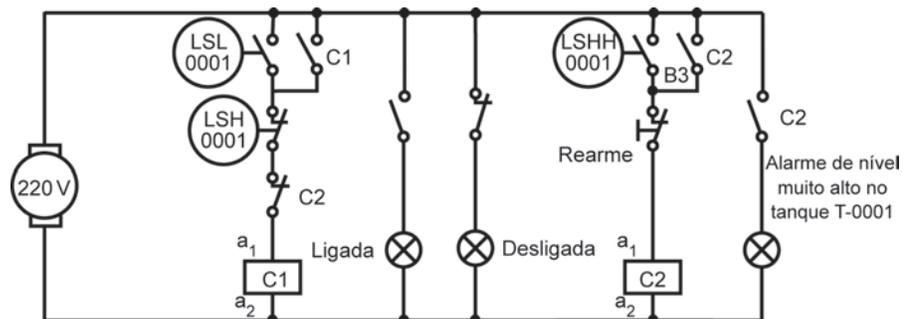


Figura 109

Intertravamento

O termo *intertravamento* indica a forma de interdependência entre chaves magnéticas, mostrada no sistema a seguir.

Sistema 1

Por ação das chaves C2-1 e C1-1, as chaves magnéticas só se manterão ligadas caso sejam simultaneamente acionadas por B1 e B3:

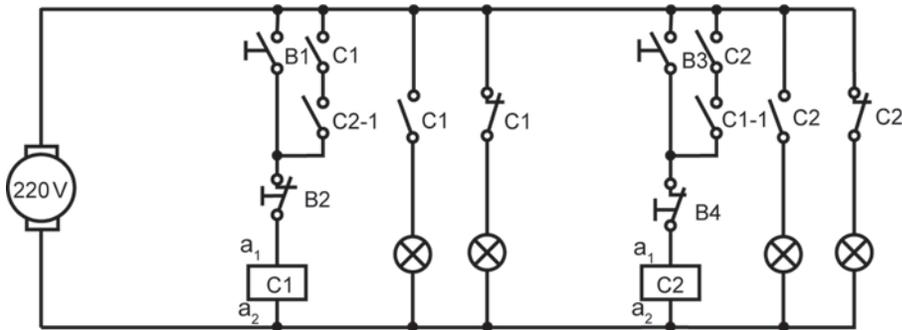


Figura 110

Em instrumentação e automação, intertravamento indica qualquer forma de dependência de um sistema em função de outro.

Sistema 2

Por ação da chave C1-1, a chave magnética C2 só poderá ser ligada por B3 caso a C1 esteja ligada. Mesmo após ligada, a chave magnética C2 se desligará por ação de C1-1 se C1 for desligada por B2:

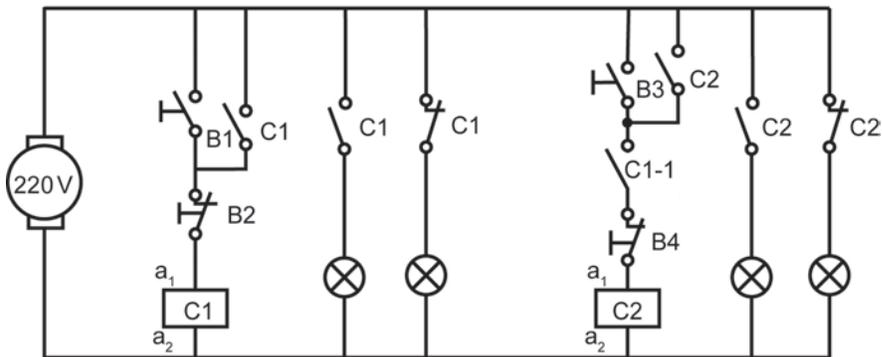


Figura 111

Sistema 3

Por ação da chave C1-1, a chave magnética C2 só poderá ser ligada caso a C1 esteja ligada:

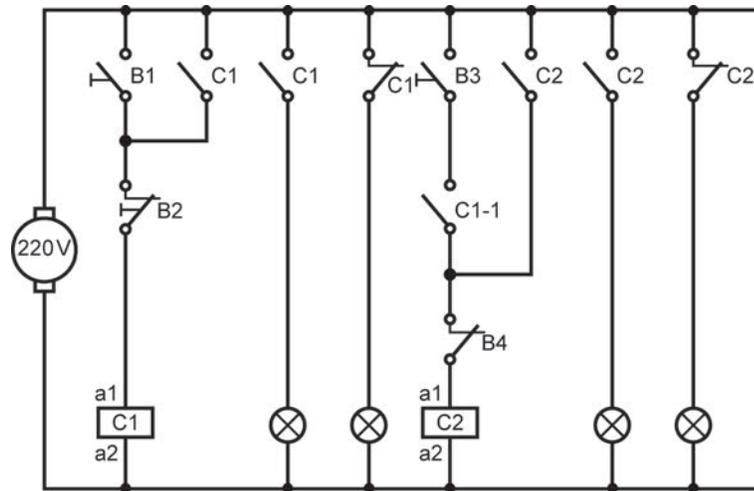


Figura 112

Depois de ligada, entretanto, a chave magnética C2 independe da chave magnética C1.

Sistema 4

Por ação da chave C1-1, a chave magnética C2 só poderá manter-se ligada caso a C1 esteja ligada. No entanto, a chave magnética C2 pode, por B3, ser ligada independentemente do estado da chave magnética C1:

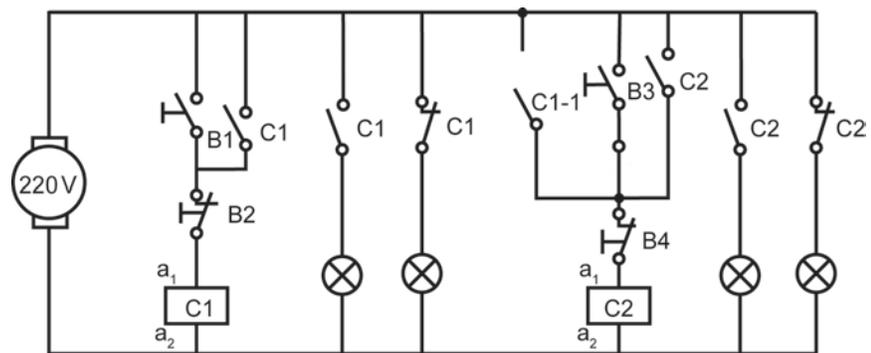


Figura 113

Sistema 5

Por ação das chaves C2-1 e C1-1, as chaves magnéticas só poderão ser ligadas individualmente, sendo necessário que se desligue, por B2 ou B4, a que estiver ligada para que se possa ligar, por B1 ou B3, a outra:

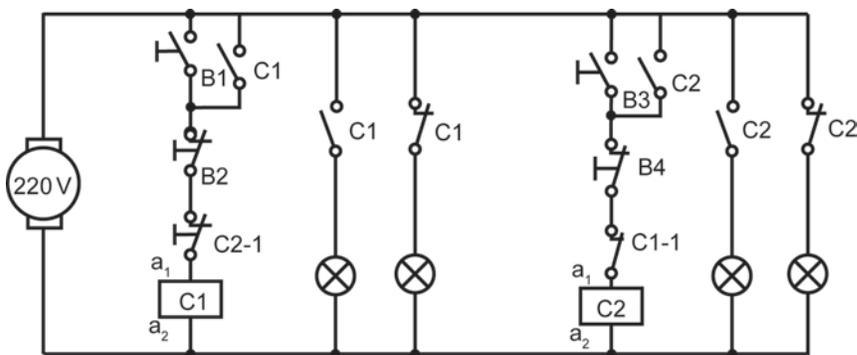


Figura 114

3.3.3 Acionamento e proteção de motores

A partir do exposto anteriormente, sempre obedeça às condições de placa do motor, isto é, à tensão de alimentação, ao número de fases, ao faseamento em trifásico (sentido de giro) e à corrente.

Também sempre utilize todos os meios possíveis de proteção, tais como fusíveis, relés térmicos e outros dispositivos eletrônicos que sintam falta de fase em motores trifásicos.

Um motor deve ser partido sempre com o uso de circuitos com contadores, para que o operador se distancie do perigo.

No caso de dispositivos eletrônicos, o mais importante é o chamado relé de falta de fase, em que o relé é apenas um dos componentes que, no fim, desligarão o circuito quando o dispositivo sentir falta de fase. Basicamente, esse circuito possui dentro de si um comparador, que compara a tensão eficaz do trifásico com uma tensão de referência. Quando existir falta de fase, a tensão do trifásico diminuirá, e o comparador disparará um relé, desligando o sistema que alimenta o motor.

Partidas

Como já informado, a corrente do motor pode chegar a valores de cerca de dez vezes o valor nominal. Em motores de grande porte, esse é um problema sério que deve ser evitado, para que não se produza queda de tensão muito alta na rede elétrica durante a partida.

Uma das formas de solucionar o problema é ligar as bobinas do motor, de modo que elas possam receber tensão menor que a de funcionamento. Por exemplo: se o motor funciona em 220 V, na partida ele pode ser ligado em estrela, de maneira que cada bobina receba 127 V. Depois que o motor atingir pelo menos 75% da rotação nominal, as bobinas passarão para ligação-triângulo. Essa técnica de partida é chamada de estrela-triângulo, y/Δ , como no circuito a seguir:

Circuito-exemplo de partida em estrela-triângulo

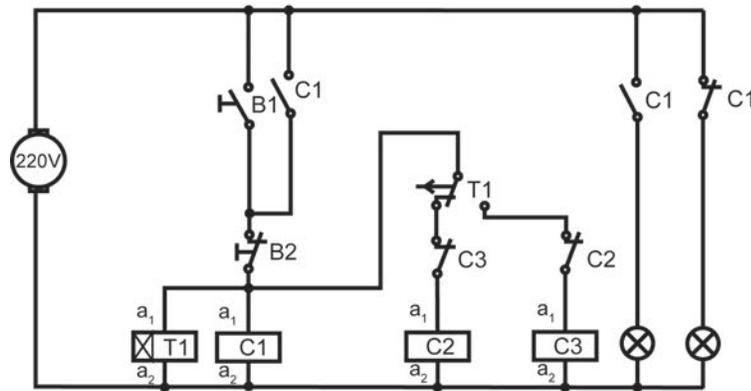


Figura 115

Nessa figura, T1 é um temporizador. Quando B1 é acionado, C2 é acionado também, ligando o motor em estrela (não mostrado aqui). T1 é concomitantemente acionado; após um tempo equivalente a 75% da velocidade nominal, ele atua, desliga C2 e liga C3, mudando a ligação para triângulo.

Estrela (Y): C1 e C2

Triângulo (Δ): C1 e C3

Ligação de motores trifásicos

Os motores trifásicos são fornecidos com seis ou 12 terminais, sendo cada par de terminais referente a uma bobina. Os terminais são numerados de acordo com as figuras adiante.

Ligações em estrela (Y) e em triângulo (Δ)

O motor de seis terminais pode ser ligado em 220 V ou 380 V. O motor de 12 terminais pode ser ligado em 220 V, 380 V, 440 V ou 760 V. A associação das bobinas é que determina a tensão com que o motor pode ser alimentado.

Lembrando o sistema trifásico estudado, na ligação-triângulo (ou Δ) as bobinas recebem a tensão de linha; já na ligação em estrela (ou y), elas recebem a tensão de fase (tensão de linha dividida por $\sqrt{3}$).

As bobinas do motor de seis terminais podem ser associadas em triângulo, para funcionar em 220 V, ou em estrela, para funcionar em 380 V ou partir de 220 V.

As bobinas do motor de 12 terminais podem ser ligadas de diversas formas: triângulo paralelo (220 V), estrela paralelo (380 V), triângulo série (440 V) e estrela série (760 V).

Como você pode observar, em paralelo as tensões são as mesmas do motor de seis terminais; em série, elas são dobradas:

Ligação de motores de seis terminais

Terminais de alimentação: 1, 2 e 3

Ligação em triângulo

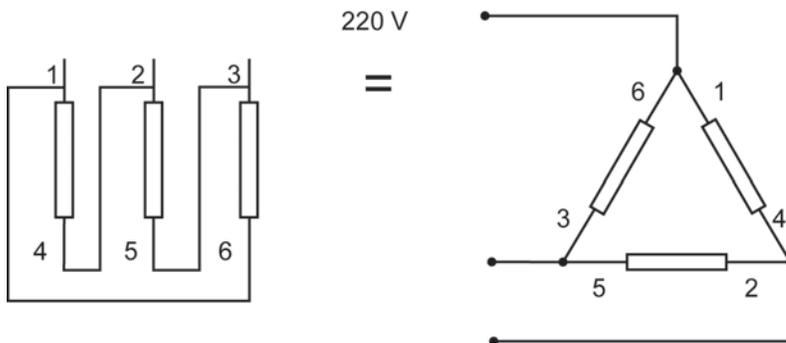


Figura 116

Ligação em estrela

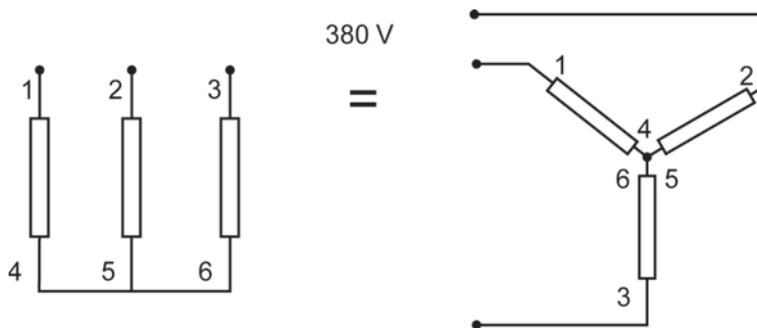


Figura 117

Ligação do motor de 12 terminais

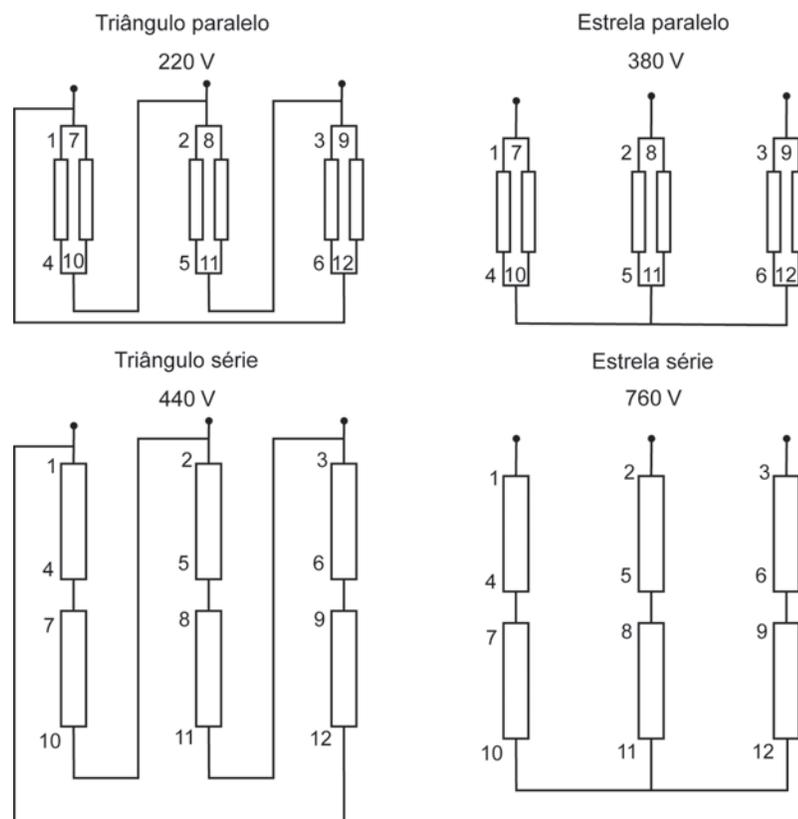


Figura 118

3.4 Considerações finais (resumo)

Como você viu, aprendemos a controlar cargas. Os esquemas anteriormente apresentados são exemplos práticos de como realizar a ligação de motores. Além disso, as noções acerca dos vários tipos de chave dão condições para que você possa montar os seus próprios circuitos, utilizando os conceitos da álgebra de Boole aprendidos na unidade anterior. Você viu também que a sinalização e a proteção são muito importantes.

3.5 Atividades individuais

Estas atividades devem ser realizadas individualmente e têm como objetivo fixar os conhecimentos adquiridos ao longo deste texto.

3.5.1 Exercício proposto

1. Descreva o funcionamento:

- a) do sistema de controle de nível para chaves de nível com indicação de ligada e desligada;
- b) dos sistemas de intertravamento 1 e 5;
- c) do circuito-exemplo de partida em estrela-triângulo.

3.6 Estudos complementares

Caso você tenha tempo e deseje aprender mais, a seguir estão algumas sugestões.

3.6.1 Saiba mais

- Contatores e relés:

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Contactor>>

<<http://en.wikipedia.org/wiki/Contactor>>

<<http://en.wikipedia.org/wiki/Relay>>

- Fusíveis e disjuntores:

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fusível>>

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Disjuntor>>

Pesquise também nos links relacionados.

3.6.2 Referências bibliográficas

ARNOLD, R. *Fundamentos de eletrotécnica*. São Paulo: Pedagógica Universitária, 1975.

ARNOLD, R.; STEHR, W. *Máquinas elétricas*. São Paulo: Pedagógica Universitária, 1975.

CLOSE, C. M. *Circuitos lineares*. São Paulo: Edusp; LTC, 1975. v. 1-2.

COTRIM, A. A. M. B. *Instalações elétricas*. São Paulo: McGraw-Hill, 1992.

DAWES, C. L. *Curso de eletrotécnica: corrente alternada*. Porto Alegre: Globo, 1981. v. 2.

MARTIGNONI, A. *Transformadores*. Porto Alegre: Globo, 1973.

NEWMAN, D. G. *Circuits analysis*. São José: Engineering Press Inc., 1986.

SCHILLING, D. L.; BELOVE, C.; CASABO, J. C. *Circuitos eletrônicos discretos e integrados*. Barcelona: Marcombo, 1973.

UNIDADE 4

Automação e controle

4.1 Primeiras palavras

Finalmente, chegamos à última etapa do curso. Nesta unidade, aprenderemos o básico de instrumentação, medição e controle, aos quais devem ser aplicados os conceitos da Unidade 2, pois os sensores analisados aqui necessitam de amplificação para atuar ou ser lidos por um computador. Também caracterizaremos os sistemas de medição, analisaremos os sistemas de automação e, por fim, estudaremos os inversores de frequência e controle eletrônico de velocidade de motores elétricos.

4.2 Problematizando o tema

Você já deve ter tido contato diário com alguns dos itens analisados nesta unidade: um sistema detector de incêndio possui um sensor de temperatura/fumaça que liga a bomba de incêndio de forma automática; o seu carro, quando a luz de temperatura do motor acende, possui um transdutor que converte a temperatura em um sinal elétrico; o seu ferro de passar roupas, assim como a sua geladeira, possui um sistema simples de controle de temperatura. Como você consegue observar, seu mundo é cheio de sensores, transdutores e controles, para que as coisas possam acontecer automaticamente.

4.3 Texto básico para estudo

Neste tópico, vamos revisar os seguintes conceitos: esquema conceitual de instrumentos de medição e controle, caracterização de sistemas de medição, princípios de instrumentação, sensores de proximidade, sistemas de automação, inversores de frequência e fontes de tensão inversora com PWM. Todos esses tópicos estão intimamente interligados às unidades já estudadas. Esta unidade é extremamente dependente das anteriores.

4.3.1 Esquema conceitual de instrumentos de medição e controle

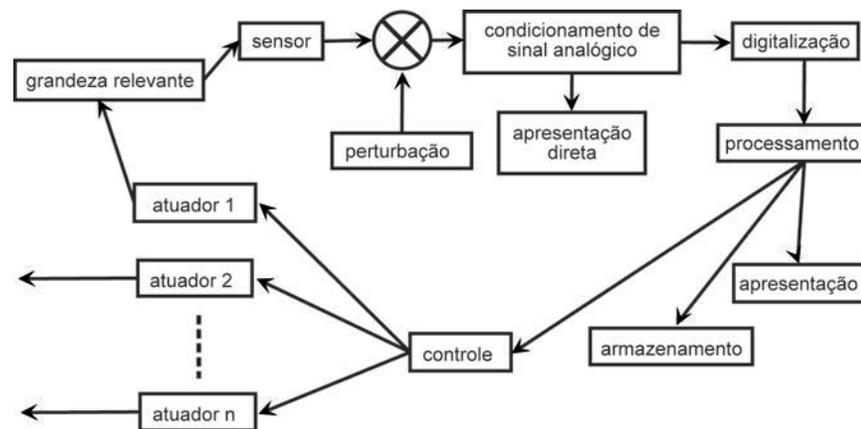


Figura 119

Esse esquema mostra apenas um parâmetro sendo medido e processado. Em sistemas complexos, várias grandezas são avaliadas e controladas simultaneamente, podendo inclusive levar a situações de conflito que devem ser consideradas pelo projetista.

4.3.2 Caracterização de um sistema de medição

Transdutor

Dispositivo que transforma uma grandeza de saída em outra (ou a mesma) e tem uma correlação direta com a grandeza de entrada.

Exemplos:

- termopar (temperatura em voltagem);
- transformador de corrente (tensão em corrente);
- extensômetro resistivo (“strain gauge” – deformação e voltagem).

Sensor

Parte de um instrumento de medição ou sistema de medição que é diretamente afetada pelo parâmetro de medida. Um sensor industrial é um dispositivo que altera a condição de condução de seu circuito de saída em função da mudança da variável física para a qual foi fabricado.

Exemplos:

- termopar;

- medidor de vazão;
- boia de nível.

4.3.2.1 Análise de um sistema de medição

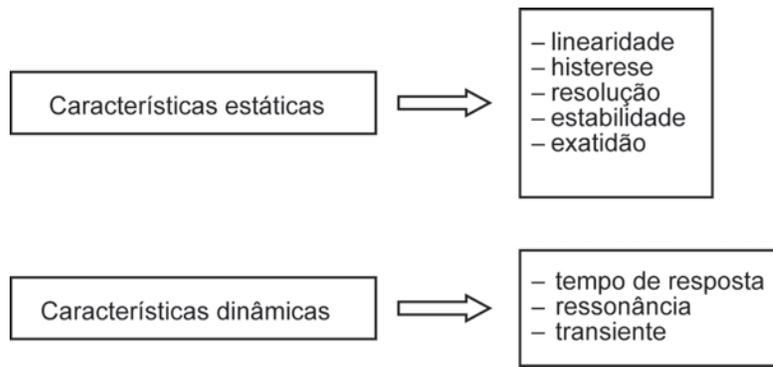


Figura 120

Observação: de forma geral, costuma-se definir a resposta em frequência do sistema como sendo o tempo de resposta às ressonâncias coletivamente.

4.3.3 Instrumentação

Transdutores

Serão analisadas apenas as características elétricas de duas classes de transdutores: termopares e extensômetros resistivos ("strain gauges"). Esses transdutores foram escolhidos em decorrência da grande variedade de aplicações em diversas áreas da Engenharia. Quanto às outras classes, daremos uma breve descrição.

Detalhes de calibração ou qualquer discussão mais cuidadosa sobre níveis de incerteza não serão apresentados, mas apenas uma visão geral da obtenção prática de medidas que podem ser integradas a um equipamento.

Como se observará a seguir, existe a necessidade de amplificação dos sinais provenientes desses sensores (lembre-se da Unidade 2). A partir dos pequenos sinais fornecidos pelos sensores e amplificando-se os valores a serem mensurados, tais sinais tornam-se de fácil obtenção e possibilitam a sua utilização em equipamentos de laboratório de baixo custo.

Exemplos de transdutores

Eletromecânicos – atuadores (como os motores, convertem energia elétrica em energia mecânica), relés (convertem energia elétrica em energia mecânica a movimento do contato) e sensores piezelétricos (convertem tensão proporcional à pressão mecânica exercida sobre eles ou vibração mecânica proporcional à tensão aplicada sobre eles):



Figura 121

Eletroacústicos – alto-falantes (convertem energia elétrica em energia acústica), microfones (convertem energia acústica em sinal elétrico) e cristais piezelétricos:

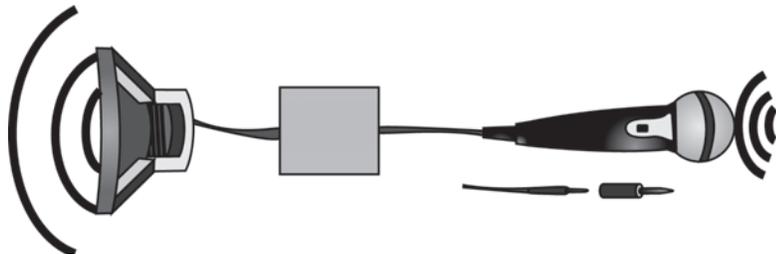


Figura 122

Fotoelétricos – convertem sinais elétricos em luz: os diodos emissores de luz (LED) convertem luz em sinal elétrico; fototransistores convertem luz em energia elétrica; e células solares:



Figura 123

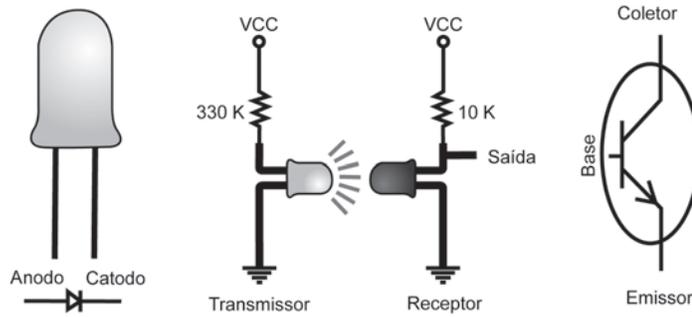


Figura 124

Eletromagnéticos – antenas (convertem corrente elétrica alternada em campo eletromagnético ou campo eletromagnético em sinal elétrico):



Antena

Figura 125

Magnéticos – sensores de efeito Hall (tensão proporcional ao campo magnético aplicado):

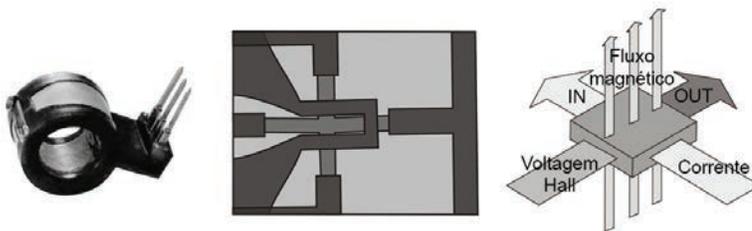


Figura 126

Termoelétricos – termopares (convertem temperatura em tensão), termistores (PTC e NTC – resistência proporcional à temperatura):

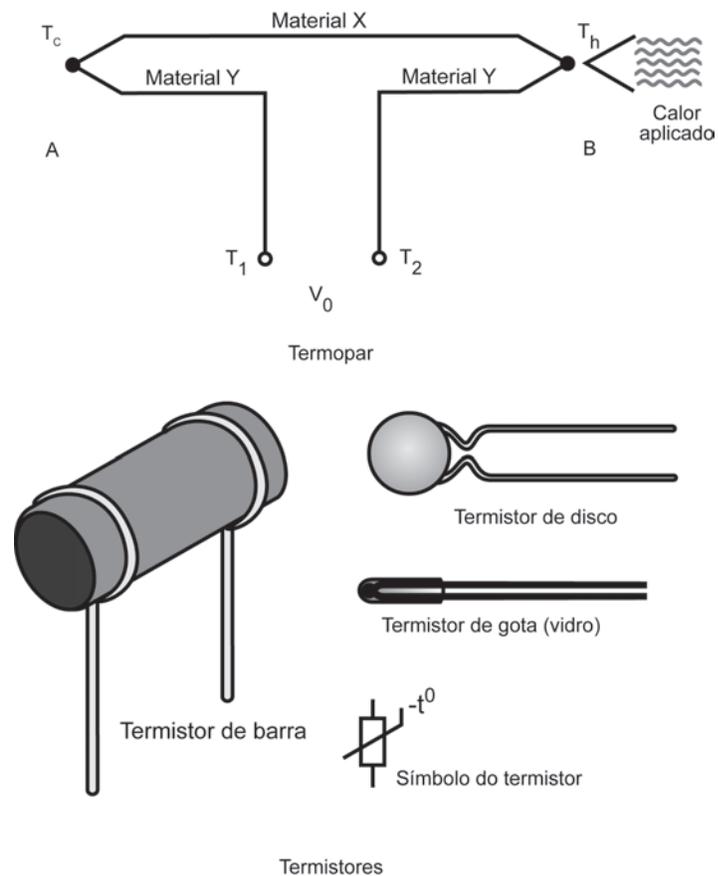


Figura 127

Termopares

São formados da junção de elementos metálicos diferentes, que, em virtude de suas propriedades elétricas, geram uma diferença de potencial dependente da temperatura. Essa dependência é tabelada para os diversos tipos de par de metais (termopares).

Conforme a tabela a seguir, existem vários tipos de termopar, cada um deles adequado a uma faixa de temperatura que se deseja medir:

Tabela 5

Tipo	Termoelementos	Faixa de temperatura	Milivoltagem de saída
K	(Cromel / Alumel)	-270 °C a 1200 °C	-6,458 mV a 48,838 mV
E	(Cromel / Constantan)	-270 °C a 1000 °C	-9,835 mV a 76,373 mV
J	(Ferro / Constantan)	-210 °C a 760 °C	-8,096 mV a 42,919 mV
N	(Nicrosil / Nisil)	-270 °C a 1300 °C	-3,345 mV a 99,862 mV
B	(Platina / Ródio-Platina)	0 °C a 1820 °C	0,000 mV a 13,820 mV
R	(Platina / Ródio-Platina)	-50 °C a 1768 °C	-0,226 mV a 21,101 mV
S	(Platina / Ródio-Platina)	-50 °C a 1768 °C	-0,236 mV a 18,693 mV
T	(Cobre / Constantan)	-270 °C a 400 °C	-6,258 mV a 20,872 mV

Para evitar erro de medidas, podem e devem ser usados cabos de compensação, que eliminam os efeitos da junta de contato (junta fria) entre os metais do termopar e os metais do equipamento de medida, que estarão à temperatura ambiente e gerarão uma diferença de potencial. Também se pode lançar mão de termopares de referência, que compensam a junta fria, corrigindo possíveis erros de medida:

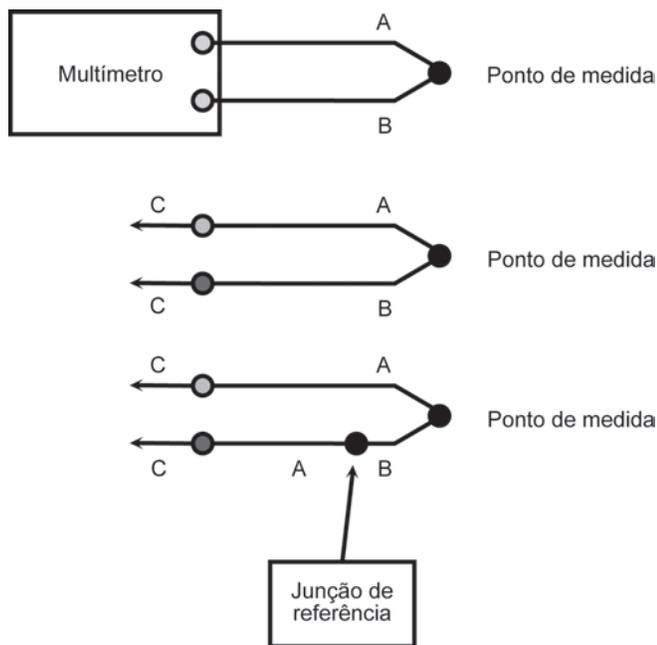


Figura 128

Na primeira e segunda configurações, teríamos um erro de medida equivalente à temperatura ambiente, provocado pela junta fria entre os metais do termopar e os contatos do multímetro (metais diferentes geram diferentes junções). Em outras palavras, a formação de um termopar A+C e de um B+C, com diferentes características, gera uma milivoltagem entre os terminais do

multímetro mais a milivoltagem do termopar. No terceiro caso, teríamos o mesmo fio A interagindo com os fios C do multímetro e compensando a diferença de potencial gerada.

Extensômetro resistivo (“Strain gauge”)

É um sensor de deformação usado diretamente em peças, para a avaliação de deformações superficiais e falhas de sistemas mecânicos ou diversos sistemas de medida mecânicos, podendo ser utilizado como transdutor para medidas de grandeza, tais como pressão, força e aceleração.

O funcionamento do “strain gauge” baseia-se na variação da resistência de um material metálico depositado em um filme polimérico, que pode ser colado à superfície sob análise. Ao ser deformado, o valor da resistência varia de forma conhecida, indicando, assim, a deformação da superfície. Existem dois valores padronizados de resistência: 1205 Ω e 350 Ω :

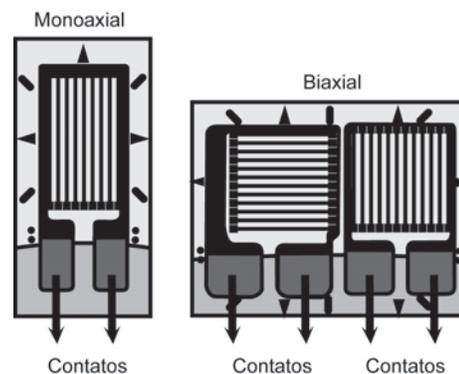


Figura 129

4.3.4 Sensores de proximidade

Nos sensores de proximidade, a variável física é exatamente a proximidade de algum objeto biológico ou não. De acordo com o princípio utilizado para perceber a proximidade do objeto, o sensor pode ser:

- indutivo: proximidade de metais;
- capacitivo: proximidade de qualquer material;
- magnético: proximidade de fluxo magnético;
- óptico: proximidade de objetos que possam interferir em um feixe luminoso com o qual trabalham.

Aspecto

Sensor de corpo tubular



Figura 130

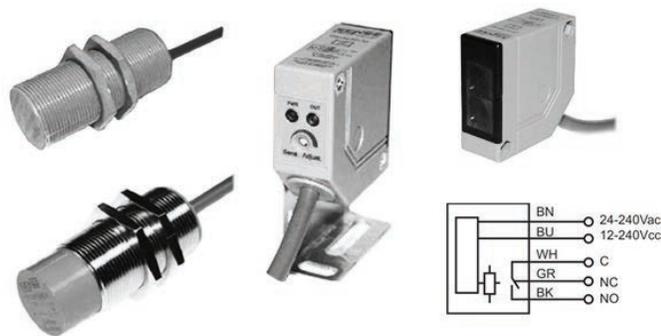


Figura 131

Símbolos

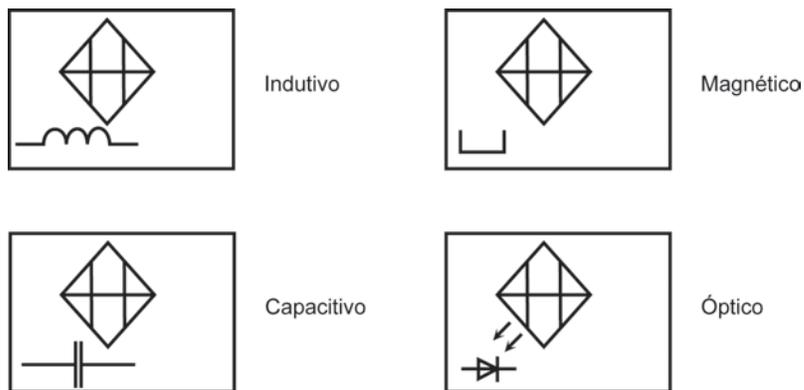


Figura 132

Sensor indutivo/magnético

É formado de um circuito eletrônico sensível a alterações de um campo magnético produzido por um indutor interno. Tais alterações são produzidas pela proximidade de metais, e a alteração do campo chaveará o sinal de saída; assim, esses sensores percebem a aproximação somente de metais:

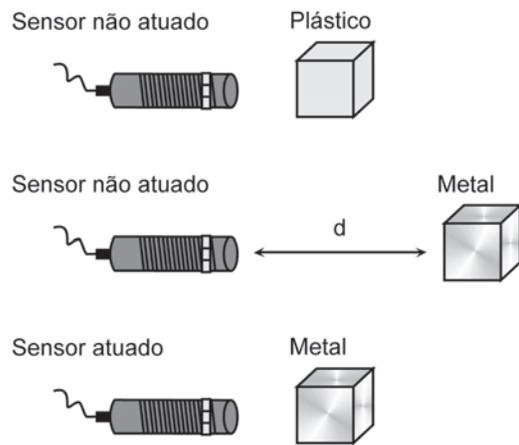


Figura 133

Sensor capacitivo

É formado de um circuito eletrônico sensível a alterações de um campo elétrico produzido por um capacitor interno. Tais alterações são produzidas pela proximidade de qualquer tipo de material (não gasoso), e a alteração do campo chaveará o sinal de saída; assim, esses sensores percebem a aproximação de qualquer tipo de material:

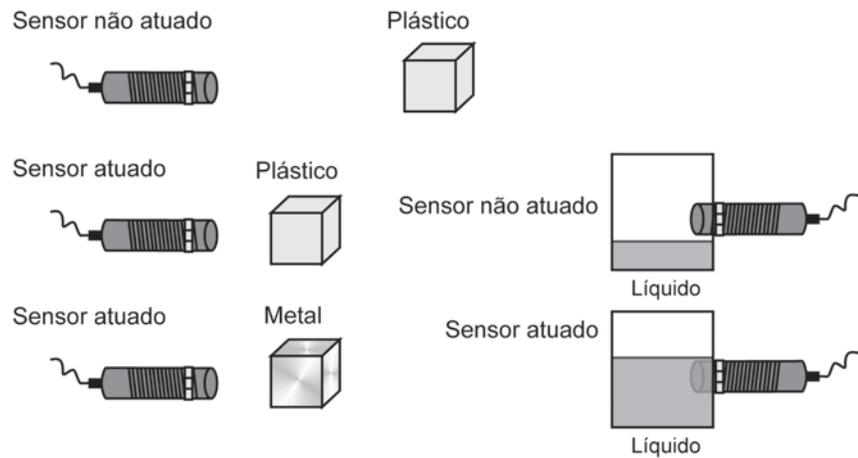


Figura 134

Sensor óptico

É formado de um circuito eletrônico sensível a alterações de um fluxo luminoso que atinge seu elemento fotossensível. Tais alterações são produzidas pela proximidade de qualquer tipo de material (não gasoso), que mudam, de alguma forma, o caminho do fluxo luminoso. A alteração do fluxo luminoso chaveará o sinal de saída; assim, esses sensores percebem a aproximação de qualquer tipo de material:

Tipo barreira

A fonte luminosa encontra-se posicionada separada do elemento sensível, que mantém a saída do sensor atuada enquanto o fluxo luminoso o atingir.

A saída é chaveada quando algum objeto se transforma numa barreira que interrompe o fluxo luminoso, de modo que os sensores percebam a aproximação de qualquer tipo de material:

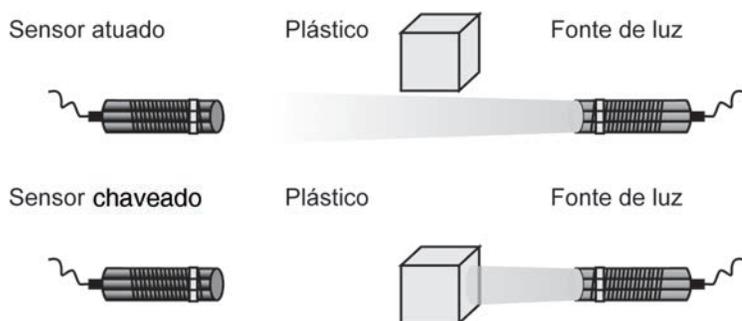


Figura 135

Tipo reflexivo

A fonte de luz é gerada no próprio sensor e é posicionada ao lado do elemento sensível, na mesma unidade, de forma que o feixe luminoso só atinja o elemento sensível se houver reflexão. Essa reflexão é conseguida por um espelho posicionado à frente do sensor. Assim, o elemento sensível sempre é atingido, exceto quando algum objeto é posicionado entre o sensor e o espelho ou entre o feixe de luz e o espelho:

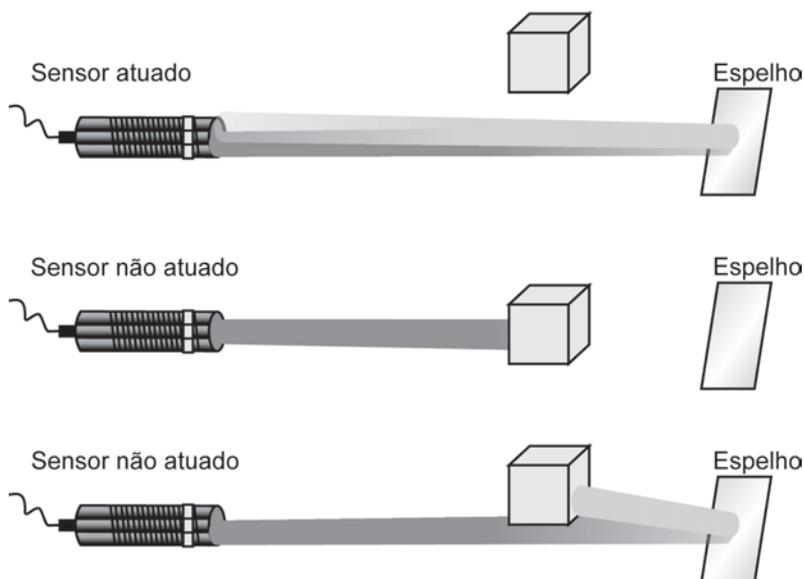


Figura 136

Tipo reflexivo por difusão

Da mesma forma que no caso anterior, a fonte de luz é gerada no próprio sensor e é posicionada ao lado do elemento sensível, na mesma unidade, de maneira que o feixe luminoso só atinja o elemento sensível se houver reflexão. Essa reflexão é conseguida por qualquer objeto que não seja absolutamente opaco posicionado à frente do sensor. Assim, o elemento sensível será atingido apenas quando algum objeto for posicionado à frente do sensor:

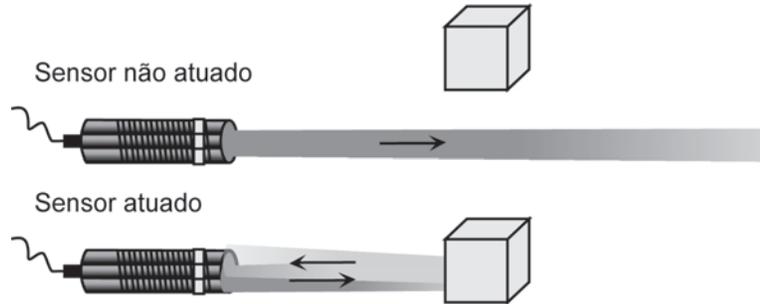


Figura 137

Formas de ligação

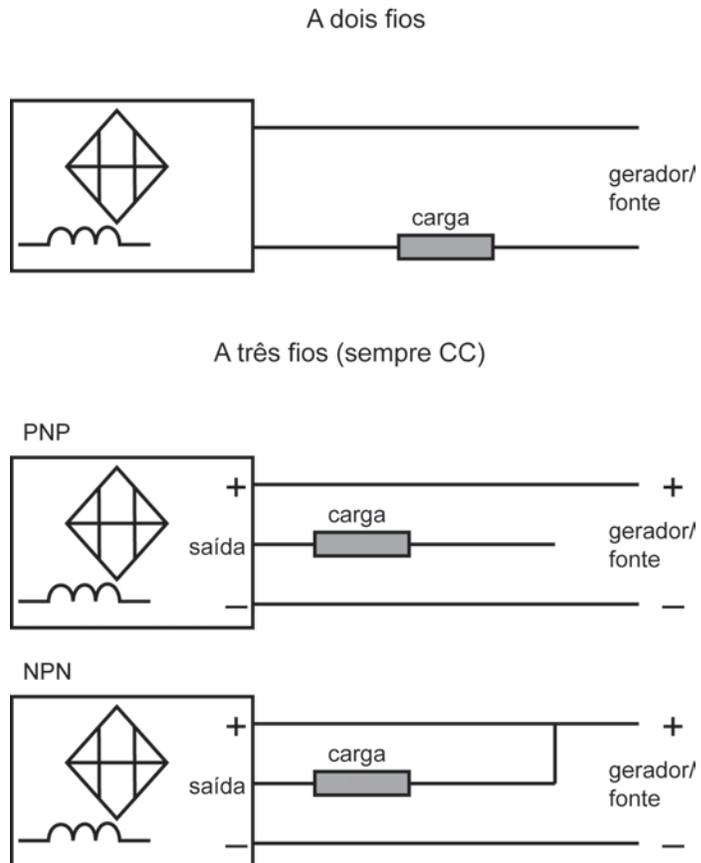


Figura 138

4.3.5 Sistema de automação

Em muitos processos, domésticos ou industriais, existe a necessidade de manter um ou mais parâmetros estáveis ou ainda dentro de certa faixa de variação. Esses parâmetros podem ser os mais variados: pressão de um líquido ou gás, rotação de um motor, temperatura de algum ambiente, tensões (compressivas, trativas, de torque etc.) em uma máquina etc.

No caso da necessidade de manter algum parâmetro dentro de uma faixa de valores, comumente se utiliza um controle do tipo liga-desliga. O mais simples deles é o termostato, que pode ser utilizado num ferro de passar roupa, numa geladeira e também em muitos equipamentos industriais e comerciais. Entretanto, esse tipo de controle possui suas limitações, ou seja, quando existem exigências quanto à precisão, à estabilidade e a outros parâmetros, esse tipo de controle não é adequado.

O controle PID (Proporcional-Integral-Diferencial) é a forma mais refinada de controle, sendo utilizada quando as formas mais simples se mostram ineficientes.

4.3.5.1 Princípios e definições básicas

“Setpoint”: variável aplicada no controlador que define o valor desejado para a variável do processo;

Variável do processo: variável que é fornecida pelo processo e é aplicada no controlador para comparação com o valor desejado (“setpoint”). É também chamada de *medida* (temperatura, pressão, movimento etc.);

Variável de controle: variável que é fornecida pelo controlador e é aplicada no processo para ajustar o parâmetro que se deseja controlar, cujo resultado será dado pela variável do processo.

Atualmente, os controles são quase todos operados por circuitos eletrônicos; assim, essas variáveis podem ser entendidas como valores de tensão ou correntes elétricas.

Exemplo:

Controle de temperatura resistivo utilizado para aquecimento: o “setpoint”, a temperatura que se deseja atingir, seria uma fonte de tensão ajustável proporcionalmente à temperatura de um sensor. A variável do processo seria uma tensão obtida por um termorresistor ou semicondutor sensível à temperatura, ou ainda um termopar, colocado no local do processo com as resistências ou

objeto denso aquecido. A variável de controle seria uma tensão fornecida pelo controlador, que comandaria um circuito de potência, provavelmente com tiristores, para controlar a potência de aquecimento (a corrente nos resistores de aquecimento) e, conseqüentemente, a temperatura do processo.

Princípios e definições básicas

Controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

- “*Setpoint*” (*SP*): valor desejado na saída;
- “*Off-set*”: desvio entre o valor desejado e o real;
- *PV*: valor do processo;
- *Ação proporcional (P)*: a ação de entrada é proporcional ao desvio da saída (sempre existirá um “off-set”);
- *Ação integral (I)*: tenta garantir o SP (muitas oscilações antes de atingir o SP);
- *Ação derivativa (D)*: resposta imediata ao desvio da saída (variações muito bruscas quando ocorre o desvio);
- *Banda proporcional*: faixa de atuação de I e D em torno do SP.

O controle “on-off” é a outra opção (não se estabiliza nunca, fica oscilando em torno do SP).

4.3.5.2 Diagramas e equações básicas do PID

O princípio básico é a comparação: *variável do processo* – “*setpoint*” = *e* (erro).

Se *e* for igual a 0 (zero) e constante, não haverá o que fazer. Caso contrário, significa uma alteração no processo ou “*setpoint*”, e o controlador deverá fornecer valores para a variável de controle, de forma a tornar o erro novamente nulo.

No diagrama da figura a seguir, pode-se observar que a variável de controle é a soma de três parcelas:

Proporcional: dada pelo produto do erro pelo ganho (*G_e*). É ajustável, mas, usualmente, em termos de *banda proporcional dada pela relação*: ganho = 100% / banda proporcional;

Integral: $G \int R \, dt$, em que o fator *R* é ajustável, em *repetições por minuto*;

Diferencial: $G D \, de/dt$, em que o fator *D* é ajustável, em *minutos*.

O controle pode ser considerado uma evolução cumulativa das parcelas: P (somente proporcional), PI (proporcional e integral) e PID (proporcional, integral e diferencial).

Nos tópicos seguintes, serão realizadas as análises de cada uma dessas parcelas:

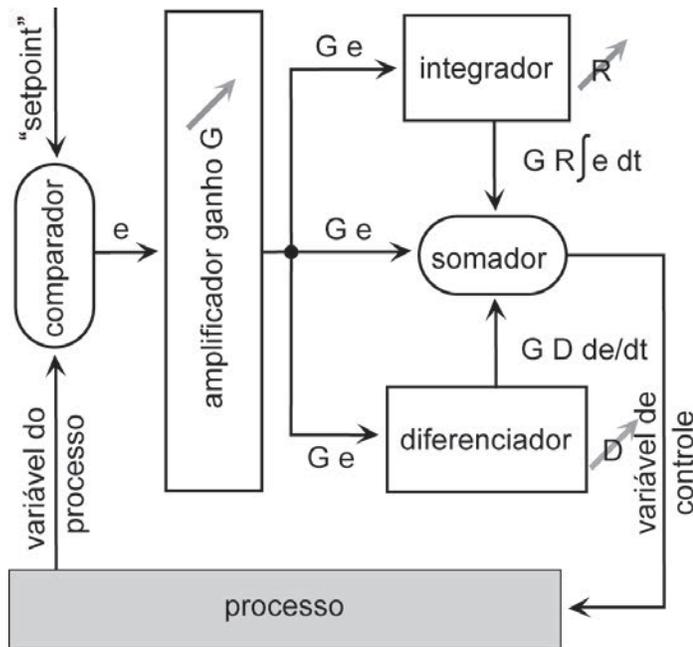


Figura 139

4.3.5.2.1 Controle PID

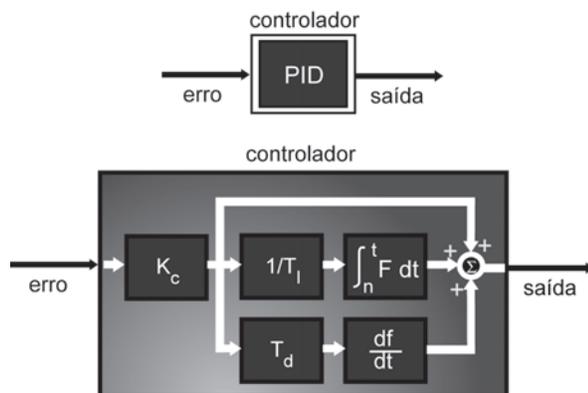


Figura 140

Comparação entre os métodos

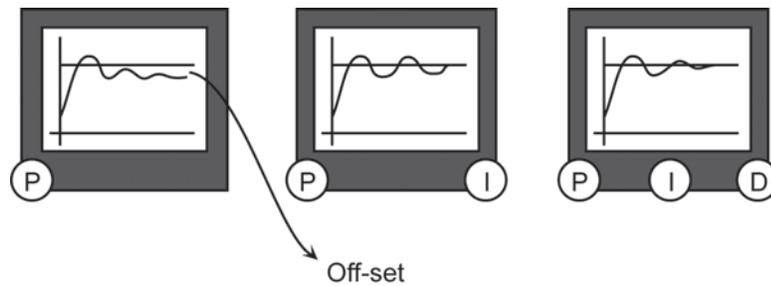


Figura 141

Em um controle PID bem ajustado, observa-se que o parâmetro de controle alcança rapidamente o “setpoint”, com um pequeno “overshoot” (pico acima do “setpoint”) e uma célere oscilação. Em alguns casos, isso não pode acontecer, como no do controle de temperatura, mas, no dos motores, esse fato é até desejável, pois a velocidade, rapidamente, alcança o valor programado e também se ajusta.

4.3.5.2.2 Sintonia PID

Nos controladores modernos, o ajuste dos parâmetros de controle, normalmente, é feito de maneira automática. Às vezes, é necessário o ajuste manual, que pode ser mais adequado que o automático. Para ajustar manualmente os parâmetros de controle em P, PI ou PID, devem-se desligar o modo I e o modo D, colocar o “setpoint” na metade do valor máximo a ser atingido (por segurança) e ajustar a banda proporcional (K_c) até que o sistema comece a responder com uma oscilação sustentada, conforme a figura a seguir. Após esse procedimento, mede-se o período (P_u) com um cronômetro ou osciloscópio e, finalmente, lê-se o valor de K_c (K_u). Em seguida, utiliza-se a tabela a seguir para ajustar os parâmetros do controlador na condição desejada: controle proporcional (P), controle proporcional e integral (PI) ou controle proporcional/integral/diferencial (PID):

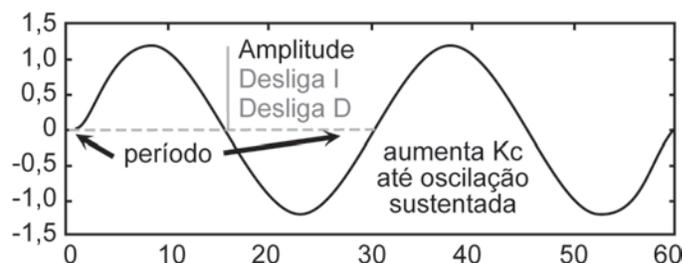


Figura 142

Equações para o ajuste dos parâmetros de um controlador

	K_C	t_i	t_D
P control	$K_U/2$		
PI control	$K_U/2.2$	$P_U/1.2$	
PID control	$K_U/1.7$	$P_U/2$	$P_U/8$

Figura 143

4.3.5.3 Idade tecnológica

Quando atualizar o nível de automação?

A sofisticação da instrumentação da planta (atuadores, sensores e controladores) é função da sua “idade tecnológica”.

O valor agregado ao produto pelo processo determina o incentivo econômico para o seu nível de automação:

Pirâmide de controle

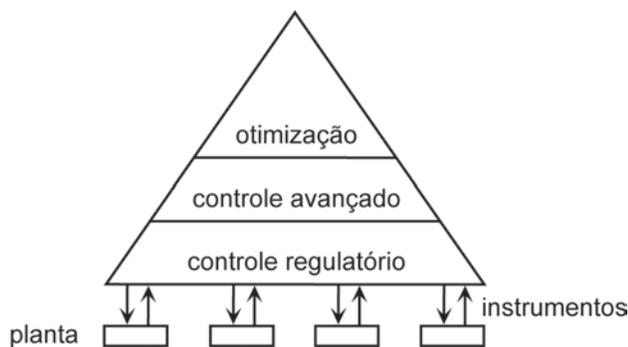


Figura 144

4.3.6 Inversores de frequência

O inversor de frequência é um circuito eletrônico capaz de alimentar um motor, recebendo alimentação alternada, com tensão de frequência diferente da original e, com isso, modificar a velocidade do motor assíncrono ou síncrono (também no caso de servomotores), que aumenta com o progresso da frequência.

O inversor aumenta a frequência de alimentação do motor no caso de aumento de carga e, assim, compensa o escorregamento, mantendo a velocidade.

Além de modificar a frequência, os inversores modificam a amplitude da tensão, pois, com a variação da frequência, há variação em sentido contrário tanto da corrente quanto do torque. Por isso, o inversor compensa a diminuição da frequência com a diminuição da tensão, para limitar o valor de corrente, e compensa o aumento da frequência com o aumento da tensão, para evitar a perda de torque.

Os inversores de frequência modernos baseiam-se em um componente eletrônico chamado IGBT – um tipo de transístor bipolar com corrente de controle de valor praticamente nulo, alta capacidade de condução da corrente principal e alta velocidade de comutação, o que lhe garante a possibilidade de desligar o motor em caso de curto antes que a corrente possa danificar a fonte que alimenta o inversor ou o próprio inversor.

Nesses inversores de frequência, a tensão trifásica recebida é retificada e filtrada, produzindo tensão contínua, que alimenta, então, um circuito inversor. O inversor produz as três fases que alimentarão o motor, de forma que, mesmo que falte uma das fases de alimentação do inversor, o motor possa continuar a funcionar, dependendo da potência exigida.

Os inversores de frequência alimentam o motor trifásico com três fases produzidas eletronicamente, de modo que, se, na alimentação trifásica do inversor, faltar uma fase, o motor continue recebendo as três fases, para sua alimentação. A sofisticação do inversor de frequência garante a proteção do motor contra falta de fase, sobre e subtensão, sobrecorrente e sobretemperatura mediante sensor.

O inversor encarrega-se também do controle da corrente de partida.

Com inversores de frequência, pode-se ainda fazer o motor partir ou parar com aceleração predeterminada (mesmo com carga, pois o inversor, para parar o motor, não apenas tira a alimentação do motor mas também o alimenta adequadamente, de forma a freá-lo).

4.3.6.1 Conversão de energia

O inversor de frequência efetua a conversão da energia disponível na rede elétrica em uma forma controlada, de acordo com as necessidades do motor que será acionado, ou seja, o inversor de frequência pode ser parametrizado para atender ao tipo de carga mecânica que se encontra acoplada ao eixo do motor.

4.3.6.2 Introdução ao controle de motores e eletrônica de potência

Os motores CA, particularmente os de indução, fazem parte de incontáveis aparelhos e equipamentos no lar, escritório e fábrica (muitos em aplicações de velocidade constante). O fato de terem baixo custo, alto conjugado e robustez, o de suportarem breves picos de corrente (3 a 5 s), da ordem de cinco vezes a corrente de regime permanente, e o de chegarem a atingir, hoje, densidades de potência acima de 2 CV/kg são as razões de sua ampla utilização.

Na maioria dos casos, os motores CA são alimentados com tensão e frequência fixas (por exemplo: 127/220 VCA, 60 Hz).

Embora isso signifique simplicidade de controle, tanto o conjugado quanto o rendimento são sacrificados. Por isso, foram desenvolvidos diversos esquemas de controle, visando a otimizar o desempenho do motor.

Uma das opções é variar a tensão e manter constante a relação entre tensão e frequência (u/f), o que proporciona uma resposta do tipo velocidade constante-conjugado variável.

Outro esquema é variar a relação u/f , obtendo-se velocidade variável com conjugado máximo constante.

A combinação simultânea de ambas as estratégias, por meio do chamado *controle por orientação de campo*, permite otimizar o desempenho do motor com qualquer velocidade e carga, inclusive com rotor bloqueado. A obtenção de conjugado pleno com velocidade baixa ou nula constitui uma vantagem significativa, tendo em vista que a resistência do rotor e, conseqüentemente, as perdas associadas são minimizadas. Também as correntes de partida são reduzidas, de um fator da ordem de seis.

Até os recentes avanços na Eletrônica, a obtenção de velocidade e conjugado variáveis era inviável, em decorrência do custo e complexidade do controlador. No entanto, com o advento dos módulos de potência inteligentes, chaves semicondutoras em técnica MOS e processadores de sinal digitais, o controle por orientação de campo passou a ser cogitado para todas as aplicações virtualmente, de condicionadores de ar domésticos a veículos espaciais.

4.3.6.2.1 O transístor IGBT

O IGBT é um dispositivo semicondutor de potência que combina a tecnologia Mosfet, para o controle da condução, com a tecnologia do transístor bipolar, para a parte de potência. Ganham-se, com isso, rapidez e baixo consumo no comando, como nos Mosfet, permitindo operações com frequências da ordem de 20 kHz, com tempos de condução (“turn-on”) e bloqueio (“turn-off”) próximos

de 1 s. Paralelamente, as perdas na condução e a capacidade de condução de corrente são as de um transistor de potência, chegando a 1200 A hoje. A capacidade de bloqueio de tensão direta pode chegar a 2 kV. Em geral, para a alimentação de motores CA até 100 cv, esse é o dispositivo mais empregado.

O símbolo usado aqui para representar o IGBT está indicado na figura a seguir:

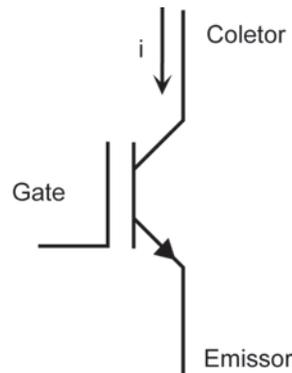


Figura 145

As curvas características de corrente x tensão são mostradas na figura a seguir. Nela:

- V_{RM} = maior tensão reversa que pode ser aplicada com dispositivo sem danificá-lo. Em geral, essa tensão é muito baixa, e os dispositivos são protegidos com um diodo em antiparalelo;
- V_{DM} = maior tensão direta que pode ser aplicada;
- V_{GE} = tensão aplicada entre o "gate" e o emissor.

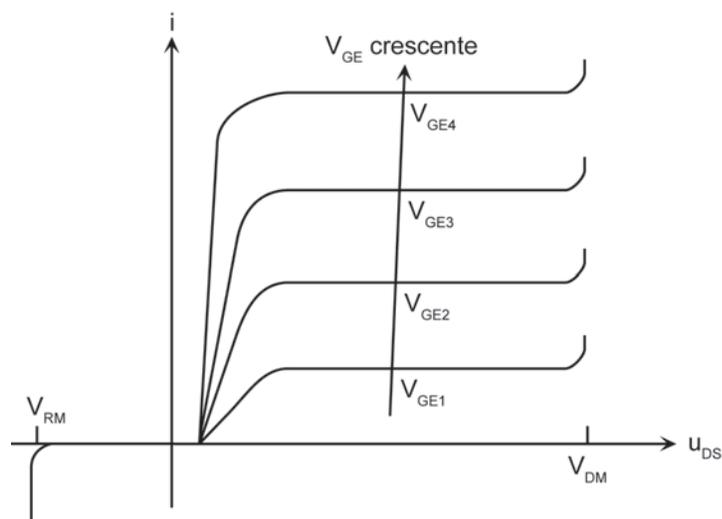


Figura 146

Observe-se também que, quanto maior a tensão V_{GE} , tanto maior será a região de condução de corrente sem saturação.

4.3.7 Fonte de tensão inversora com PWM (“Pulse Width Modulation”)

A amplitude da harmônica pode ser reduzida usando-se a técnica de modulação por largura de pulso (PWM).

O conceito básico do método PWM é a divisão do tempo em diversos períodos de liga-desliga com duração variada.

O valor RMS da tensão AC é controlado pelo tempo em que as chaves se mantêm ligadas.

A técnica de PWM mais frequentemente utilizada é a SPWM (“Sinusoidal Pulse Width Modulation”).

Tal aproximação requer um conversor em ponte com IGBT ou chaves Mosfet desviados por um diodo conectado em antiparalelo. O diodo permitirá que a corrente flua na direção oposta quando a chave estiver aberta.

Esses diodos de passagem previnem a interrupção por corrente indutiva. Isso fornece proteção contra a sobretensão transiente, que pode causar a queima por corrente reversa do IGBT e chaves Mosfet.

O diagrama típico de um circuito é mostrado na figura a seguir:

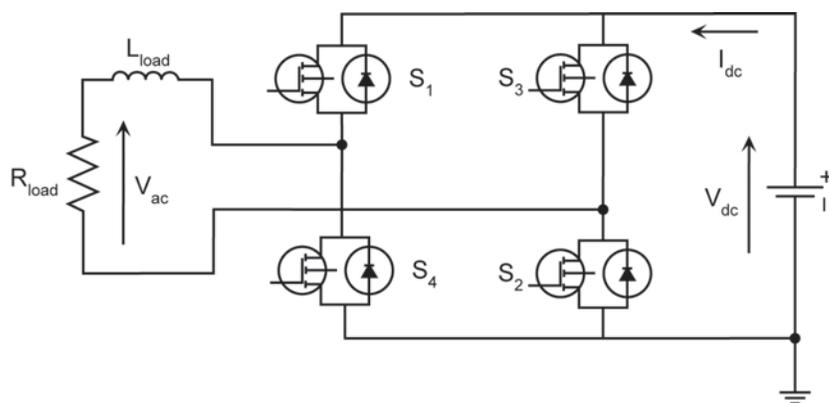


Figura 147

Na figura anterior, observa-se que:

- durante o ciclo positivo, S1 e S2 são chaveadas por trem de pulsos de alta frequência;
- durante o ciclo negativo, o trem de pulsos chaveia S3 e S4;

- a indutância de carga integra os pulsos gerados e produz uma onda de tensão e corrente senoidais (V_{ac}), como demonstrado na figura a seguir.

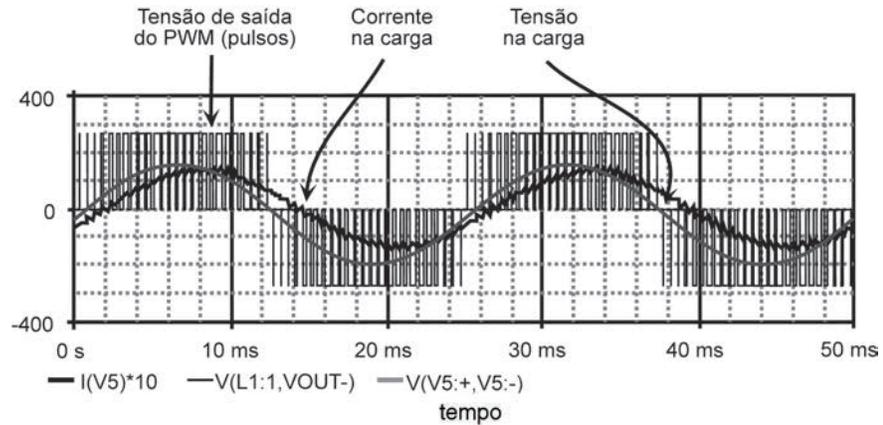


Figura 148

A largura de cada pulso varia em função da amplitude da onda senoidal. A forma de onda típica de um PWM foi mostrada na figura anterior.

As chaves nesse conversor são controladas por pulsos no “gate”. Os sinais do “gate” contêm muitos pulsos distribuídos ao longo do meio-ciclo.

O circuito de controle produz o trem de pulsos para o “gate” pela geração de uma onda portadora triangular e um sinal de referência senoidal.

Os dois sinais são comparados; quando a onda portadora é maior que o sinal de referência, o sinal para o “gate” é positivo, conforme indica a figura a seguir:

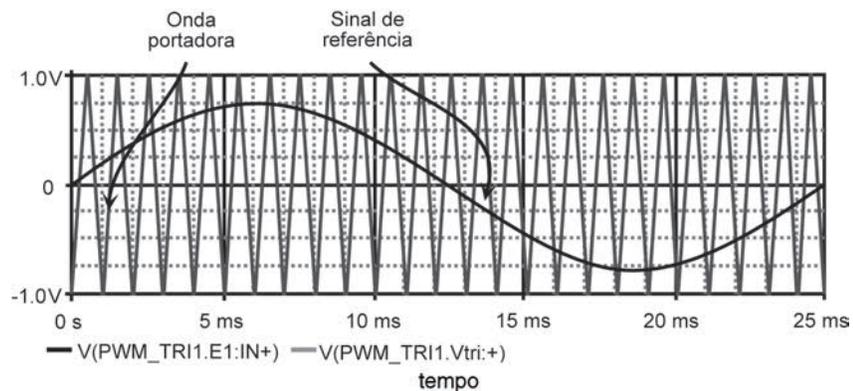


Figura 149

Quando a onda portadora é menor que o sinal de referência, o sinal para o “gate” é 0 (zero), conforme apresentado na figura a seguir. Isso resulta em um pulso para o “gate” com largura variável:

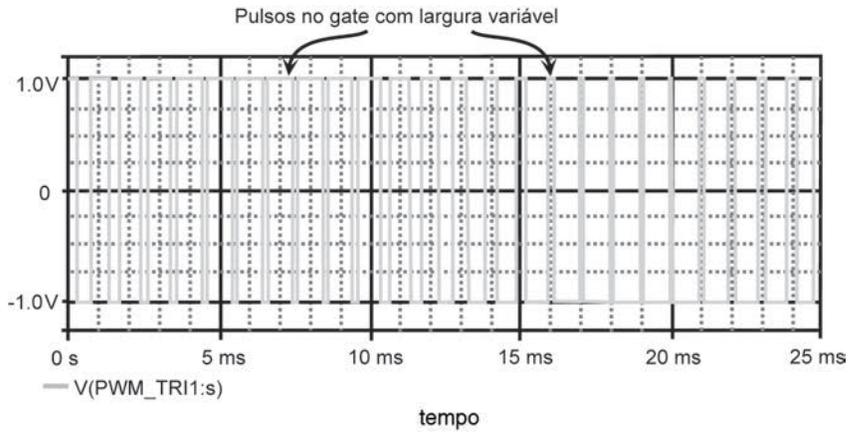


Figura 150

Com o exposto até o momento, deve-se notar que vários outros métodos podem ser usados para a geração de sinais de PWM.

A frequência da onda senoidal de referência determina a frequência da tensão AC gerada.

A amplitude da tensão AC pode ser regulada pela variação da amplitude do sinal de referência. A amplitude do componente fundamental da tensão AC é:

$$V_{ac} = \frac{V_{control}}{V_{carrier}} V_{dc} = m V_{dc}$$

O *índice de modulação* é a razão entre a tensão pico a pico AC ($2V_{ac}$) e a tensão DC.

Diodo de passagem

O inversor interrompe a corrente várias vezes em cada ciclo.

A interrupção de uma corrente indutiva poderia gerar uma alta sobretenção inaceitável.

Essa geração de sobretenção é eliminada pelos diodos de passagem conectados em antiparalelo às chaves. Quando as chaves abrem, a corrente, se indutiva, é desviada para os diodos, como pode ser observado na figura a seguir. Esta figura também mostra o caminho da corrente quando as chaves S1 e S2 estão fechadas e as chaves S3 e S4, abertas.

Quando as chaves S1 e S2 abrem (agora, todas as chaves estão abertas), a corrente se desvia através dos diodos das chaves S3 e S4. Esse desvio de corrente previne contra a interrupção por corrente indutiva:

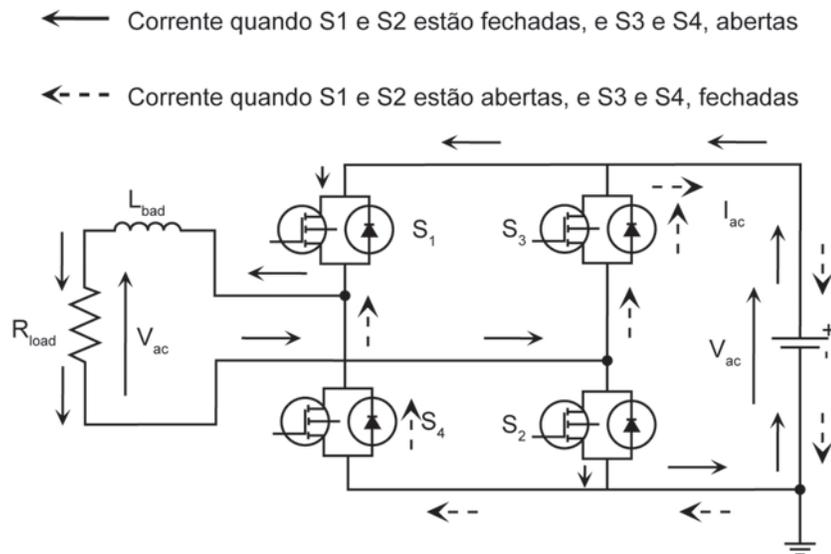


Figura 151

O controle PWM permite fazer que o motor trabalhe virtualmente em qualquer ponto de operação, ajustando-o sob medida à carga, como apresentado na figura seguinte:

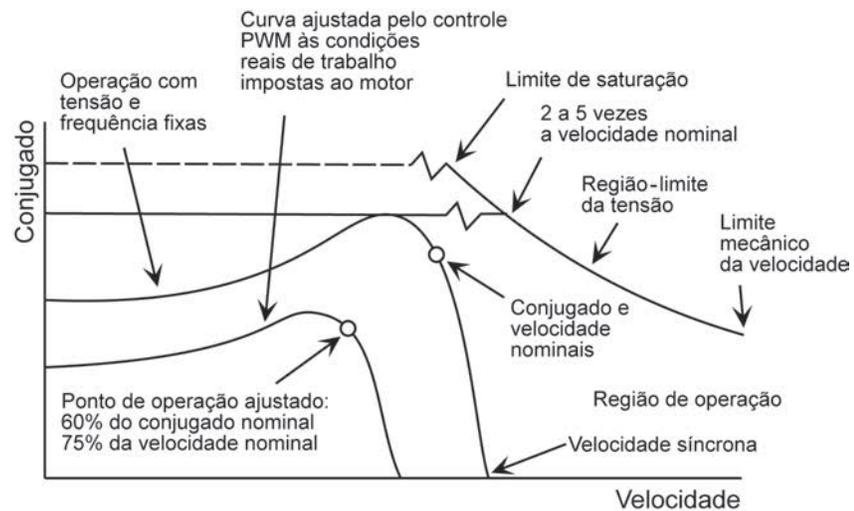


Figura 152

4.4 Considerações finais (resumo)

Com os conceitos abordados nesta unidade e associados aos de unidades anteriores, você já pode projetar os seus sistemas de medição e controle ou ainda instrumentar um equipamento. Também aprendeu como funciona um sistema de automação, inversão de frequências e controle de velocidade de motores.

4.5 Atividades individuais

Estas atividades devem ser realizadas individualmente e têm como objetivo fixar os conhecimentos adquiridos ao longo deste texto.

4.5.1 Exercícios propostos

1. Descreva o princípio de funcionamento de um controle PID.
2. Descreva o princípio de funcionamento de um PWM.

4.6 Estudos complementares

Caso você tenha tempo e deseje aprender um pouco mais, a seguir estão algumas sugestões.

4.6.1 Saiba mais

- Instrumentação:

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Instrumentação>>

- Medição:

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Metrologia>>

- Transdutores:

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Transdutor>>

- Sensores:

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Sensor>>

- Automação:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Automação_industrial>

<<http://en.wikipedia.org/wiki/Automation>>

- Controle PID:

<http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller>

- Inversores:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Variable-frequency_drive> (Em inglês, pois a página em português não está adequada.)

- PWM:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation>

Pesquise também nos links relacionados.

4.6.2 Referências bibliográficas

LOUREIRO, H. A.; FERNANDES, L. E. P. *Laboratório de dispositivos eletrônicos*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

MILLMAN, J.; HALKIAS, C. C. *Eletrônica: dispositivos e circuitos*. São Paulo: McGraw-Hill, 1981. v. 1-2.

TOOLEY, M. *Circuitos eletrônicos: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Campus, 2007.

SOBRE OS AUTORES

Alberto Moreira Jorge Júnior

Graduado em Engenharia Eletrônica pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (1984), tem mestrado (1991) e doutorado (1997) em Ciência e Engenharia de Materiais, ambos pela Universidade Federal de São Carlos. Atualmente, é professor da Universidade Federal de São Carlos, onde foi chefe do Departamento de Engenharia de Materiais entre 2002-2004. Foi pesquisador visitante na Universidade McGill, no Canadá (1997), CNRS, na França (2004), e UPC, na Espanha (2009, 2010 e 2011). Tem experiência na área de materiais e engenharia metalúrgica, com ênfase em metalurgia física, atuando, principalmente, nos seguintes temas: desenvolvimento e caracterização de materiais metaestáveis e nanoestruturados; processamento por SPD (Ecap e HPT); e caracterização microestrutural de materiais avançados e convencionais por microscopia eletrônica.

Antonio Frederico Comin

É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1982), com atuação na área de desenvolvimento de projetos de instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais. Tem experiência profissional de 15 anos em indústrias do setor privado, com ênfase de quatro anos em uma fábrica de leite em pó da Nestlé, no cargo de chefe eletromecânico, e 13 anos na Prefeitura dos campi da UFSCar, atuando na ampliação da área física, com funções de desenvolvimento de projetos, de fiscalização de obras e de manutenção. Hoje, é professor dos cursos de Eletrônica, de Eletrotécnica e de Mecatrônica do Centro Paula Souza de São Carlos.

