

2020

# Eletricidade



Técnico em Eletrotécnica

## Sumário

Teoria eletrônica da matéria	3
Princípios da eletrostática	4
Grandezas fundamentais do circuito elétrico	10
1ª Lei de Ohm	13
2ª Lei de Ohm	14
Elementos de um circuito elétrico	15
Fontes de energia	17
Associação de resistores	17
Circuitos elétricos	20
Potência e energia elétrica	21
Lei de Joule	21
Corrente alternada	23
Gerador de corrente alternada	23
Definições em corrente alternada	25
Formas de representação de grandezas senoidais	27
Tipos de cargas em circuitos CA	30
Impedância	36
Potências e energias em circuitos CA monofásicos	38
Sistema monofásico	40
Sistema trifásico	42
Sistema Elétrico de Potência (SEP)	49
Medidas elétricas	52
Instrumentos básicos de medição	53
Emendas e conexões	62
Emendas de condutores em prolongamento	62
Emendas de condutores em derivação	64
Conectores elétricos	65
Ferro de soldar ou soldador elétrico	69



Dispositivos de controle dos circuitos	72
Interruptores	72
Interruptor de várias seções	74
Interruptor paralelo	75
Interruptor <i>four-way</i> ou intermediário	76
Contatores e chaves magnéticas	77
Comando de motores	80
Elementos	80
Montagem de circuito de partida direta	90
Montagem de circuito de partida com reversão manual	92
Montagem de circuito de partida estrela-triângulo manual	93
Montagem de circuito de partida estrela-triângulo temporizado	95
Referências	97

### **Teoria eletrônica da matéria**

Os fenômenos da eletricidade eram conhecidos desde a antiguidade, porém sem aplicabilidade. No século VII a.C., Tales, na cidade de Mileto – Grécia – observou que uma substância chamada âmbar, quando atritada, adquiria a propriedade de atrair outros corpos. Âmbar, em grego, significa elektron, motivo pelo qual os fenômenos daí originados denominam-se fenômenos elétricos, e a ciência que os estuda denomina-se eletricidade.

### **Matéria e substância**

Aquilo que constitui todos os corpos e pode ser percebido por qualquer um dos nossos sentidos, é matéria. A madeira de que é feita a mesa e o vidro de que se faz o bulbo de uma lâmpada, é matéria. Dessa forma, percebemos que o nome matéria se relaciona com uma variedade grande de coisas. Cada tipo particular de matéria é uma substância, e, portanto, existem milhares de substâncias diferentes.

### **Moléculas e átomos**

Qualquer substância é formada por partículas muito pequenas e invisíveis, mesmo com auxílio de microscópios, chamadas de moléculas. A molécula é a menor parte em que se pode dividir uma substância, e que apresenta todas as suas características. Por exemplo, uma molécula de água é a menor quantidade de água que pode existir. As moléculas são constituídas por átomos. O número de átomos que compõem uma molécula varia de acordo com a substância; numa molécula de água ( $H_2O$ ), por exemplo, encontramos três átomos.

### **Carga elétrica (Q)**

Existem dois tipos de cargas elétricas na natureza, convencionalmente chamadas de cargas positivas e de cargas negativas. Os portadores de cargas elétricas são partículas elementares, em particular, aquelas que constituem os átomos: elétrons e prótons.

Os átomos são compostos de um núcleo e de uma coroa eletrônica, conforme mostra a Figura. O núcleo contém os prótons e os nêutrons, enquanto a coroa eletrônica contém os elétrons. Os prótons têm carga positiva, os elétrons têm carga negativa e os nêutrons não tem carga.

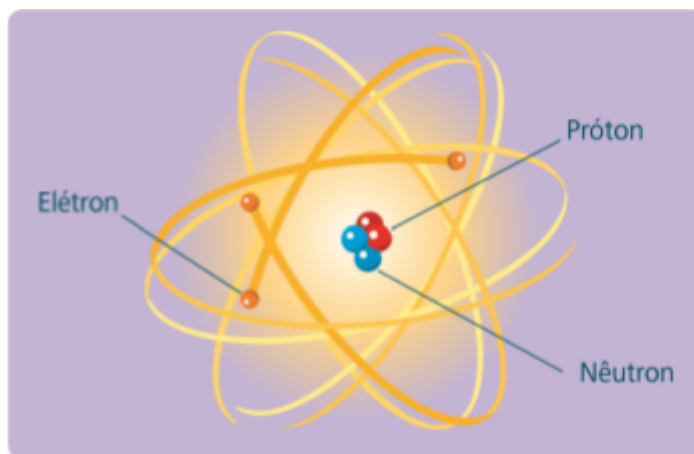


Figura: Estrutura do átomo

### Condutores e isolantes

Em todos os átomos existe uma força de atração entre prótons e elétrons que mantém a órbita dos elétrons em torno do núcleo. Entretanto, existem átomos cujos elétrons estão firmemente ligados às suas órbitas e outros com condições de se deslocarem de uma órbita para outras. Os primeiros elétrons denominamos elétrons presos e os outros elétrons livres.

Os elétrons livres existem em grande número nos materiais chamados bons **condutores** de eletricidade e não existem, ou praticamente não existem, nos chamados **isolantes**. É essa particularidade que permite a distinção entre estas duas categorias de materiais. Como exemplos de materiais bons condutores, podemos citar o ouro, a prata, o cobre, o alumínio, o ferro e o mercúrio. A madeira, o vidro, a porcelana, o papel e a borracha classificam-se como isolantes.

### Princípios da eletrostática

O entendimento dos princípios eletrostáticos é muito importante para o entendimento de vários conceitos de eletricidade.

### Princípios da atração e repulsão

Da observação experimental, pode-se obter a chamada Lei de DuFay:

“Corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal **repelem-se**. Corpos eletrizados com cargas de sinais contrários **atraem-se**.”

### Princípio da conservação de cargas elétricas

Num sistema eletricamente isolado, a soma algébrica das cargas elétricas permanece constante. Um sistema eletricamente isolado é um conjunto de corpos que não troca cargas elétricas com o meio exterior.

### Leis de Coulomb

O estudo correto das forças que se manifestam entre as cargas elétricas foi feito experimentalmente por Charles Augustin Coulomb. Segundo Coulomb, a intensidade da força de atração ou repulsão entre duas cargas elétricas:

- É diretamente proporcional à quantidade de carga de cada corpo e, portanto, ao seu produto.
- É inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as cargas.
- Depende do meio onde estão colocadas as cargas.

Conforme a Figura, matematicamente temos:

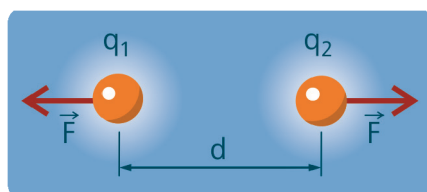


Figura: Lei de Coulomb

Equação 1.1

$$\vec{F} = K \times \frac{q_1 \times q_2}{d^2}$$

Onde:

F – intensidade da força de atração ou repulsão [unidade newton (N)]

K – constante eletrostática (seu valor depende do meio e do sistema de unidades utilizado)

$q_1$  e  $q_2$  – módulos das cargas puntiformes [unidade coulomb (C)]

d – distância entre as cargas [unidade metro (m)]

### Campo elétrico

Campo elétrico é a região do espaço ao redor de uma carga elétrica, em que esta exerce efeitos eletrostáticos. A carga geradora do campo é denominada carga fonte (Q). Uma carga de valor pequeno (que não altere o campo da carga fonte) usada para detectar o campo gerado é denominada carga de prova (q).

A equação fundamental do campo elétrico expressa a força (F) sofrida pela carga de prova (q) no referido campo elétrico da carga fonte (Q) e é dada por:

Equação 1.2

$$\vec{F} = \vec{E} \times q$$

O campo elétrico é uma grandeza vetorial, possuindo módulo, direção e sentido, descritos a seguir e conforme mostra a Figura:

### Módulo:

Equação 1.3

$$\vec{E} = K \times \frac{Q}{d^2}$$

**Direção:** Reta que une a carga de prova à carga fonte.

**Sentido:** Depende do sinal da carga fonte.

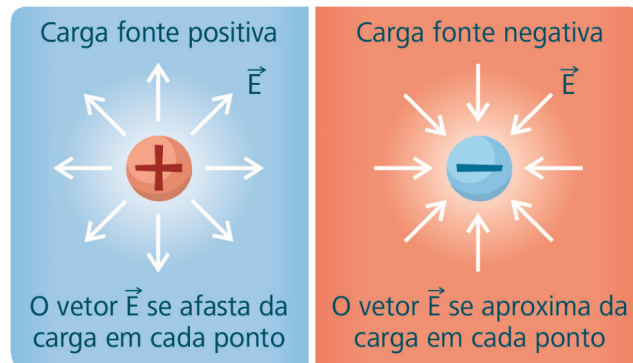


Figura: Direção e sentido do campo elétrico

As linhas de força permitem representar um campo elétrico, e são traçadas tangente ao vetor campo elétrico em cada ponto do campo, saindo nas superfícies dos corpos positivos (fontes) e chegando nas superfícies dos corpos negativos (sorvedouros). A Figura mostra espectros do campo elétrico entre duas cargas iguais em módulo, com mesmo sinal e com sinais contrários.

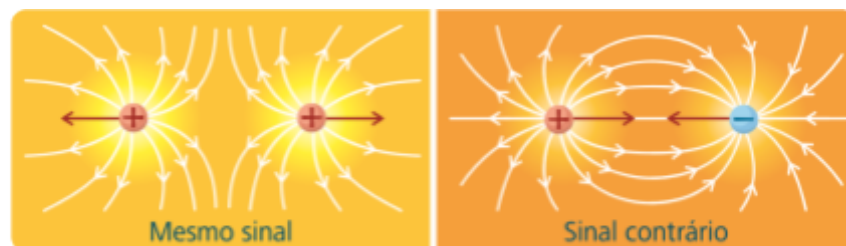
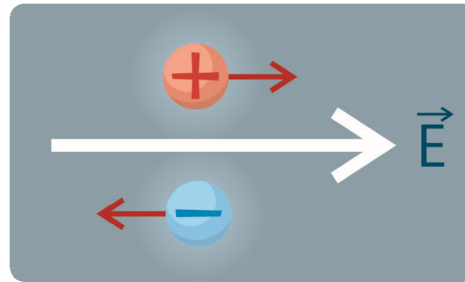


Figura: Espectros do campo elétrico

Quando uma carga elétrica puntiforme livre é abandonada no interior de um campo elétrico, sua trajetória coincidirá sempre com a linha de força do campo. As cargas positivas livres se deslocam espontaneamente a favor do campo elétrico e as cargas negativas livres se deslocam contra o campo elétrico, conforme a Figura.



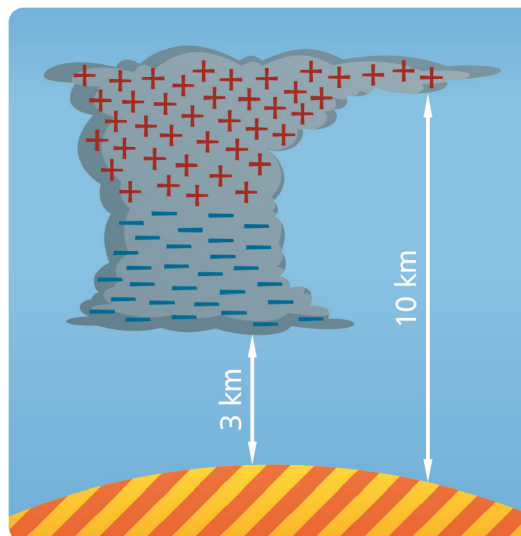
**Figura: Trajetória das cargas no campo elétrico**

### **Potencial elétrico**

Potencial elétrico é a capacidade que uma carga elétrica tem de realizar trabalho através de seu campo elétrico. Cargas elétricas deslocam-se dos maiores potenciais para os menores potenciais elétricos. A diferença de potencial elétrico entre dois pontos (ddp) é chamada de tensão elétrica cuja unidade é o volt (joule/coulomb) e indica a capacidade de os elétrons realizarem trabalho no seu deslocamento entre esses pontos.

### **Descargas atmosféricas**

Pesquisas comprovam que as descargas atmosféricas ocorrem devido a um processo de eletrização por atrito entre as partículas de água que compõem as nuvens, provocadas por ventos de forte intensidade. Este atrito dá às nuvens uma característica bipolar, conforme mostra a Figura.



### Figura: Eletrização das nuvens

Como podemos ver na Figura, a concentração de cargas elétricas negativas na base da nuvem atrai as cargas positivas para a superfície da Terra, originando uma diferença de potencial. Quando esta diferença de potencial ultrapassa a capacidade de isolamento do ar, cargas elétricas migram na direção da terra, ocasionando a descarga atmosférica.

### **Para-raios**

As descargas atmosféricas causam sérias perturbações nas redes aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica, além de provocarem danos materiais nas construções atingidas por elas, sem contar os riscos de morte a que as pessoas e animais são submetidos. Induzem, também, a surtos de tensão que chegam a milhares de volts nas redes aéreas de transmissão e distribuição das concessionárias de energia elétrica, obrigando a utilização de cabos-guarda ao longo das linhas de tensão mais elevadas e para-raios para a proteção de equipamentos instalados nesses sistemas.

Quando as descargas elétricas entram em contato direto com qualquer tipo de construção, tais como edificações, tanques metálicos de armazenamento de líquidos, partes estruturais ou não de subestações, são registrados grandes danos materiais que poderiam ser evitados, caso essas construções estivessem protegidas adequadamente por para-raios, como os do tipo haste Franklin, que se baseiam fundamentalmente no poder das pontas, conforme mostra a Figura.



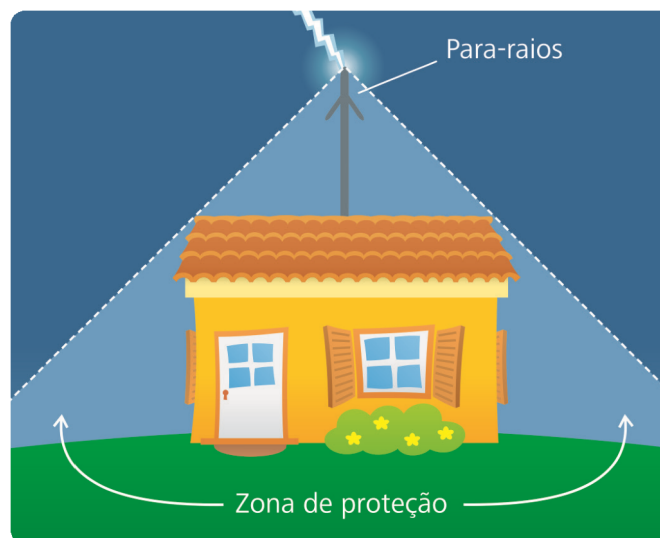


Figura: Aplicação de para-raios

### **Eletrodinâmica**

A eletrodinâmica estuda os elétrons e seus efeitos em movimento. Para que possamos estudá-la, devemos ter um bom entendimento da teoria eletrostática, mais especificamente sobre a teoria da matéria, condutores e isolantes, campo elétrico e potencial elétrico.

### **Grandezas fundamentais do circuito elétrico**

A compreensão de tensão, corrente e resistência elétrica é de vital importância para o entendimento dos princípios eletrodinâmicos.

### **Tensão elétrica**

Tensão é a força que impulsiona os elétrons através de um condutor, realizando trabalho. Sua unidade é o volt, que é definido como a diferença de potencial (ddp) entre dois pontos, necessária para realizar um trabalho de 1 joule, transferindo uma carga de 1 coulomb de um ponto a outro:  $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ .

Em função do campo elétrico que origina a tensão, podemos defini-las em tensão contínua (CC), cuja origem é um campo elétrico constante, e tensão alternada (CA), cuja origem é um campo elétrico alternado, invertendo seu sentido ao longo do tempo periodicamente, conforme mostra a Figura.

A tensão CA mais utilizada é de característica senoidal.

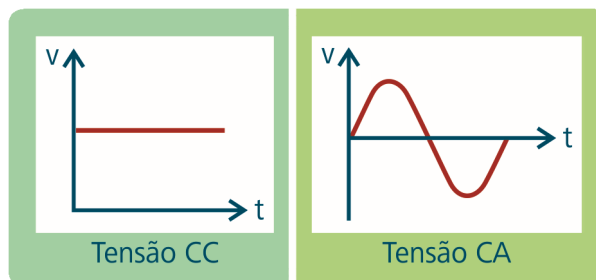


Figura: Tipos de tensão

A medição de tensão é realizada conforme circuito da Figura.

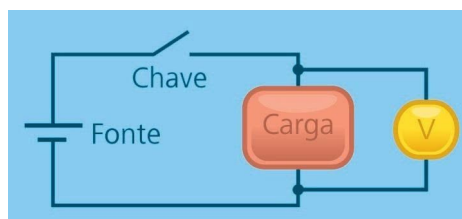


Figura: Medição de tensão em um circuito elétrico

### Corrente elétrica

Corrente elétrica em um condutor é o movimento ordenado de suas cargas livres, devido à ação de um campo elétrico estabelecido no seu interior pela aplicação de uma ddp entre dois pontos desse condutor.

O sentido da corrente é convencionado como o deslocamento das cargas livres positivas do condutor. É chamada corrente convencional a corrente de cargas positivas num condutor metálico, enquanto a corrente real é a corrente das cargas livres negativas, isto é, dos elétrons, conforme a Figura.

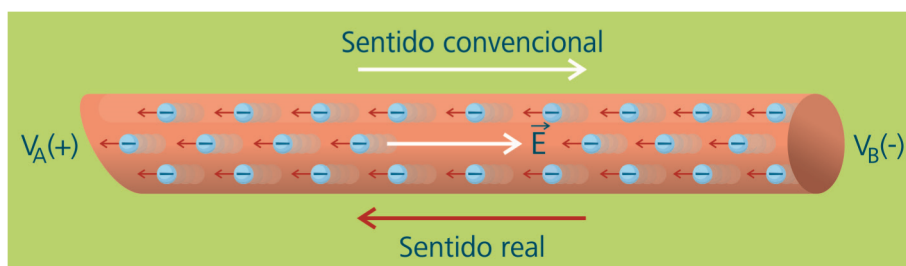


Figura: Sentido da corrente elétrica

Já sua intensidade é a quantidade de carga que atravessa a seção transversal de um condutor na unidade de tempo. Sua unidade é o ampère (A) (1 A = 1 C/s).

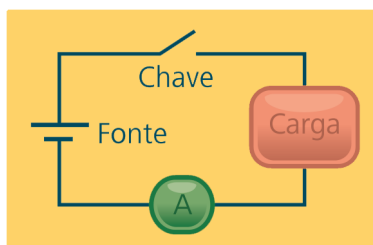
Equação 2.1

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Equação 2.2

$$\text{ampère} = \frac{\text{coulomb}}{\text{segundo}}$$

Da mesma forma que a tensão, a corrente elétrica pode ser CC ou CA. A corrente CC é produzida por uma tensão CC, cujos elétrons se deslocam num único sentido, enquanto a corrente CA é produzida por uma tensão CA, cujos elétrons têm deslocamento bidirecional, acompanhando a variação de polaridade da tensão. A medição de corrente é realizada conforme o circuito da Figura.



**Figura: Medição de corrente em um circuito elétrico**

### **Resistência elétrica**

É a dificuldade que um material condutor apresenta à passagem da corrente elétrica. A resistência de um condutor é dada pela constante de proporcionalidade igual à razão entre a tensão mantida entre os terminais deste condutor e a intensidade da corrente por ela ocasionada, conforme Equação.

Equação 2.3

$$\frac{\text{Tensão}}{\text{Corrente}} = \text{Constante para um mesmo condutor}$$

Sua unidade é o ohm ( $\Omega$ ), onde  $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$ .

Quando um elemento apresenta resistência nula, dizemos que este representa um curto-circuito. Quando um elemento apresenta resistência infinita, dizemos que este representa um circuito aberto.

### 1ª Lei de Ohm

Entre dois pontos de um material percorrido por uma corrente elétrica, existe uma proporcionalidade entre a corrente que circula e a diferença de potencial aplicada ao material. Toda vez que se variar a tensão no circuito (terminais 1, 2 e 3), através de uma chave seletora, conforme a Figura, a corrente também irá variar na ordem direta dos seus valores, isto é, se aumentarmos a tensão, a corrente também irá aumentar; se diminuirmos a tensão a corrente também irá diminuir.

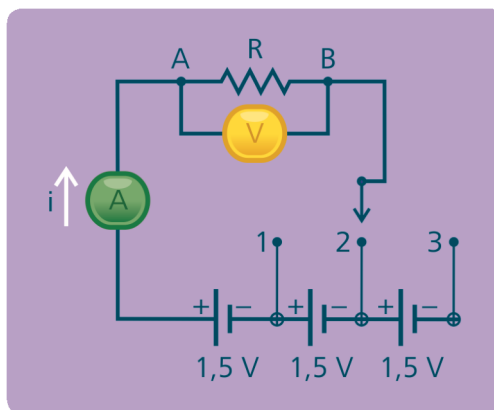


Figura: 1ª Lei de Ohm

Observou-se também, que se a tensão fosse mantida constante a corrente apenas variaria à medida que fosse variada a resistência elétrica do condutor na ordem inversa de seus valores.

Assim, chegou-se ao seguinte enunciado, conhecido como Lei de Ohm:

“A intensidade da corrente que percorre um condutor é diretamente proporcional à ddp que a ocasionou, e inversamente proporcional à resistência elétrica do condutor.”

Equação 2.4

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

Equação 2.5

$$V = R \times I$$

Equação 2.6

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

## 2ª Lei de Ohm

Ohm realizou estudos a fim de analisar o comportamento da resistência elétrica dos materiais, variando a resistência  $R$  de quatro formas diferentes, conforme se descreve na Figura.

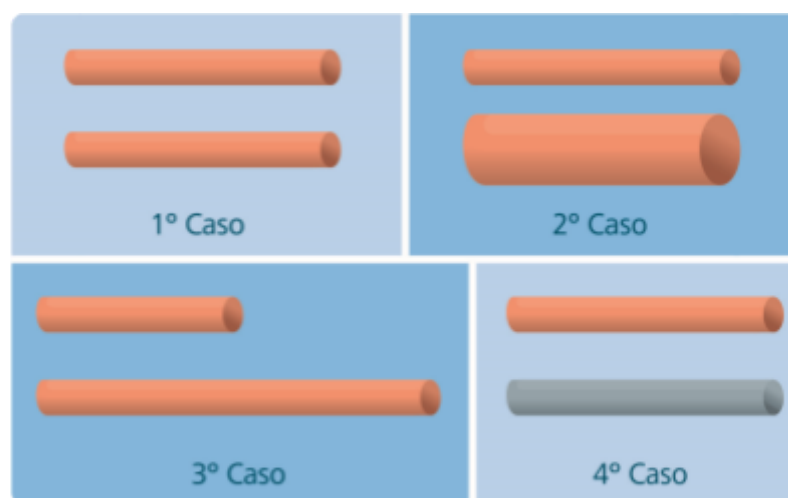


Figura: 2ª Lei de Ohm

**1º Caso** – aplicou uma mesma ddp em dois condutores de mesma área, comprimento e material.

**2º Caso** – aplicou uma mesma ddp em dois condutores de mesmo comprimento e material, mas a área do segundo é igual ao dobro da área do primeiro.

**3º Caso** – aplicou uma mesma ddp em dois condutores de mesmo material e área, mas o comprimento do segundo é igual ao dobro do primeiro.

**4º Caso** – aplicou uma mesma ddp em dois condutores de mesmo comprimento e área, porém de materiais diferentes, constatando que a corrente em cada material é diferente.

Com essa experiência, Ohm observou que a variação de resistência depende do material, do comprimento e da área, enunciando a segunda lei:

“A resistência elétrica do condutor é diretamente proporcional ao seu comprimento (L), inversamente proporcional a sua seção (A) e depende ainda do material com que é feito este condutor ( $\rho$ )”, conforme representado na Equação.

Equação 2.7

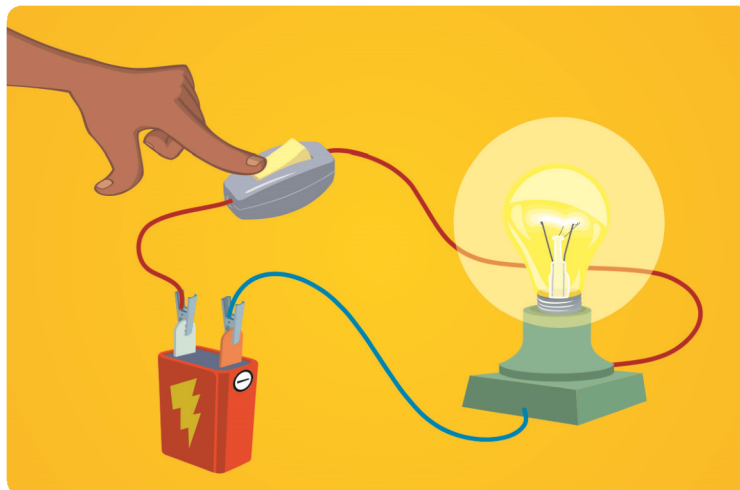
$$R = \rho \times \frac{L}{A}$$

Onde:  $\rho$  é resistividade ou resistência específica

O valor de  $\rho$  depende exclusivamente da natureza da substância da qual o condutor é feito, da temperatura e das unidades utilizadas.

### Elementos de um circuito elétrico

Para que possamos obter a corrente elétrica, necessitamos de uma fonte geradora de energia elétrica (gerador), um receptor para utilizar a energia produzida, e condutores para realizarmos a ligação desses elementos em um circuito fechado. A esse conjunto denominamos circuito elétrico, conforme a Figura.



**Figura: Elementos de um circuito elétrico**

### **Gerador**

É um dispositivo elétrico que transforma uma modalidade qualquer de energia em energia elétrica. Nos seus terminais é mantida uma ddp que é derivada dessa transformação.

### **Receptor**

Receptor é um dispositivo elétrico capaz de transformar energia elétrica em outra modalidade qualquer de energia que não seja unicamente calor. Um receptor que transforma energia elétrica unicamente em calor é chamado receptor passivo (resistor).

### **Dispositivos de manobra**

São elementos que servem para acionar ou desligar um circuito elétrico como as chaves e os interruptores representados simbolicamente na Figura.



**Figura: Símbolo de interruptor**

### **Dispositivos de proteção**

São dispositivos que, ao serem atravessados por uma corrente de intensidade maior que a prevista, interrompem a passagem da corrente elétrica, preservando os demais elementos do circuito. Os mais comuns são os fusíveis e os disjuntores.

### **Fontes de energia**

Há no planeta diversos tipos de fontes energéticas. Tais fontes podem ser classificadas como fonte de energias renováveis e outras não renováveis. Podemos também as classificar como energias de fontes primárias, como a água, o vento, a radiação solar ou fontes secundárias como o petróleo.

Cada país constrói sua matriz de fontes de energia conforme suas características climática, geológicas e geográficas.

No Brasil, a geração de energia elétrica é produzida, predominantemente, por usinas hidrelétricas. Contando, também, em sua matriz energética, com usinas térmicas e nucleares.

Uma outra forma de geração de energia elétrica é aquela proveniente de pilhas e baterias que são processos eletroquímicos de obtenção de energia. Contudo esta forma de energia é normalmente utilizada para um consumo mais restrito de quantidade energética.

### **Associação de resistores**

Podemos associar resistores em série, em paralelo ou de forma mista, combinando as duas formas anteriores.

#### **Associação em série**

Dois ou mais resistores constituem uma associação em série quando estão ligados, de modo que a mesma corrente percorra cada um deles, conforme a Figura.



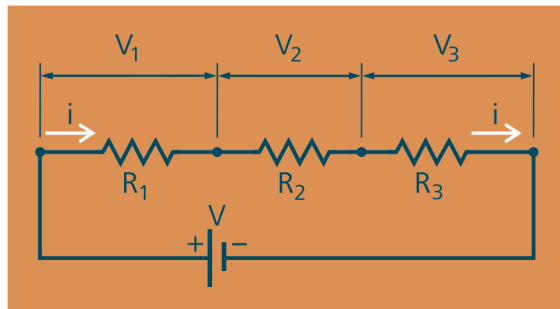


Figura: Associação em série

Na associação em série, pode-se dizer que:

- a) A intensidade da corrente que percorre o resistor é igual à intensidade da corrente que percorre cada resistor associado, conforme Equação.

Equação 2.8

$$I_s = I_1 = I_2 = I_3 = \text{constante}$$

- b) A ddp entre os seus terminais é a soma das ddp entre os terminais de cada resistor associado, conforme Equação.

Equação 2.9

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3$$

- c) A sua resistência é igual a soma das resistências de cada um dos resistores associados, conforme Equação.

Equação 2.10

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3$$

### Associação em paralelo

Dois ou mais resistores constituem uma associação em paralelo quando estão ligados de modo que a ddp entre seus terminais é a mesma, conforme a Figura.

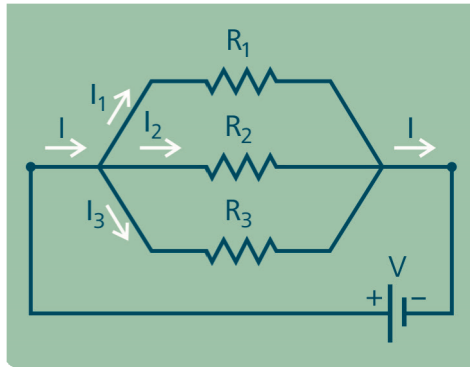


Figura: Associação em paralelo

Na associação em paralelo, pode-se dizer que:

**a)** A intensidade da corrente que percorre o resistor equivalente é igual à soma das intensidades das correntes que percorrem cada um dos resistores associados, conforme Equação.

Equação 2.11

$$I_p = I_1 + I_2 + I_3$$

**b)** A ddp entre os terminais do resistor equivalente é igual à ddp entre os terminais de cada um dos resistores associados, conforme Equação.

Equação 2.12

$$V_p = V_1 = V_2 = V_3 = \text{constante}$$

**c)** O inverso da resistência do resistor equivalente é a soma dos inversos das resistências dos resistores associados, conforme Equação.

Para  $n$  resistores iguais associados em paralelo, pode-se utilizar a Equação.

Equação 2.14

$$R_p = \frac{R}{n}$$

Para a associação de dois resistores em paralelo, pode-se utilizar a Equação.

Equação 2.15

$$R_p = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

### Circuitos elétricos

A ligação entre elementos elétricos, tais como interruptores, fontes de energia, resistores, indutores, capacitores, transistores e outros, de tal forma a criarem um caminho fechado para a circulação de corrente, caracterizam um circuito elétrico. Tais circuitos elétricos seguem leis específicas para seu entendimento, conhecidas como leis de Kirchhoff.

### Leis de Kirchhoff

**1ª Lei** – a soma das correntes que chegam a um nó do circuito é igual à soma das correntes que saem do nó, conforme a Figura. Observe que  $I_1 = I_2 + I_3$ .

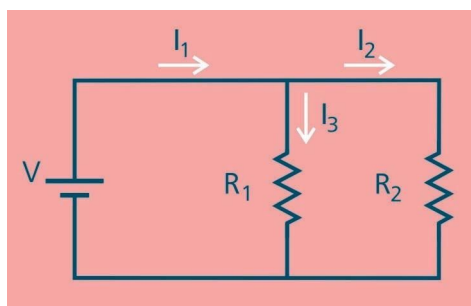


Figura: 1ª Lei de Kirchhoff

**2ª Lei** – o somatório das quedas de tensão em um caminho fechado é igual a zero. Por exemplo, na Figura a soma dos produtos das correntes pelas resistências (quedas de tensão) em cada malha do circuito é igual à tensão aplicada a esta malha.

Equação 2.13

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

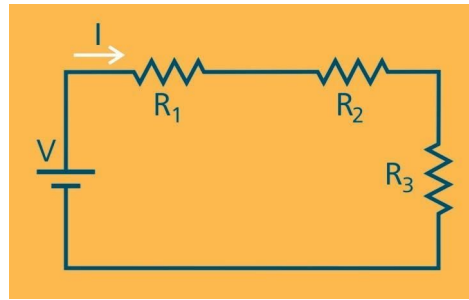


Figura: 2ª Lei de Kirchhoff

Equação 2.16

$$i \times R_1 + i \times R_2 + i \times R_3 = V$$

### Potência e energia elétrica

Potência é a relação entre o trabalho realizado e o tempo gasto para realizá-lo. Sua unidade é o watt (W), e sua medição se dá através do wattímetro.

Matematicamente, a energia pode ser expressa pelo produto da potência pelo tempo. Sua unidade é o joule (J), existindo subunidades como o Wh (watt-hora) ou kWh (quilowatt-hora), e sua medição se dá através de um medidor de kWh.

### Lei de Joule

A energia potencial elétrica (W) dissipada num resistor por efeito joule, é diretamente proporcional à resistência do resistor, ao tempo de duração da corrente e ao quadrado da intensidade da corrente, conforme a Equação. As Equações abaixo também podem ser utilizadas para o cálculo da energia. A Figura mostra uma aplicação do efeito joule.

Equação 2.17

$$W = R \times I^2 \times t$$

Equação 2.19

$$W = \frac{V^2}{R} \times t$$

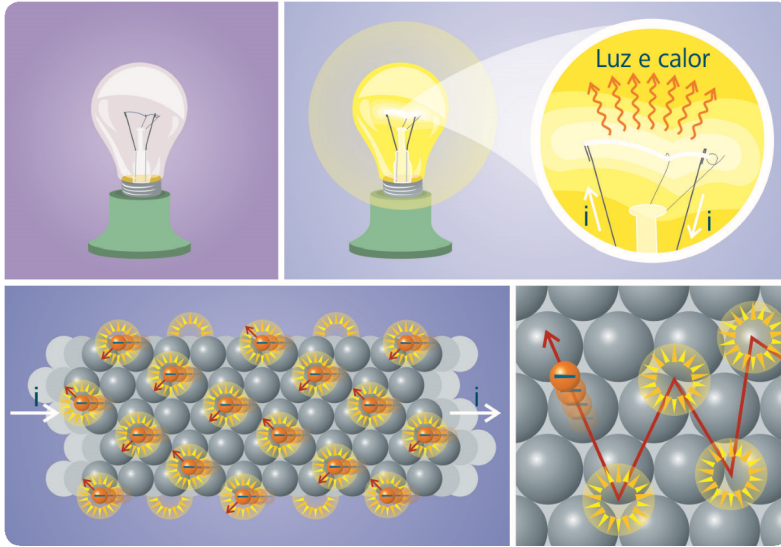


Figura: Efeito joule em um condutor

Deduzindo as equações que seguem em termos de potência elétrica, temos:

Equação 2.20

$$P = V \times I$$

Equação 2.23

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Equação 2.21

$$P = R \times I^2$$

Equação 2.22

$$P = \frac{W}{t}$$

### **Corrente alternada**

A história da eletricidade teve início há muito tempo. Entretanto, os sistemas de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica iniciaram a pouco mais de um século, a partir de 1882, com o sistema em corrente contínua (CC) desenvolvido por Thomas Alva Edison e a partir de 1886, com o sistema em corrente alternada (CA), desenvolvido por George Westinghouse e Nikola Tesla.

Os sistemas em CC apresentaram dificuldades com o aumento da demanda e no atendimento de clientes a longas distâncias. Já o sistema em CA possibilita o uso de transformadores, elevando ou rebaixando os níveis de tensão, permitindo o transporte de energia a longas distâncias com reduzidas perdas e menores investimentos na construção de redes elétricas. Dessa forma, sistemas em CA se multiplicaram rapidamente, sendo utilizados mundialmente nas etapas de geração, transmissão, distribuição e utilização de energia elétrica.

### **Gerador de corrente alternada**

Os geradores CA, também denominados alternadores, são máquinas destinadas a converter energia mecânica em energia elétrica. A transformação de energia nos geradores fundamenta-se nas Leis de Faraday e Lenz.

O gerador elementar monofásico de CA, concebido por Michael Faraday em 1831, na Inglaterra, e aproximadamente na mesma época por Joseph Henry, nos Estados Unidos, é constituído por uma espira que girava entre os polos de um ímã, semelhante à Figura.

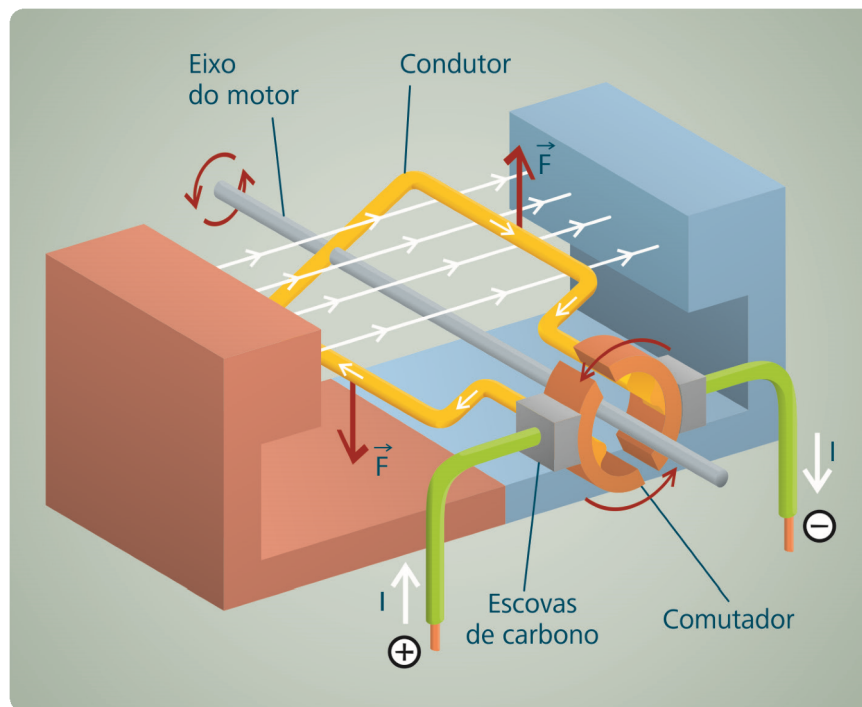


Figura: Gerador monofásico CA elementar

No gerador monofásico elementar, uma espira de fio girando em um campo magnético produz uma força eletromotriz induzida (femi). Os terminais da bobina são ligados ao circuito externo por meio dos anéis coletores e escovas. A força eletromotriz e a corrente de um gerador elementar mudam de direção cada vez que a espira gira  $180^\circ$ . A tensão de saída deste gerador é alternada do tipo senoidal.

Faraday estabeleceu, ainda, que os valores instantâneos da força eletromotriz (ou tensão) do gerador podiam ser calculados pela relação apresentada na Equação:

Equação 3.1

$$e = \beta \times l \times v \times \sin(\theta)$$

Onde:

$e$  – força eletromotriz induzida

$\beta$  – indução do campo magnético

$l$  – comprimento do condutor

$v$  – velocidade linear de deslocamento do condutor

$\theta$  – ângulo formado entre  $\beta$  e  $v$

O campo magnético dos geradores elementares da Figura é constituído por ímãs naturais. Para que seja possível controlar tensão e corrente em um alternador, o campo magnético é produzido por ímãs artificiais (eletroímãs), formados por bobinas alimentadas com corrente contínua.

### **Definições em corrente alternada**

Para o melhor entendimento dos princípios que regem a corrente alternada, se faz necessário o uso de diversas definições técnica que serão explanadas a seguir.

#### **Período**

A forma de onda da tensão gerada por um gerador CA é cíclica, isto é, seus valores se repetem periodicamente. O tempo necessário para que a onda senoidal complete um ciclo é chamado de período ( $T$ ), dado em segundos (s).

#### **Frequência**

A frequência ( $f$ ) de um sinal senoidal corresponde ao número de ciclos no intervalo de tempo de 1 s. Dessa forma  $f = 1/T$  e  $T = 1/f$ . Unidade:  $1/s = \text{Hz}$ .

#### **Velocidade angular**

A velocidade angular ( $\omega$ ) de um sinal senoidal mede a taxa de variação de seus valores cíclicos. A velocidade angular depende da frequência da onda senoidal conforme a equação  $\omega = 2 \times \pi \times f$ . Unidade: rad/s.

#### **Valor de pico**

O valor de pico ( $V_p$ ) é o máximo valor que uma grandeza pode assumir. Também é conhecido como valor máximo ou valor de crista. Os valores



compreendidos entre o pico de máximo positivo e o de máximo negativo são chamados de valor pico a pico ( $V_{pp} = 2 \times V_p$ ).

### Valor médio

O valor médio ( $V_m$ ) de uma grandeza puramente senoidal, quando considerado de um período inteiro, é nulo, pois a soma dos valores da área relativa à semionda positiva é igual à negativa. Por essa razão, o  $V_m$  de uma grandeza senoidal normalmente é analisado como a média aritmética dos valores instantâneos no intervalo de meio período. Matematicamente  $V_m = 0,637 \times V_p$ .

### Valor eficaz

O valor eficaz ( $V_{ef}$ ) de uma grandeza senoidal, também chamado de valor rms está relacionado ao seu desempenho na produção de trabalho, se comparado a uma grandeza contínua. Assim, se conectarmos duas resistências iguais a duas fontes diferentes, uma CC e outra CA, percebemos que, para ambas, as resistências apresentaram os mesmos efeitos térmicos. A tensão de pico da grandeza CA senoidal deverá ser aproximadamente 41,42 % maior que a tensão contínua CC. Isto significa que a potência média de uma fonte CC de 220 V corresponde a de uma fonte CA senoidal com  $V_p$  de aproximadamente 311,12 V. Dessa forma, dizemos que esta fonte CA possui uma tensão eficaz de 220 V, pois seus efeitos térmicos equivalem aos da fonte CC. Matematicamente, a Figura diferencia os valores de pico, pico a pico, médio e eficaz de um sinal senoidal.

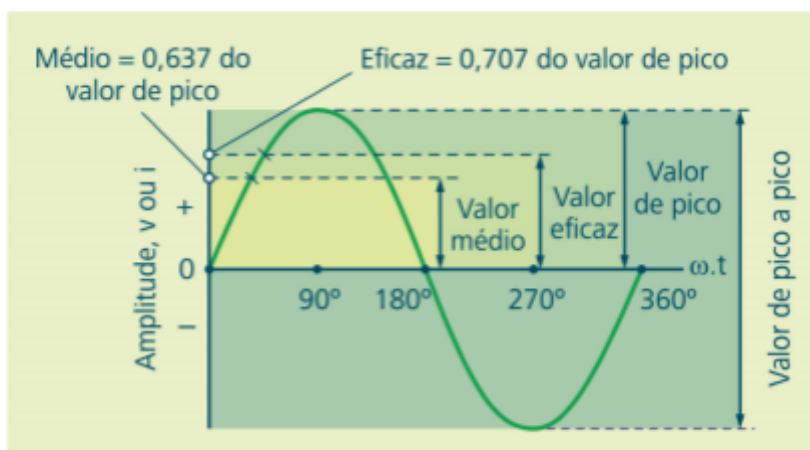


Figura: Valores de um sinal senoidal

### Ângulo de fase

O ângulo de fase  $\phi$  entre duas formas de onda de mesma frequência é a diferença angular num dado instante. Por exemplo, o ângulo de fase entre as ondas A e B da Figura é de  $90^\circ$  carregado positivamente.

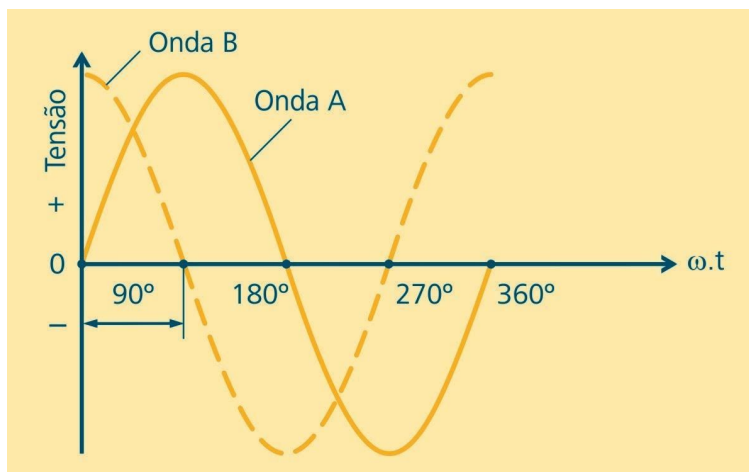


Figura: Ângulo de fase entre duas ondas senoidais

Observe a Figura no instante  $90^\circ$ . O eixo horizontal corresponde à unidade de tempo que representada em graus elétricos ( $360^\circ = T$  segundos). A onda B começa com seu valor máximo e cai para zero em  $90^\circ$ , enquanto a onda A começa em zero e cresce até seu valor máximo em  $90^\circ$ . A onda B atinge seu valor máximo  $90^\circ$  na frente da onda A, logo a onda B está adiantada relativamente à onda A de  $90^\circ$ . Este ângulo de fase de  $90^\circ$  entre as ondas A e B é mantido durante o ciclo completo e todos os ciclos sucessivos. Em qualquer instante, a onda B passa pelo valor que a onda A passará  $90^\circ$  depois.

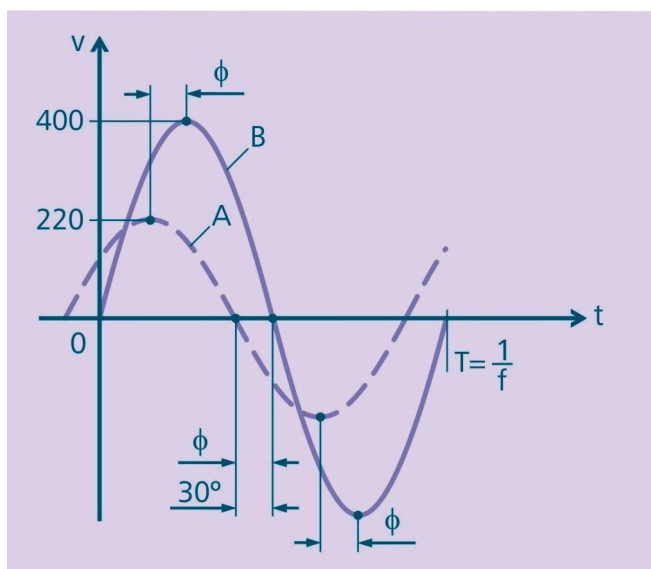
### Formas de representação de grandezas senoidais

Representa graficamente a variação do sinal senoidal em função do tempo.

#### Forma de onda

A Figura mostra a representação por forma de onda de duas tensões senoidais, A e B.

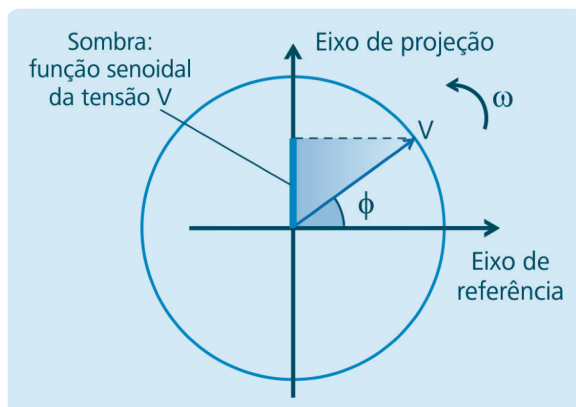
A representação por forma de onda permite identificar todos os valores característicos de um sinal senoidal, tais como período, frequência, velocidade angular, valor de pico, valor médio e valor eficaz e, no caso da Figura, o ângulo de fase entre as tensões A e B.



**Figura: Representação por forma de onda**

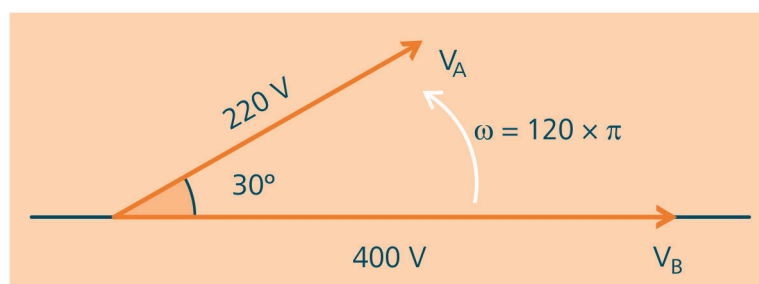
### Diagrama fasorial

Esta forma utiliza fasores, que representam as grandezas senoidais. O termo fasor equivale a um vetor, com módulo, direção e sentido, porém os vetores possuem valores fixos, enquanto nos fasores os valores se alteram ciclicamente. Essa variação pode ser observada através da Figura.



### Figura: Definição de fasor

Identifique na Figura o vetor  $V$ . Imagine agora o vetor  $V$  com seu ponto inicial fixo, enquanto seu ponto final gira em movimento circular uniforme. Um vetor dotado desse movimento é chamado de fasor e cada volta completa representa um ciclo senoidal. A Figura mostra as tensões senoidais da Figura, representadas através de fasores. Esta representação, também, permite identificar todos os valores das referidas tensões.



**Figura: Representação por diagrama fasorial**

### Expressão trigonométrica

Representa sob forma de função trigonométrica os sinais senoidais. Para o exemplo da Figura, tem-se as Equações:

Equação 3.2

$$v_A = 220 \times \text{sen}(120 \times \pi \times t + 30^\circ) \text{ [V]}$$

Equação 3.3

$$v_B = 400 \times \text{sen}(120 \times \pi \times t) \text{ [V]}$$

A expressão trigonométrica, também, permite identificar todos os valores das referidas tensões. O  $v$  minúsculo na função representa que seu resultado trata-se de um valor instantâneo, que varia em função do tempo.

Na representação por números complexos não é possível identificar a frequência que deve ser informada separadamente. O valor indicado corresponde ao módulo do fasor, e, portanto, o valor de pico. Entretanto, devido ao valor eficaz ser o

mais utilizado, a representação por números complexos também pode indicar o valor eficaz, dependendo da informação dada. No caso em estudo, a unidade  $V_p$  informa ser um valor de pico. De modo geral, quando não for informado o tipo de valor, trata-se de um valor eficaz.

### Representação por números complexos

Representa os sinais senoidais através de números complexos na forma polar.

Para o exemplo das Figuras temos:

$$V_A = 220 \angle 30^\circ [V_p] \quad V_B = 400 \angle 0^\circ [V_p] \quad f = 60 \text{ Hz}$$

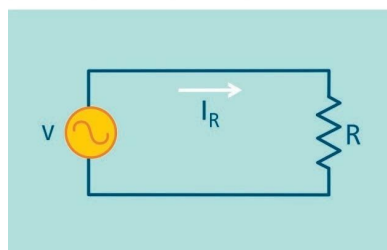
### Tipos de cargas em circuitos CA

Os circuitos CA terão comportamento diferente conforme o tipo de carga ligadas a estes.

#### Cargas resistivas puras

Em um circuito resistivo puro em CA, as variações na corrente ocorrem em fase (ângulo de fase igual a zero) com a tensão aplicada. A figura mostra um circuito resistivo puro em CA, bem como a tensão e corrente do circuito, representadas pelas formas de onda, expressões trigonométricas, diagrama fasorial e números complexos.

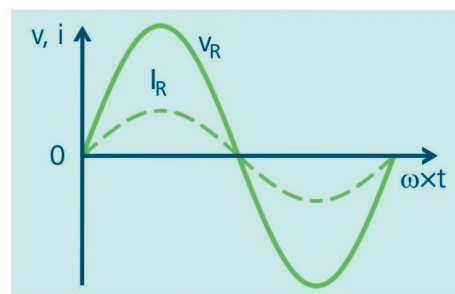
Circuito resistivo puro:



Expressões trigonométricas:

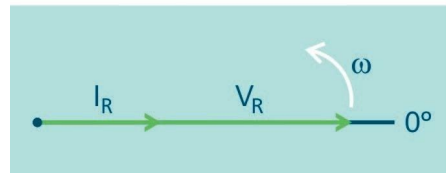
$$V_R = V_p \times \sin(\omega \times t)$$

Formas de onda:



$$I_R = \frac{V_p}{R} \times \sin(\omega t) = I_p \times \sin(\omega t)$$

Diagrama fasorial:



Números complexos:

$$V_R = V_p \angle 0^\circ [V_p]$$

$$I_R = I_p \angle 0^\circ [A_p]$$

Figura: Representações da corrente e tensão de um circuito resistivo puro

### Potência em cargas resistivas puras

Ao contrário de circuitos em CC, onde a potência é constante em função do tempo, nos circuitos CA a potência instantânea “p” varia em função da variação instantânea da tensão e da corrente, conforme a Equação.

Equação 3.6

$$p = v_R \times i_R = (V_p \times \sin(\omega t)) \times (I_p \times \sin(\omega t)) = V_p \times I_p \times \sin^2(\omega t)$$

A potência média de um circuito resistivo puro pode ser determinada, multiplicando-se a tensão eficaz pela corrente eficaz.

Equação 3.7

$$P_{\text{média}} = V_{\text{ef}} \times I_{\text{ef}} = 0,5 \times V_p \times I_p$$

A Figura apresenta a variação da potência em função do tempo para um circuito resistivo puro. Nota-se que a potência assume apenas valores positivos,

sendo denominada de potência ativa, uma vez que representa a potência fornecida à carga, produzindo trabalho útil.

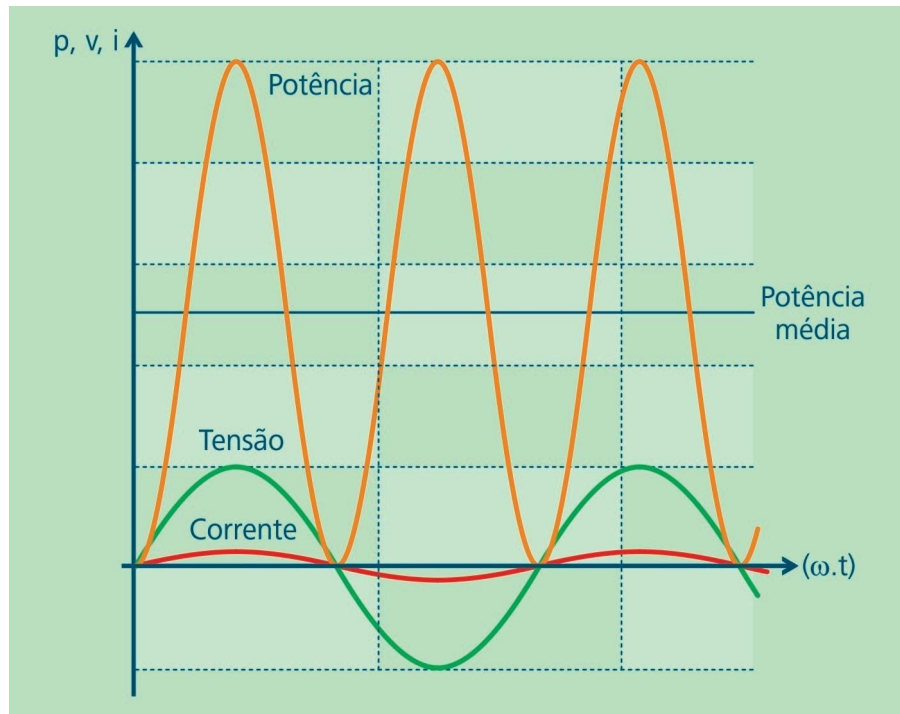
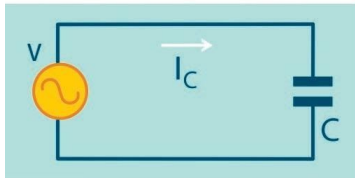


Figura: Variação da tensão, corrente e potência no circuito resistivo puro

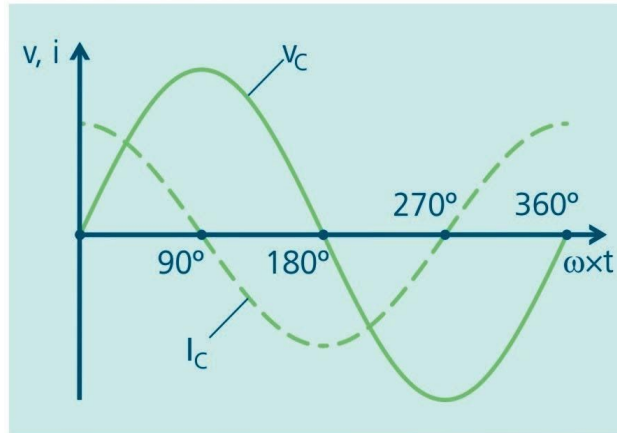
### Cargas capacitivas puras

Em um circuito capacitivo puro em CA, as variações na corrente estão adiantadas  $90^\circ$  em relação à tensão aplicada. A Figura mostra um circuito capacitivo puro em CA, bem como a tensão e corrente do circuito, representadas pelas formas de onda, expressões trigonométricas, diagrama fasorial e números complexos.

Circuito capacitivo puro:



Formas de onda:



Números complexos:

$$V_C = V_p \angle 0^\circ \text{ [V]}$$

$$I_C = I_p \angle +90^\circ \text{ [A]}$$

Expressões trigonométricas:

Equação 3.8

$$I_p = \omega \times C \times V_p$$

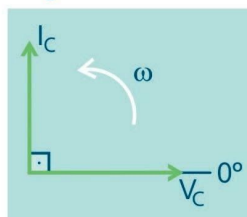
Equação 3.9

$$V_C = V_p \times \sin(\omega \times t)$$

Equação 3.10

$$I_C = \omega \times C \times V_p \times \sin(\omega \times t + 90^\circ)$$

Diagrama fasorial:



### Representações da corrente e tensão de um circuito capacitivo puro

#### Potência em cargas capacitivas puras

A potência instantânea “p” de um circuito capacitivo puro varia conforme a Equação.

Equação 3.11

$$p = v_C \times I_C = (V_p \times \sin(\omega t)) \times (I_p \times \sin(\omega t + 90^\circ)) = \frac{V_p \times I_p}{2} \times \sin(2 \times \omega t)$$



A Figura apresenta a variação da potência em função do tempo para um circuito capacitivo puro. Nota-se que a potência assume valores positivos e negativos, e seu valor médio é igual a zero. Essa potência é denominada potência reativa capacitiva, uma vez que representa a potência trocada entre a fonte e o capacitor (carga e descarga), não representando trabalho útil.

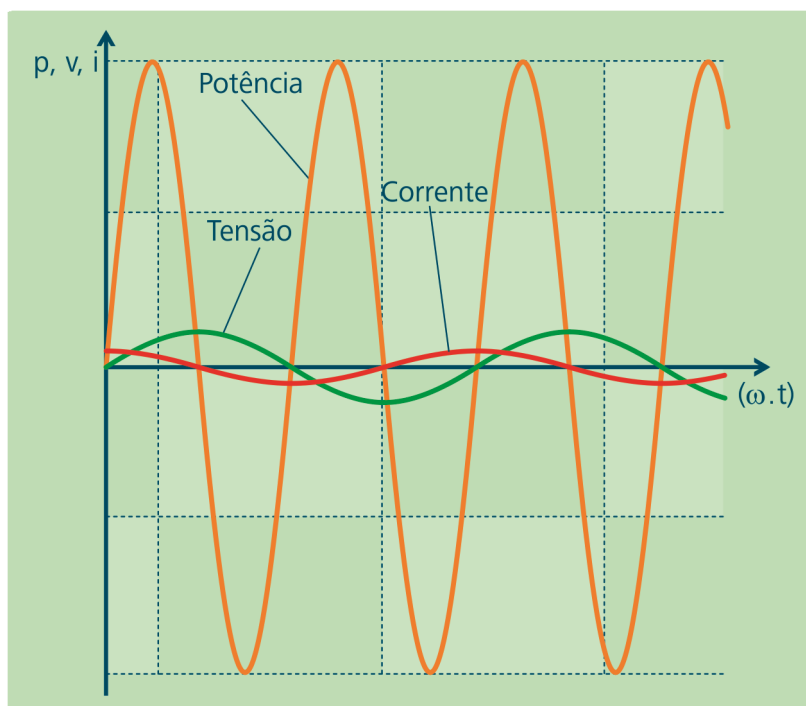
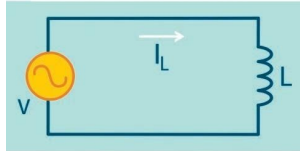


Figura: Variação da tensão, corrente e potência no circuito capacitivo puro

### Cargas indutivas puras

Em um circuito indutivo puro em CA, as variações na corrente estão atrasadas  $90^\circ$  em relação à tensão aplicada. A Figura mostra um circuito indutivo puro em CA, bem como a tensão e corrente do circuito, representadas pelas formas de onda, expressões trigonométricas, diagrama fasorial e números complexos.

Circuito indutivo puro:

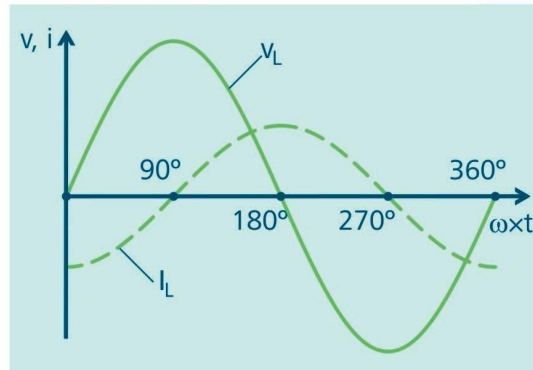


Números complexos:

$$V_L = V_p \angle 0^\circ \text{ [V}_p\text{]}$$

$$I_L = I_p \angle -90^\circ \text{ [A}_p\text{]}$$

Formas de onda:



Expressões trigonométricas:

Equação 3.12

$$I_L = \frac{1}{\omega \times L} \times V_p \times \sin(\omega \times t - 90^\circ)$$

Equação 3.13

$$I_p = \frac{1}{\omega \times L} \times V_p$$

Equação 3.14

$$v_L = V_p \times \sin(\omega \times t)$$

Diagrama fasorial:

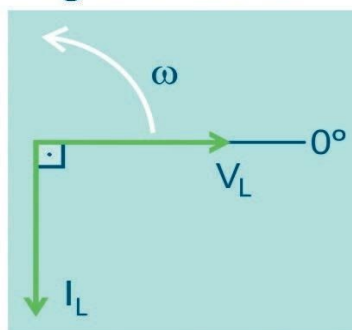


Figura: Representação da corrente e tensão de um circuito indutivo puro

### Potência em cargas indutivas puras

A potência instantânea de um circuito indutivo puro varia conforme a Equação:

Equação 3.15

$$p = v_L \times i_L = (V_p \times \sin(\omega \times t)) \times (I_p \times \sin(\omega \times t - 90^\circ)) = -\frac{V_p \times I_p}{2} \times \sin(2 \times \omega \times t)$$

A Figura apresenta a variação da potência em função do tempo para um circuito indutivo puro. Nota-se que a potência assume valores positivos e negativos, sendo seu valor médio igual a **zero**.

Esta potência é denominada **potência reativa indutiva**, uma vez que representa a potência trocada entre a fonte e o indutor (carga e descarga), não representando trabalho útil. Nota-se que a potência reativa indutiva é oposta à potência reativa capacitiva.

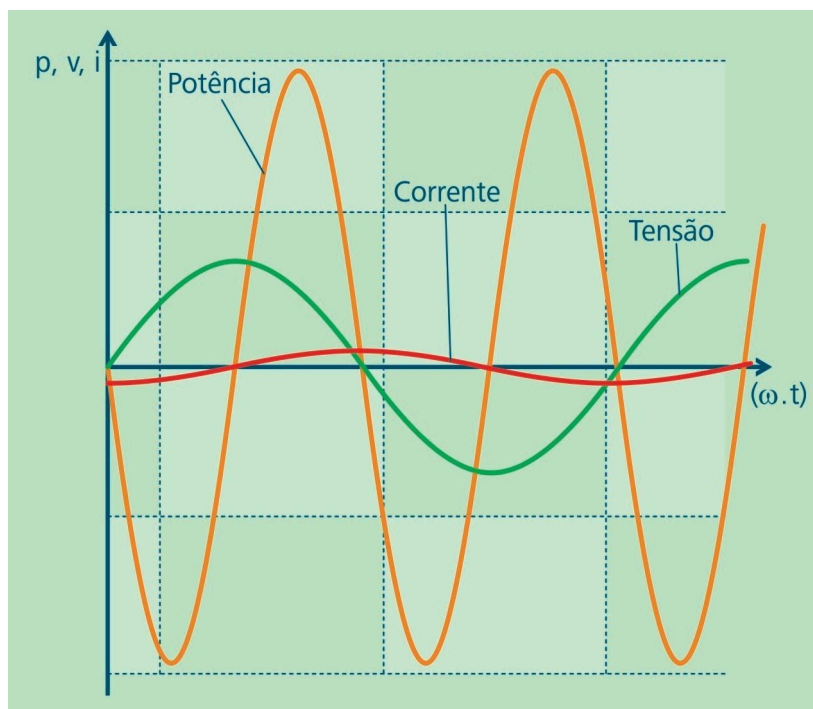


Figura: Variação da tensão, corrente e potência no circuito indutivo puro

### Impedância

A impedância, por definição, é a relação entre os valores eficazes de tensão e corrente em um circuito CA genérico. Essa grandeza representa a oposição total

oferecida pela carga (circuito misto) à passagem da corrente alternada senoidal. Seu valor é um número complexo composto pela resistência (componente real) e pela reatância (componente imaginário). Sua unidade é o ohm, podendo ser determinada pela Equação (forma retangular).

Equação 3.16

$$Z = R + jX$$

Para um resistor e um capacitor em série (circuito capacitivo):

Equação 3.17

$$Z = R + \frac{1}{j\omega \times C} = R - j \times |X_C|$$

Equação 3.18

$$Z = R + j\omega \times L = R + j \times |X_L|$$

A impedância de um circuito misto também pode ser representada através do triângulo de impedâncias, conforme a Figura.

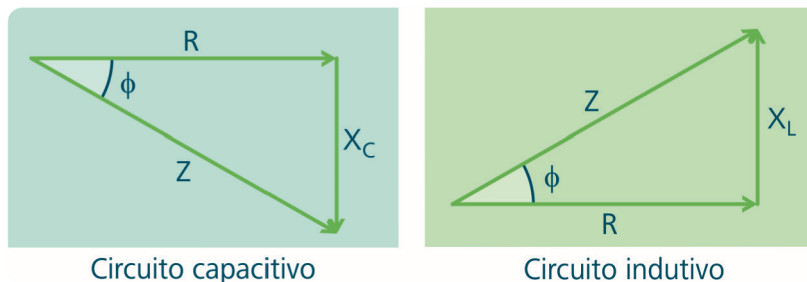


Figura: Triângulo de impedâncias para circuito capacitivo e indutivo

Na forma polar, a impedância é dada pela Equação.

Equação 3.19

$$Z = \sqrt{|R|^2 + |X|^2} \angle \phi$$

O conceito de impedância aplica-se a circuitos mistos, onde temos combinações entre resistor, capacitor e indutor, resultando nos circuitos **RC**, **RL**, **LC** e **RLC**, com as possíveis variações: série e paralelo.

No circuito RLC série, a impedância pode ser calculada pela Equação.

Equação 3.20

$$Z = R + j \times (X_L - X_C)$$

Sendo que se  $X_L > X_C$ , o circuito é indutivo; se  $X_L < X_C$ , o circuito é capacitivo; enquanto que, se  $X_L = X_C$ , o circuito estará em ressonância. Na ressonância as reatâncias indutiva e capacitiva se anulam, dando ao circuito um comportamento de resistivo puro.

No circuito RLC paralelo, a impedância pode ser calculada pela Equação.

Sendo que se  $X_L > X_C$ , o circuito é capacitivo; se  $X_L < X_C$ , o circuito é indutivo; enquanto que, se  $X_L = X_C$ , o circuito estará em ressonância.

### Potências e energias em circuitos CA monofásicos

Num sistema elétrico, existem dois tipos de energia: a energia ativa e a energia reativa. Qualquer equipamento que transforma a energia elétrica em outra forma de energia como um ferro elétrico, que transforma a energia elétrica em energia térmica, não necessita da energia intermediária. Dessa forma, a energia fornecida pelo gerador é totalmente utilizada ou consumida pelo ferro elétrico.

Já os equipamentos que possuem enrolamentos, tais como motores, transformadores, reatores para iluminação fluorescente, reatores para iluminação a vapor de mercúrio, etc., necessitam de energia magnetizante, como intermediária da energia ativa e passam a depender da energia ativa e reativa. O mesmo ocorre com circuitos capacitivos.

### Potência ativa (P)

A potência ativa de um circuito mede a taxa de transformação de energia elétrica em trabalho, produzindo calor, iluminação, movimento, etc. Sua unidade é o W e seu valor pode ser determinado pela Equação.

Equação 3.22

$$P = |V_{ef}| \times |I_{ef}| \times \cos \phi$$

Onde:  $\phi$  é ângulo de fase ou ângulo da impedância

### Potência reativa (Q)

A potência reativa mede a taxa de processo de carga e descarga dos elementos reativos de um circuito, mantendo, assim, os campos elétrico ou eletromagnético. Sua unidade é o volt ampère reativo (VAr), e seu valor pode ser determinado pela Equação.

Equação 3.23

$$Q = |V_{ef}| \times |I_{ef}| \times \sin \phi$$

Em outras palavras, a energia reativa, que é utilizada para criar o campo magnético ou elétrico do circuito, não é consumida como energia ativa, mas trocada entre os elementos e o sistema. Entretanto, sua presença no circuito é fundamental para a criação dos campos magnéticos e elétricos, os quais possibilitam a ocorrência de fenômenos elétricos e eletromagnéticos, que produzem trabalho através do consumo de energia ativa.

A potência reativa estará presente num circuito elétrico, quando nele estiver inserido algum elemento armazenador de energia, como o indutor ou o capacitor, ou ainda ambos. O valor médio das potências reativas, tanto capacitiva quanto indutiva é zero, indicando que não há consumo de energia. Entretanto, ocorre o processo de carga e descarga de energia reativa cuja taxa é dada pela expressão da potência reativa.

### Potência aparente (S)

A potência aparente é a soma vetorial das potências ativa e reativa, e é também chamada de potência total ou instalada. Sua unidade é o volt ampère (VA), e seu valor pode ser determinado pela Equação.

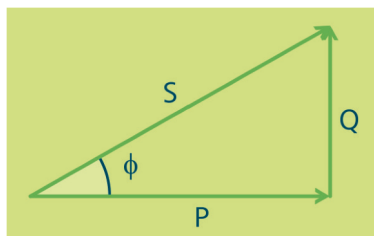


Figura: Triângulo de potências para uma carga indutiva

Equação 3.24

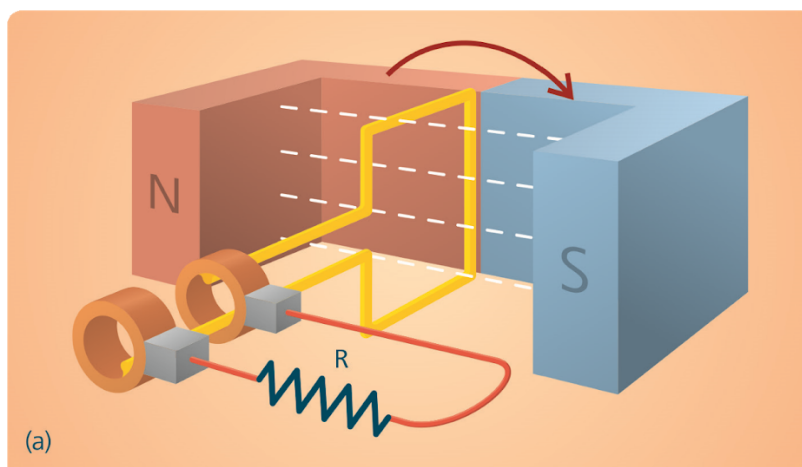
$$S = |V_{ef}| \times |I_{ef}|$$

### Tipos de sistemas elétricos

Tecnicamente, existem vários tipos de sistemas, tais como o monofásico, o bifásico, o trifásico, o hexafásico, etc. Entretanto, as vantagens dos sistemas trifásicos prevaleceram entre os demais sistemas, tornando-o o mais utilizado nos sistemas elétricos de potência em todo o mundo. Os outros sistemas também são utilizados, entretanto em pequena escala e em aplicações específicas.

### Sistema monofásico

O entendimento do sistema monofásico é necessário para o estudo do sistema trifásico. Note que um sistema monofásico difere de um circuito monofásico. A instalação de uma lâmpada utiliza um circuito monofásico, na grande maioria das vezes derivado de um sistema trifásico que emprega geradores, transformadores, linhas de transmissão e linhas de distribuição trifásicas. Já um sistema monofásico é aquele oriundo de um gerador monofásico que produz uma única tensão senoidal, chamada tensão de fase. A Figura mostra, de forma simplificada, duas tipologias de gerador monofásico.



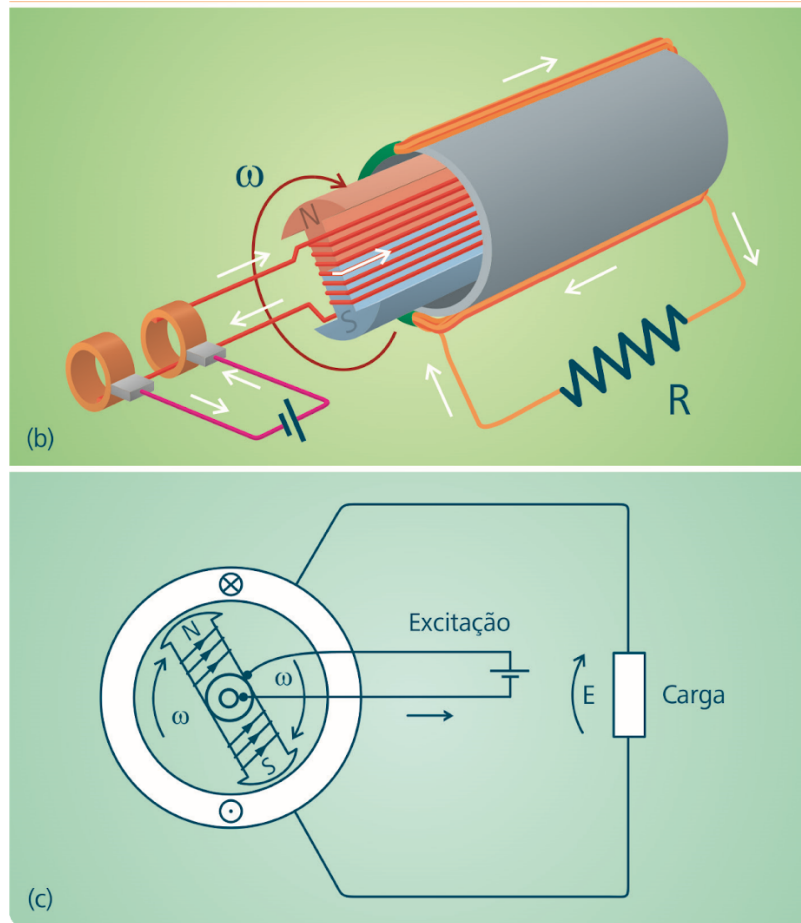


Figura: Gerador monofásico – detalhes construtivos com campo fixo com geração no rotor (parte giratória) (a) e campo móvel com geração no estator (parte estática) (b e c)

Na Figura temos um gerador monofásico com geração no rotor, isto é, o campo magnético do estator é fixo, enquanto a bobina de geração é forçada a girar dentro desse campo magnético, induzindo, pelas Leis de Faraday e Lenz, uma tensão alternada em seus terminais. Na Figura temos um gerador monofásico com geração no estator, isto é, o campo magnético é produzido no rotor, que é forçado a girar no interior da bobina de geração fixa, induzindo, pelas leis de Faraday e Lenz, uma tensão alternada em seus terminais.



### **Sistema trifásico**

Os sistemas que possuem mais de uma fase são denominados polifásicos, apresentam fases iguais, porém defasadas entre si de um ângulo de  $360^\circ/n$ , sendo  $n$  o número de fases. O sistema polifásico composto de três fases, chamado de trifásico, é o mais usado em todas as etapas do sistema elétrico. Existem aparelhos que demandam três fases para o seu funcionamento, como é o caso de motores elétricos trifásicos.

### **Características dos sistemas trifásicos**

Os sistemas trifásicos apresentam uma série de vantagens em relação aos monofásicos, tais como:

- Possibilidade de obtenção de duas tensões diferentes na mesma rede ou fonte. Além disso, os circuitos monofásicos podem ser alimentados pelas fases do sistema trifásico.
- As máquinas trifásicas têm quase 50 % a mais de potência que as monofásicas de mesmo peso e volume.
- O conjugado (torque) dos motores trifásicos é mais constante que o das máquinas monofásicas.
- Para transmitir a mesma potência, as redes trifásicas usam condutores de menor bitola que as monofásicas.
- Redes trifásicas criam campos magnéticos giratórios utilizados pelos motores de indução trifásicos que são os mais baratos e robustos de todos os motores elétricos.

### **Gerador trifásico**

Em um gerador trifásico, existem três enrolamentos distribuídos simetricamente no estator da máquina, propiciando uma separação física de  $120^\circ$  entre os enrolamentos. Dessa forma, a geração resulta em três tensões (fases) com a mesma amplitude e frequência, porém defasadas em  $120^\circ$ . A Figura mostra, de

forma simplificada, um gerador trifásico com geração no estator e rotor, bem como seus enrolamentos e formas de onda.

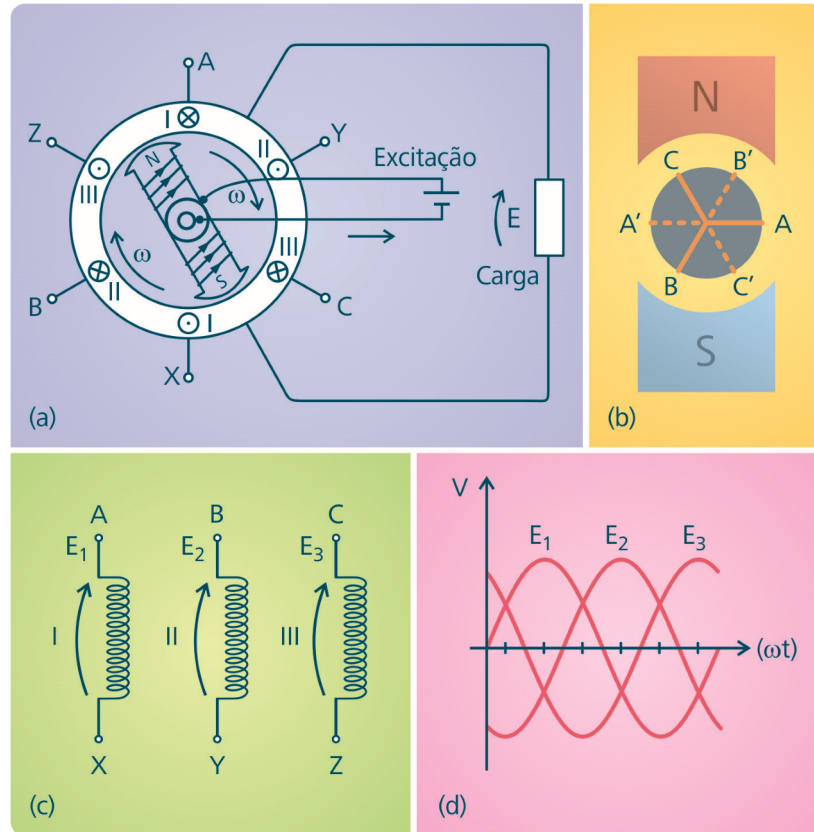
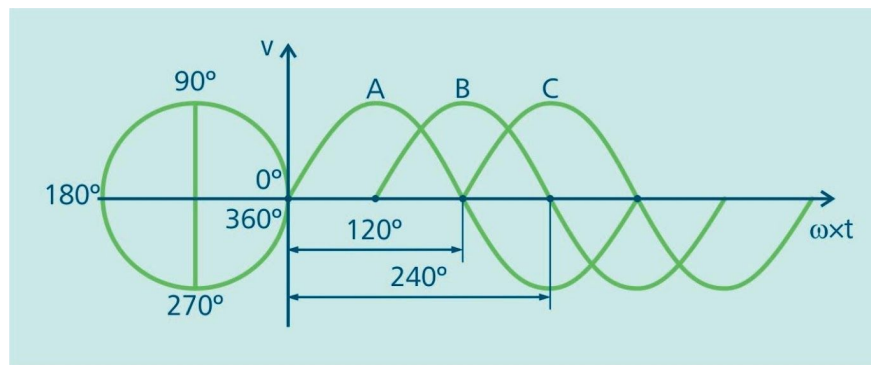


Figura: Gerador trifásico – detalhes construtivos com campo móvel com geração no estator (a); campo fixo com geração no rotor (b); enrolamentos (c) e formas de onda (d)

Da mesma forma que no gerador monofásico, a tipologia com geração no estator é a mais viável, entretanto utilizaremos aqui a tipologia com geração no rotor para um melhor entendimento das tensões geradas.

A Figura mostra a representação por forma de onda, expressões trigonométricas, números complexos e diagrama fasorial para as tensões A, B e C.



Equação 4.1

$$v_A = v_p \times \sin(\omega \times t)$$

Equação 4.2

$$v_B = v_p \times \sin(\omega \times t - 120^\circ)$$

Equação 4.3

$$v_C = v_p \times \sin(\omega \times t - 240^\circ)$$

$$V_A = V \angle 0^\circ$$

$$V_B = V \angle -120^\circ \text{ V ou } V \angle 240^\circ \text{ V}$$

$$V_C = V \angle -240^\circ \text{ V ou } V \angle 120^\circ \text{ V}$$

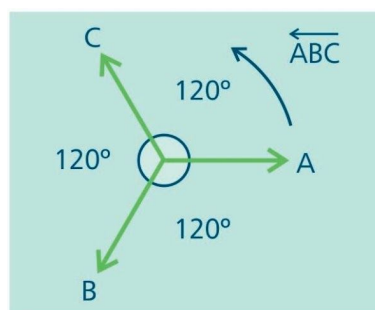


Figura: Representações das tensões de um gerador trifásico ABC anti-horário

### Ligações estrela e triângulo

Como vimos, os geradores trifásicos possuem três bobinas (seis terminais). Considerando a utilização independente destas bobinas, necessitaríamos de seis

condutores para o transporte da energia gerada por um gerador trifásico. Entretanto, existem duas formas de ligação das bobinas de máquinas elétricas trifásicas que permitem a redução do número de condutores e, conseqüentemente, dos custos no transporte da energia. Estas ligações são denominadas estrela (Y) e triângulo ou delta ( $\Delta$ ), devido ao seu formato.

A ligação dos terminais A', B' e C', como na Figura, resulta num gerador ligado em Y, ao passo que a ligação de A em B', de B em C' e de C em A', como na Figura, resulta num gerador ligado em  $\Delta$ . Note que na ligação  $\Delta$  não há condutor neutro, enquanto na ligação Y, o ponto de interligação das bobinas pode originar o condutor neutro (N) se devidamente aterrado.

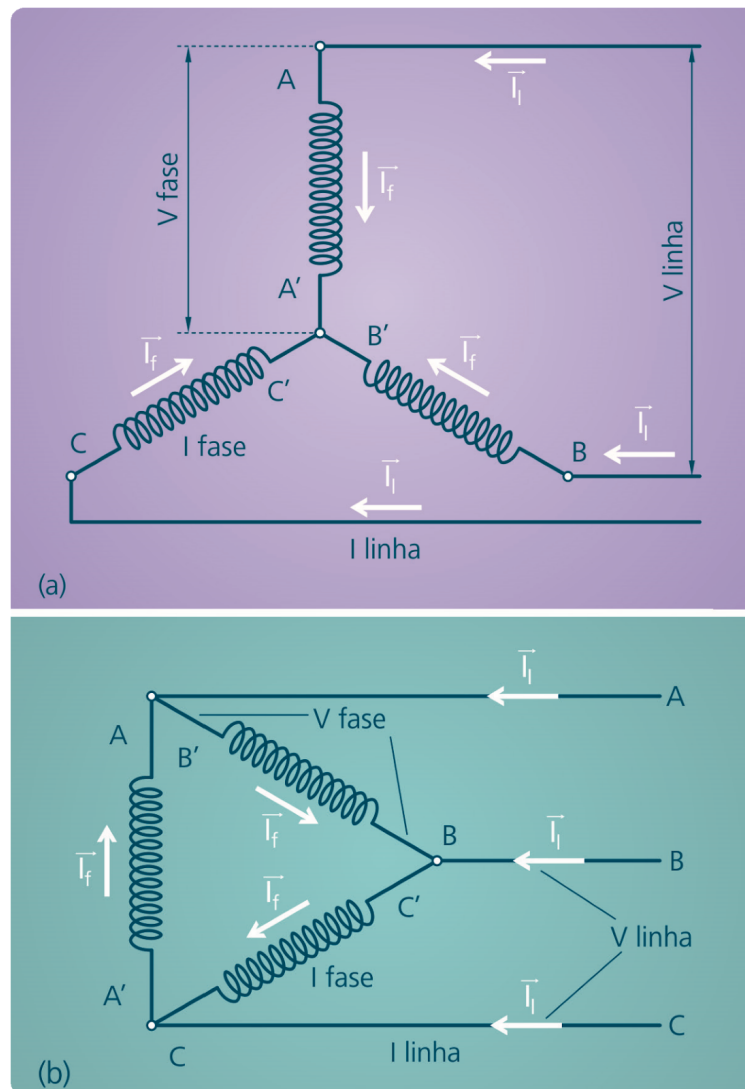


Figura: Ligação estrela (a) e ligação triângulo (b)

A ligação das bobinas nas configurações Y e  $\Delta$ , produz valores de linha e valores de fase, aplicados às tensões e às correntes dos circuitos trifásicos.

Considerando equilibrada a carga dos geradores da Figura, isto é, mesma potência conectada a cada fase, obtemos as seguintes relações entre os valores de correntes e tensões de linha e de fase:

Na ligação Y	Na ligação $\Delta$
$ I_l  =  I_f $	$ V_l  =  V_f $
$ V_l  = \sqrt{3} \times  V_f $	$ I_l  = \sqrt{3} \times  I_f $

**Corrente de linha ( $I_l$ )** – é a corrente que circula nos terminais das máquinas elétricas, isto é, a corrente fornecida à rede pelo gerador ou recebida da rede pelos motores e transformadores (linha).

**Corrente de fase ( $I_f$ )** – é a corrente que circula pelo interior das bobinas das máquinas elétricas.

**Tensão de linha ( $V_l$ )** – é a diferença de potencial entre duas fases quaisquer de um gerador ou da rede que alimenta motores e transformadores.

**Tensão de fase ( $V_f$ )** – é a diferença de potencial entre os terminais individuais de qualquer bobina de uma máquina elétrica. No caso da ligação Y, entre qualquer fase e o neutro.

Observe que na ligação Y, as correntes de linha e de fase são iguais em módulo, enquanto a tensão de linha é vezes maior que a tensão de fase. Já na ligação  $\Delta$  ocorre o contrário; as tensões de linha e de fase são iguais em módulo, enquanto a corrente de linha é vezes maior que a corrente de fase. A relação  $\sqrt{3}$  surge, em ambos os casos, devido à defasagem angular de  $120^\circ$  entre as fases. Além das possíveis variações de módulo, as correntes de linha e de fase, bem como as tensões de linha e de fase poderão estar defasadas, dependendo do tipo de ligação, sequência de fase e rotação de fase.

As relações apresentadas entre valores de linha e fase também são válidas para as ligações de outras máquinas elétricas trifásicas, como transformadores e motores elétricos equilibrados. A opção pelas ligações Y ou  $\Delta$  se deve às características técnicas e operacionais do sistema elétrico e as especificações técnicas das máquinas elétricas. Por exemplo, um motor elétrico com a especificação de placa 380/220 V pode ligar em partida direta tanto numa rede trifásica de 380 V (valor de linha) ou de 220 V (valor de fase). O menor valor da especificação do motor, no caso 220 V, corresponde à tensão nominal da bobina. Dessa forma, numa rede de 220 V, para que a bobina do motor receba a tensão nominal, a forma de ligação de suas bobinas será  $\Delta$ . Já numa rede de 380 V a ligação correta será a Y, caso contrário o motor será submetido a uma sobretensão, o que ocasionaria sua queima.

### Potências em circuitos trifásicos

As potências ativa, reativa e aparente, estão presentes tanto em circuitos CA monofásicos, quanto em circuitos CA trifásicos. Entretanto, precisamos entender como estas potências são determinadas em circuitos trifásicos.

Relembrando as potências em circuitos CA monofásicos, temos:

Equação 4.4

$$P = |V_{ef}| \times |I_{ef}| \times \cos \phi$$

Equação 4.5

$$Q = |V_{ef}| \times |I_{ef}| \times \sin \phi$$

Equação 4.6

$$S = |V_{ef}| \times |I_{ef}|$$

Considerando um circuito trifásico equilibrado e tendo em vista que eles são constituídos por três circuitos monofásicos de mesma potência conectados em Y ou  $\Delta$ , poderemos determinar as potências trifásicas totais através dos valores de fase, conforme as Equações:

Equação 4.7

$$P = 3 \times |V_f| \times |I_f| \times \cos \phi$$

Equação 4.8

$$Q = 3 \times |V_f| \times |I_f| \times \sin \phi$$

Equação 4.9

$$S = 3 \times |V_f| \times |I_f|$$

Observe que as expressões referidas empregam valores eficazes e são válidas para a determinação das potências de máquinas elétricas trifásicas ligadas tanto em Y como em  $\Delta$ .

Ainda, considerando o mesmo circuito equilibrado e substituindo os valores de fase por valores de linha, através das relações já conhecidas, poderemos determinar as potências trifásicas totais através dos valores de linha, conforme as:

Equação 4.10

$$P = \sqrt{3} \times |V_l| \times |I_l| \times \cos \phi$$

Equação 4.11

$$Q = \sqrt{3} \times |V_l| \times |I_l| \times \sin \phi$$

Equação 4.12

$$S = \sqrt{3} \times |V_l| \times |I_l|$$

Entretanto, caso as cargas sejam desequilibradas, deveremos determinar as potências ativas e reativas individuais de cada fase (A, B e C), para posterior somatório. Já a potência aparente poderá ser obtida empregando o triângulo de potências, conforme as Equações:

Equação 4.13

$$P = |V_{fA}| \times |I_{fA}| \times \cos(\phi_A) + |V_{fB}| \times |I_{fB}| \times \cos(\phi_B) + |V_{fC}| \times |I_{fC}| \times \cos(\phi_C)$$

Equação 4.14

$$Q = |V_{fA}| \times |I_{fA}| \times \sin(\phi_A) + |V_{fB}| \times |I_{fB}| \times \sin(\phi_B) + |V_{fC}| \times |I_{fC}| \times \sin(\phi_C)$$

Equação 4.15

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

### Sistema Elétrico de Potência (SEP)

O sistema elétrico brasileiro está organizado em quatro etapas: geração, transmissão, distribuição (primária e secundária) e utilização, conforme mostra a Figura.



Figura: Etapas do sistema elétrico

### Geração



A geração de energia elétrica consiste na obtenção e na transformação da energia de fontes primárias, disponíveis em nosso planeta, em energia elétrica. Os princípios, bem como as formas de geração de energia elétrica.

### **Transmissão**

O sistema de geração de energia elétrica no Brasil é basicamente hidrotérmico, com forte predominância de hidrelétricas que, em sua grande maioria, encontram-se distantes dos grandes centros de consumo. Ainda, a grande extensão do território brasileiro, associada à irregularidade pluviométrica nas diferentes regiões do país, tornou necessária a interligação do sistema elétrico brasileiro, através de linhas de transmissão de alta tensão.

A tensão de geração, na grande maioria das centrais, é na ordem de alguns kV devido às limitações de isolamento elétrica dos geradores. Entretanto, essa tensão é muito baixa para a transmissão, acarretando elevadas perdas e exigindo superdimensionamento das linhas, devido às elevadas correntes elétricas e esforços mecânicos. Dessa forma, muito próxima às centrais geradoras, uma subestação eleva a tensão de geração para níveis técnicos compatíveis com os níveis de energia a serem transmitidos.

### **Distribuição**

Apesar de as linhas de transmissão e subtransmissão transportarem energia a longas distâncias com significativa redução de perdas, as altas tensões envolvidas não oferecem a segurança necessária e viabilidade financeira para adentrar nos centros urbanos, distribuindo energia às unidades consumidoras. Dessa forma, próxima aos centros de consumo, subestações rebaixadoras reduzem a tensão para níveis mais seguros, constituindo a rede de distribuição de média tensão, também chamada de distribuição primária, geralmente nas tensões de 13,8 ou 23,1 kV. Na grande maioria das subestações rebaixadoras, a distribuição primária é feita através de vários circuitos alimentadores, que atendem regiões e/ou bairros específicos.

A tensão de distribuição primária atende aos seguintes critérios: ser suficientemente baixa, para fins de viabilidade financeira e de segurança na

utilização e manutenção e ser suficientemente alta, a fim de manter reduzidas as perdas no transporte, desde a subestação até os centros de consumo. Dessa forma, seu valor não é compatível com os padrões de utilização em equipamentos elétricos e eletrônicos, devendo ser novamente rebaixada. Este rebaixamento é feito através de transformadores de distribuição dispostos muito próximos às unidades consumidoras, sendo geralmente fixados aos postes da rede. A partir destes transformadores, constitui-se a rede de distribuição de baixa tensão, também chamada de distribuição secundária, geralmente nas tensões comerciais de 127, 220, 380 e/ou 440 V.

### **Utilização**

Uma vez gerada, transmitida e distribuída, a energia elétrica encontra-se disponível para a utilização pelos consumidores. Entretanto, a grande maioria das necessidades energéticas envolve outras modalidades de energia. Dessa forma, em sua utilização final, a energia precisa ser transformada novamente, através dos mais diversos equipamentos, resultando em energia mecânica, térmica, luminosa, sonora, etc. A transformação e utilização dessas energias caracterizam o consumo de energia elétrica.

Os consumidores supridos de energia em baixa tensão são classificados pela concessionária de energia em monofásicos, bifásicos e trifásicos, segundo o número de fases que recebem, em função da carga instalada. Consumidores com carga instalada elevada deverão comprar energia diretamente da rede de distribuição primária, arcando com os custos de rebaixamento da tensão, porém usufruindo tarifas mais baixas.

### **Medidas elétricas**

Iniciaremos o estudo sobre a medição de grandezas elétricas tais como corrente, resistência, tensão e potência, levando em conta seus respectivos aparelhos amperímetro, ohmímetro, voltímetro e wattímetro. Também serão apresentados os cuidados a serem tomados para uma medição segura e correta, sem danificar os equipamentos.

O estudo dos instrumentos de medição é cada vez mais importante para obter um melhor entendimento e aprimoramento em circuitos elétricos variados desde placas em circuitos eletrônicos, até mesmo redes de distribuição elétrica. Os aparelhos elétricos de medição são separados em duas versões: analógica (de ponteiro) e digital. Ambos equipamentos possuem escalas configuráveis de medição, que definem o limite de medição do aparelho.

Existem também diferenças entre instrumentos produzidos para CA ou CC. Os aparelhos produzidos para medir grandezas em CA não possuem polaridade, enquanto os aparelhos produzidos para grandezas em CC possuem. Os aparelhos CC possuem terminais positivos e negativos indicados. É importante notar que os aparelhos analógicos para CC podem ser danificados se conectados de forma incorreta. Os instrumentos analógicos são baseados no funcionamento do galvanômetro. Este aparelho pode medir correntes pequenas ou a diferença de potencial entre dois pontos. O princípio de funcionamento do galvanômetro é apresentado na Figura.

Devido à característica construtiva dos medidores analógicos, estes possuem escalas. Estas são necessárias para a limitação do curso da agulha indicadora nos instrumentos analógicos, e assim limitam o valor máximo que pode ser medido sem danificar o instrumento.

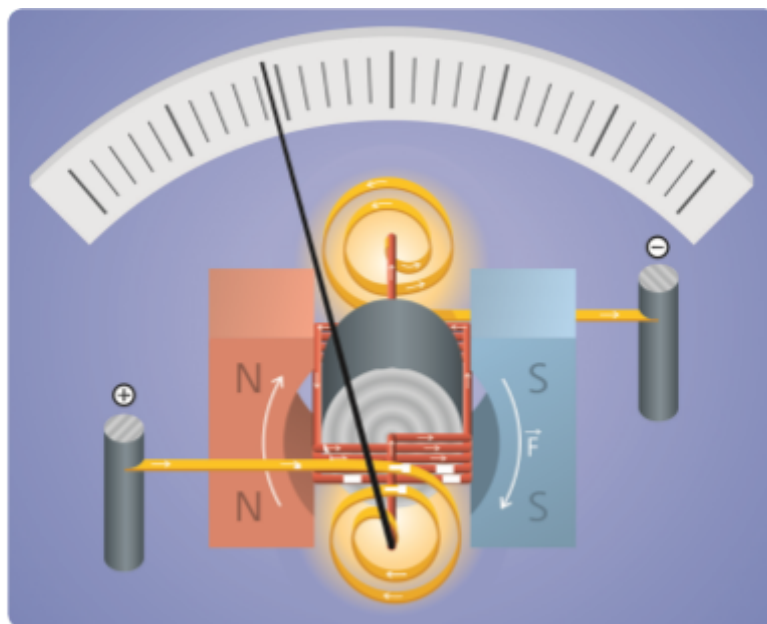


Figura: Ilustração de um galvanômetro

### **Instrumentos básicos de medição**

É de suma importância o conhecimento dos instrumentos básicos de medição das grandezas elétricas, para que o profissional consiga obter os dados necessários para execução de forma correta e segura suas atividades profissionais. Para isso, o profissional deve seguir as instruções de uso do aparelho fornecidas pelo fabricante. Essas informações podem ser obtidas em catálogos e/ou pela simbologia apresentada no próprio instrumento.

### **Amperímetros**

O amperímetro é um instrumento usado para medir corrente elétrica, lembrando que corrente é o fluxo de elétrons (carga –  $Q$ ) sobre um intervalo de tempo ( $\Delta T$ ).

O amperímetro pode realizar a medida de corrente de forma direta ou de forma indireta.

A medição direta é realizada pela conexão do amperímetro em série com o circuito, isto é, a corrente entra por um terminal e sai pelo outro. Relembrando que,

em um circuito série, a corrente que flui entre os elementos em série é a mesma, o aparelho mostrará a corrente do circuito série. Em instrumentos analógicos a corrente é medida a partir do campo magnético que ela produz, e em instrumentos digitais a corrente é medida a partir da tensão de um resistor em série.

A medição indireta é realizada por um amperímetro com uma garra. Esta garra atua como uma espira, e assim, pela lei de Faraday, uma tensão é gerada nos terminais desta espira. A tensão gerada é proporcional à corrente que passa dentro da garra. O aparelho, então, converte esta tensão em uma leitura de corrente.

Tanto em instrumentos analógicos quanto em instrumentos digitais, a resistência interna de um amperímetro deve ser muito baixa, para não influenciar no circuito medido. A unidade de medida, no Sistema Internacional de Unidades (SI), para a corrente elétrica é o ampère (A).

A Figura apresenta um amperímetro de garra digital, e a Figura b apresenta um amperímetro analógico.

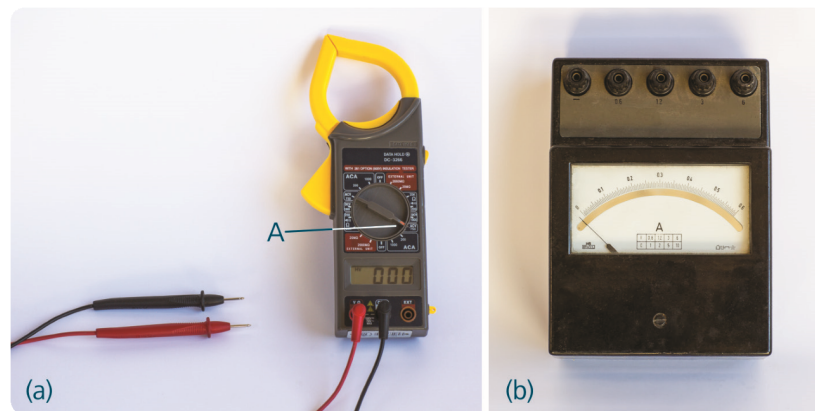


Figura: Amperímetro digital de garra (a) e amperímetro analógico (b)

Para uma medição direta, o amperímetro deve ser conectado ao circuito de acordo com a Figura. Para uma medição indireta, o amperímetro de garra deve ser conectado no circuito conforme a Figura.

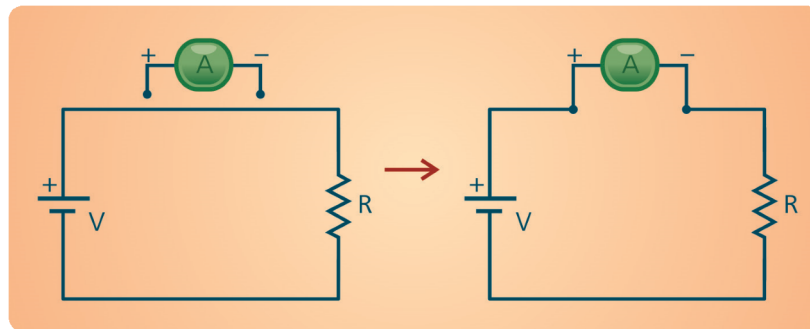


Figura: Ligação do amperímetro em um circuito



Figura: Medição de corrente com um amperímetro com garra

### **Voltímetros**

Voltímetro é um aparelho usado para medir diferença de potencial (tensão) entre dois pontos de um circuito elétrico, lembrando que a tensão representa a força que impulsiona os elétrons. Sua medida é dada em volts (V) – homenagem ao físico italiano Alessandro Volta.

Um voltímetro ideal possui resistência interna infinita. Entretanto, multímetros reais apresentam uma resistência muito alta. A Figura apresenta um voltímetro analógico.



Figura: Voltímetro analógico convencional

O mesmo raciocínio utilizado para a conexão do amperímetro é utilizada na conexão do voltímetro. Este deve ser conectado em paralelo com os dois pontos do circuito a ser medida a tensão, pois em elementos conectados em paralelo a tensão sobre os mesmos é igual. A Figura ilustra a conexão de voltímetros a diferentes pontos de um circuito.

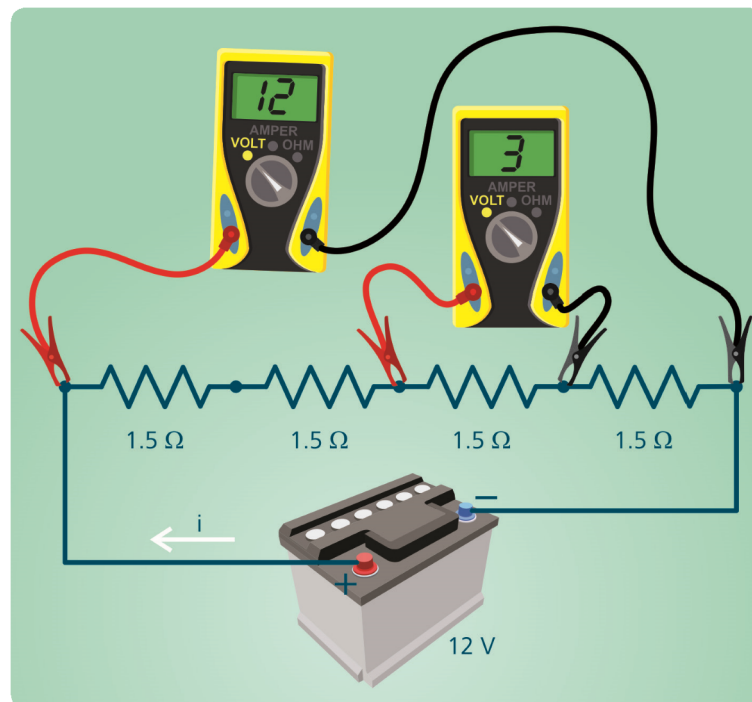


Figura: Ilustração de como ligar um voltímetro

## Ohmímetros

O ohmímetro é o instrumento utilizado para medir a resistência elétrica de materiais elétricos, tais como resistores. O princípio de funcionamento deste instrumento baseia-se na primeira Lei de Ohm. A Figura ilustra o circuito de medição de um ohmímetro.

Ao aplicarmos uma tensão  $E$ , de valor conhecido, uma corrente irá circular pelo circuito. O valor do resistor  $R_x$  é desconhecido. Entretanto, podemos medir a corrente que circula no circuito. Conhecendo a tensão sobre um resistor e a corrente que circula neste, podemos calcular sua resistência.

A Figura também apresenta o modo de conexão do instrumento. O ohmímetro deve ser conectado em paralelo com o resistor a ser medido. É importante notar que o resistor a ser medido deve estar desconectado de qualquer outro circuito, como fontes de tensão.

A resistência  $R$  variável na Figura é uma representação da resistência interna do ohmímetro. Esta resistência é conhecida a partir de testes e desconsiderada, por ajustes, na medida de resistência elétrica. Esta resistência também tem a finalidade de colocar a fonte de tensão  $E$  em curto-circuito.

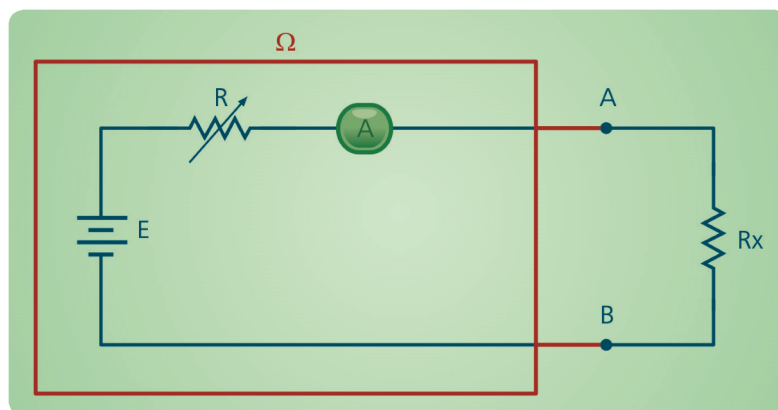


Figura: Circuito interno de um ohmímetro

A Figura apresenta um ohmímetro. Como este instrumento é utilizado somente para a medição de resistências, os ohmímetros com somente esta função são produzidos para serem utilizados como instrumentos de precisão.



Um uso alternativo do ohmímetro é a utilização do aparelho como um medidor de continuidade.



Figura: Ohmímetro convencional

### **Multímetros**

Os multímetros, ou multitestes, são aparelhos capazes de realizar diferentes medidas, como tensão, corrente, resistência, entre outros. Esta característica torna o aparelho muito versátil. Os multímetros podem ser fabricados para serem utilizados como equipamentos de bancada ou como equipamentos portáteis. Estes equipamentos também podem ser analógicos ou digitais. Os multímetros são projetados para medir grandezas em CC ou CA.

Multímetros mais modernos podem realizar os seguintes testes ou medidas: tensão (CC/CA), corrente (CC/CA), resistência, capacitância, frequência (período), temperatura, teste de diodos e teste de continuidade.

Os multímetros também apresentam uma variedade de resoluções das medidas, desde uma casa decimal na medida de mV a seis casas decimais, por exemplo.

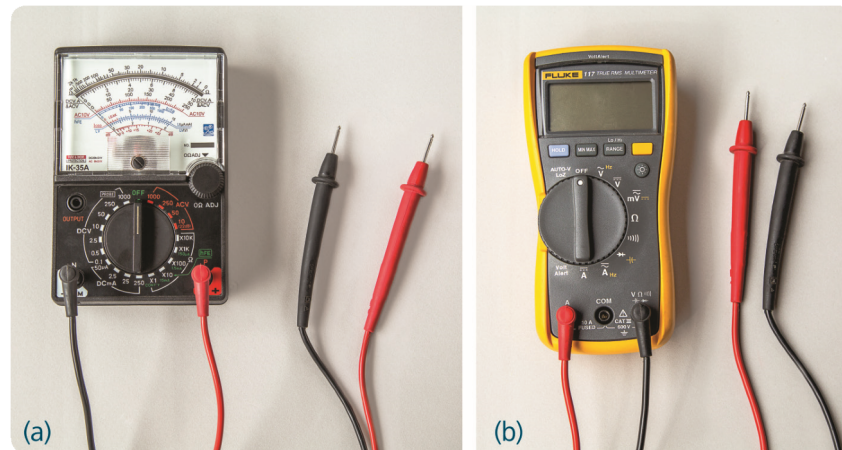


Figura: Multímetros portáteis analógico (a) e digital (b)



Figura: Multímetro de bancada

### Wattímetros

É um equipamento utilizado para medição da potência ativa média consumida por uma carga.

A forma direta de medir a potência de um sistema é medir a tensão e a corrente deste, e realizar a multiplicação destas grandezas.

Em aparelhos analógicos duas bobinas, uma para corrente e uma para tensão, são utilizadas para realizar a medida da potência.

Já em aparelhos digitais as bobinas são substituídas por circuitos capazes de medir tensão e corrente. Da mesma forma de medição de corrente, esta pode ser realizada de forma direta e indireta. A Figura apresenta um wattímetro digital com medição indireta de corrente.

Assim, pode-se dizer que um wattímetro possui internamente um voltímetro e um amperímetro.

O esquema de conexão de um wattímetro é composto pela conexão de um voltímetro em paralelo e um amperímetro em série com a carga a ser medida, conforme a Figura.

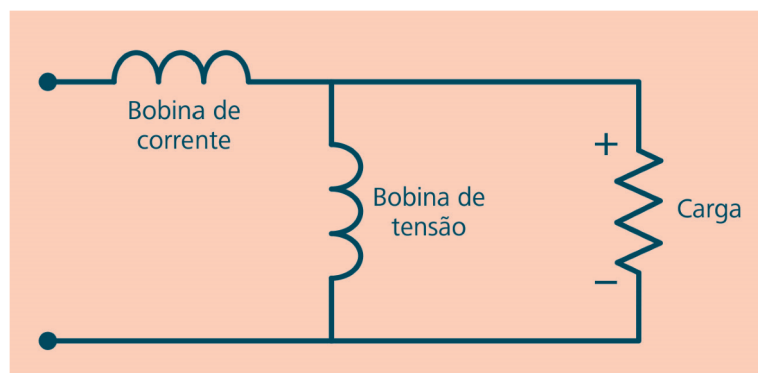


Figura: Ligação da bobina de tensão e bobina de corrente

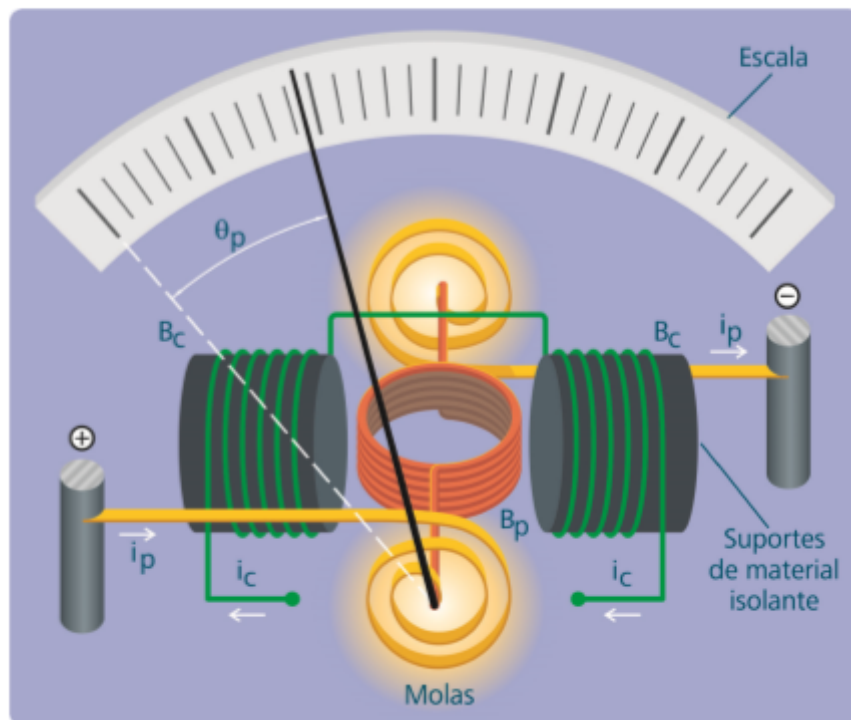


Figura: Princípio do circuito interno de um wattímetro analógico

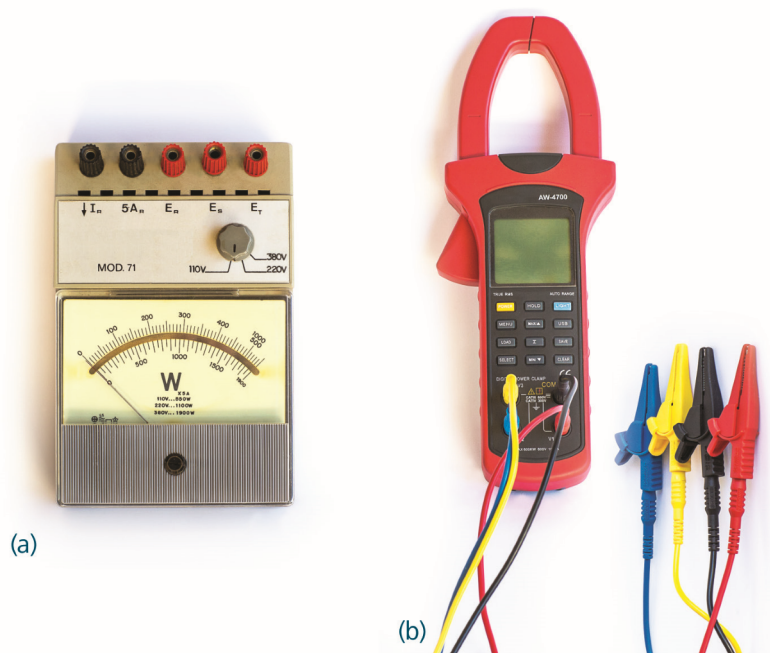


Figura: Wattímetro analógico (a) e digital (b)

## Emendas e conexões

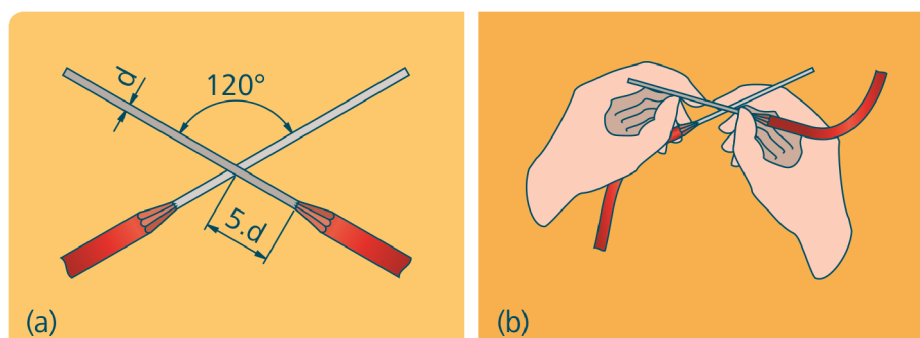
Normalmente, as atividades dos setores elétricos apresentam situações onde se faz necessário o uso de emendas e conexões devido ao fio condutor disponível não atender o comprimento necessário, ou mesmo pelo rompimento de uma fiação existente. A NBR 5410 estabelece que as conexões de condutores entre si e com outros componentes da instalação devem garantir continuidade elétrica durável, adequada suportabilidade e proteção mecânica. Além disso, as conexões devem ser acessíveis para verificação, ensaios e manutenção, exceto em emendas de cabos enterrados e emendas imersas. Salienta-se também que as emendas e conexões devem ficar contidas em invólucros adequados para que se obtenha a necessária proteção e isolamento elétrica.

### Emendas de condutores em prolongamento

Os condutores de energia elétrica são categorizados em fios e cabos. Um condutor é chamado de fio quando este é constituído por um corpo sólido, contínuo e rígido, e é chamado de cabo quando este é constituído por vários fios.

As emendas de prolongamento têm como finalidade o prolongamento de um condutor por meio da conexão com um segundo condutor.

Em instalações residenciais e prediais, onde a bitola dos condutores é pequena, a emenda de prolongamento pode ser realizada diretamente no condutor. A Figura apresenta as etapas de realização desta emenda.



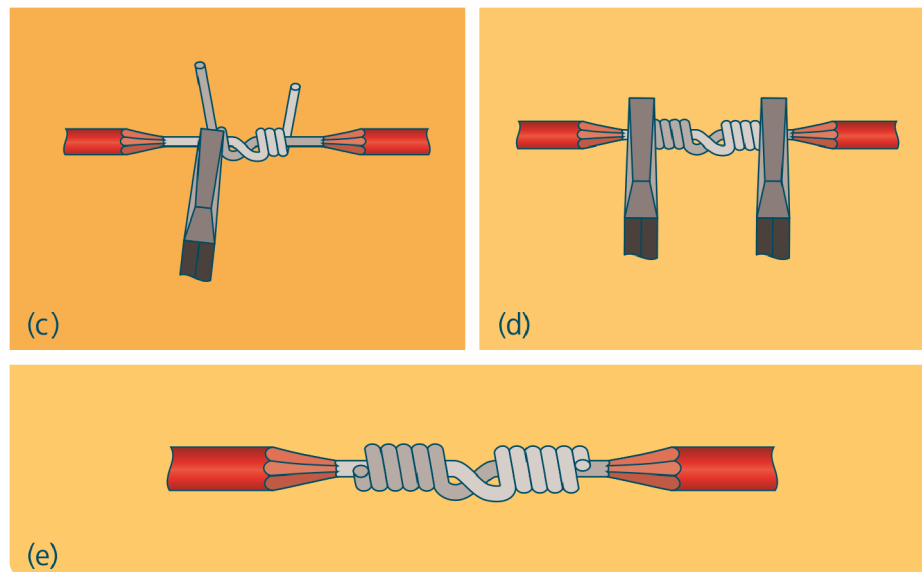
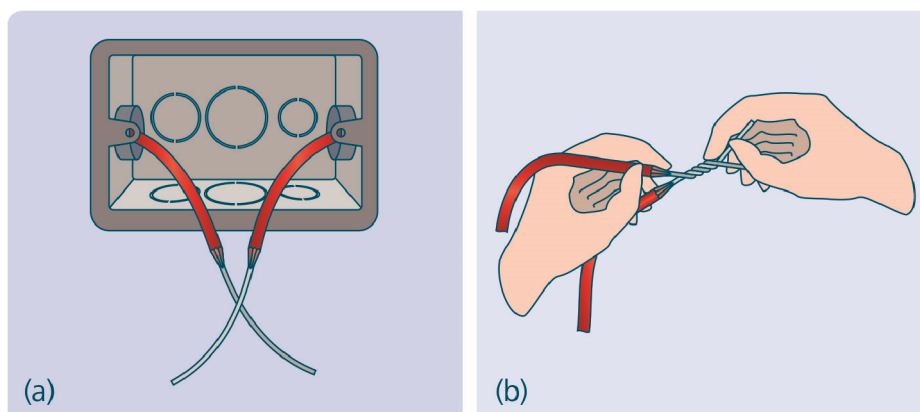


Figura: Forma de fazer emenda de prolongamento

Em caso de caixas embutidas na parede, a emenda deve ser realizada como mostra a Figura, e finalizada com a dobra da emenda ao meio, realizando o travamento da mesma. A emenda finalizada, anterior à isolamento, é apresentada na Figura.



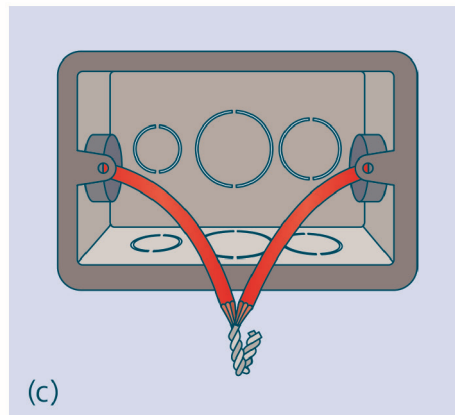


Figura: Emendas embutidas em caixa de passagem

Os condutores utilizados em áreas industriais geralmente possuem uma maior bitola, dificultando assim a realização de emendas comuns. Para o prolongamento desses condutores são utilizados conectores emendas, como apresentado adiante.

### Emendas de condutores em derivação

Este tipo de emenda é utilizado quando deseja-se realizar uma derivação para uma linha secundária, a partir de uma linha primária. Em instalações residenciais e prediais este tipo de emenda pode ser realizado diretamente no condutor principal, como apresentado na Figura.

Em instalações industriais, são utilizados conectores para derivação. Alguns tipos são o conector cunha, conector *splitbolt*, e conector perfurante isolado.

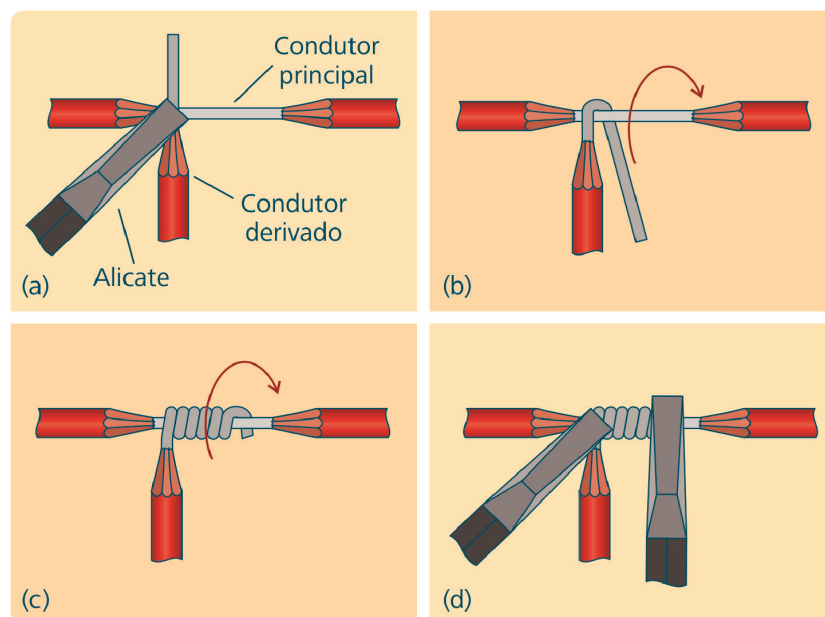


Figura: Passos para a realização da emenda de derivação

### **Conectores elétricos**

Dentre os diversos tipos de conectores utilizados, os mais comuns são os conectores de prolongamento, conectores de derivação e terminais. Alguns destes tipos de conectores e terminais são:

#### **Conector de cerâmica**

Dimensionado para tensões na faixa de 600 V e correntes até 30 ampères, os conectores cerâmicos são comumente utilizados para a conexão de cargas resistivas, como chuveiros e aquecedores.

#### **Conector cunha**

O conector cunha é utilizado em emendas de derivação e prolongamento de cabos de variadas bitolas. A principal vantagem da utilização do conector cunha é a possibilidade de conexão entre cabos de cobre e alumínio.

Os cabos de cobre e alumínio não podem ser simplesmente unidos, pois estes possuem uma diferença de potencial química, podendo gerar uma oxidação galvânica dos condutores e consequentemente a interrupção da passagem de corrente elétrica.

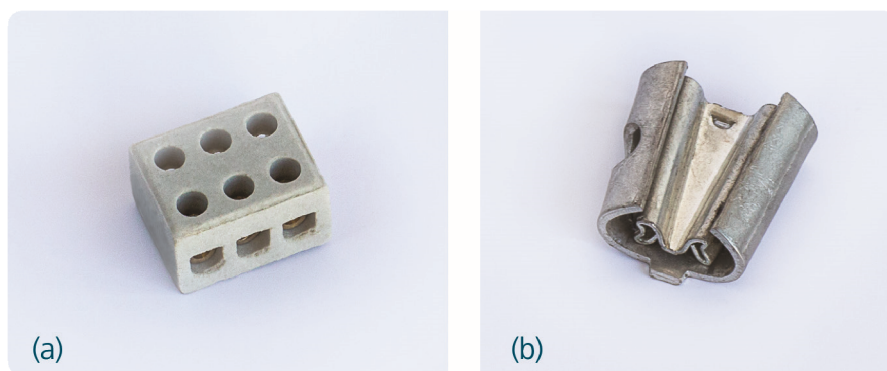


Figura: Conector cerâmico de três terminais (a) e conector cunha (b)



**Conector sindal**

O conector sindal é similar ao conector cerâmico, entretanto o isolador deste conector é feito de plástico.

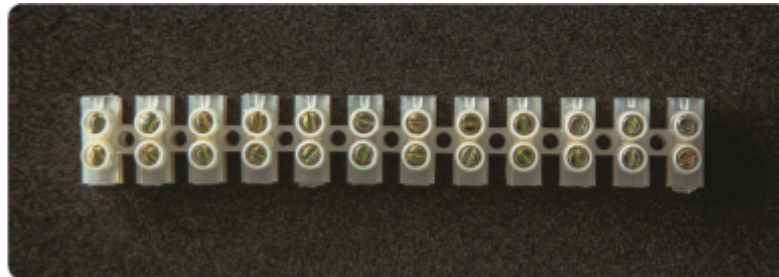


Figura: Conector sindal

**Conector sapata**

O conector sapata é utilizado na fixação de condutores, geralmente de grande seção, a barramentos em quadros de ligação e comando.



Figura: Conector sapata

**Conector *splitbolt***

Os conectores splitbolt são utilizados em emendas de prolongamento ou derivação. São também conhecidos como conector de parafuso fendido. Estes são produzidos para diversas bitolas e correntes. Entretanto, estes conectores não são isolados, sendo necessária a isolação apropriada da emenda.



**Figura: Conector *splitbolt***

### **Conector perfurante isolado**

O conector perfurante isolado é utilizado em emendas de derivação com condutores isolados. Comumente fabricado para uma tensão de até 1000 V, o conector perfurante isolado não requer o decapamento dos condutores a serem emendados, bem como já isola a emenda apropriadamente.

Salvo as variações de cada fabricante, este conector é fabricado para emendas de condutor principal de 10 a 240 mm<sup>2</sup>, e condutor de derivação de 1,5 a 240 mm<sup>2</sup>.



**Figura: Conector perfurante isolado**

### **Luva de emenda de compressão**

As luvas são utilizadas em emendas de prolongamento, e, assim como o conector cunha, podem realizar a conexão entre cabos de cobre e alumínio. Elas são divididas em luvas pré-isoladas, e luva não isoladas.

A luva isolada possui um revestimento de polímeros, responsáveis pela pré-isolação da emenda. Já as luvas não isoladas não possuem esse revestimento, e assim necessitam ser isoladas separadamente.

### **Terminal pré-isolado tipo olhal**

Este terminal é utilizado para a fixação de condutores em dispositivos com o uso de parafusos. A Figura apresenta um terminal olhal.

### **Terminal pré-isolado fêmea**

Este terminal é utilizado em conjunto com o terminal pré-isolado macho. Estes são utilizados em pares, para conexão de dispositivos.

A Figura apresenta um terminal pré-isolado fêmea, e a Figura apresenta um terminal pré-isolado macho.

### **Terminal pré-isolado tipo forquilha**

É utilizado para a fixação de condutores em dispositivos por um parafuso, quando este parafuso não pode ser retirado para a instalação do terminal olhal. A Figura apresenta um terminal tipo forquilha.

### **Terminal pré-isolado tipo pino**

Este terminal é comumente utilizado para a terminação de cabos e fios em equipamentos elétricos, como contactoras. A Figura apresenta um terminal tipo pino.

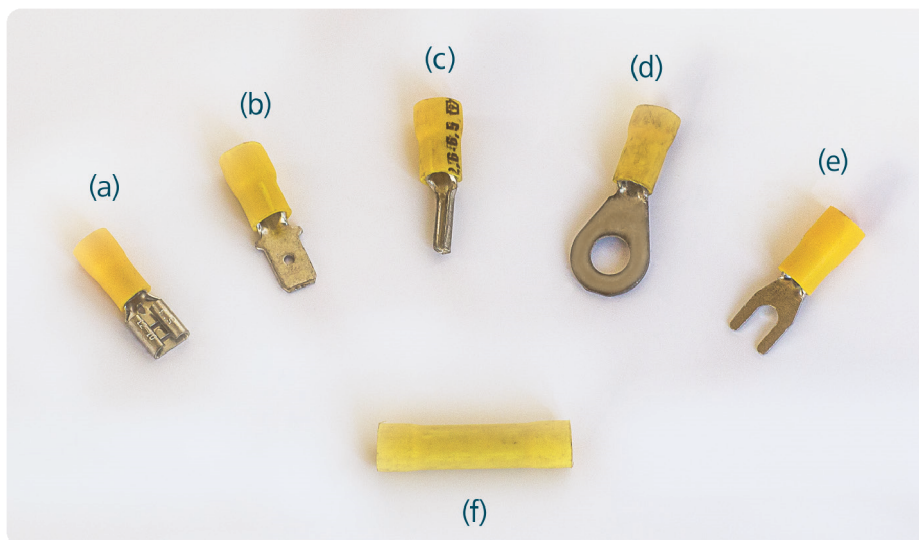


Figura: Terminais variados terminal pré-isolado fêmea (a); terminal pré-isolado macho (b); terminal pré-isolado tipo pino (c); terminal pré isolado tipo olhal (d); terminal pré-isolado tipo forquilha (e) e luva de emenda de compressão (f)

### **Ferro de soldar ou soldador elétrico**

As conexões elétricas por emendas ou por conectores possibilitam a passagem de corrente elétrica pelo contato entre duas superfícies, sejam fios, cabos ou terminais. Entretanto, a superfície de contato entre os fios e cabos podem apresentar um melhor contato com o uso de métodos de solda entre os condutores.

O ferro de solda é uma ferramenta de grande importância no setor elétrico. Este equipamento é, basicamente, uma barra de metal quente. Sua finalidade é a fusão de uma liga de metais para união dos condutores. O metal mais utilizado na liga a ser fundida é o estanho. Este, geralmente, é combinado com o chumbo. A especificação técnica de um ferro de solda ou soldador elétrico deve ter como parâmetros a potência do mesmo, o tipo de soldador e sua finalidade e qual a liga a ser fundida.

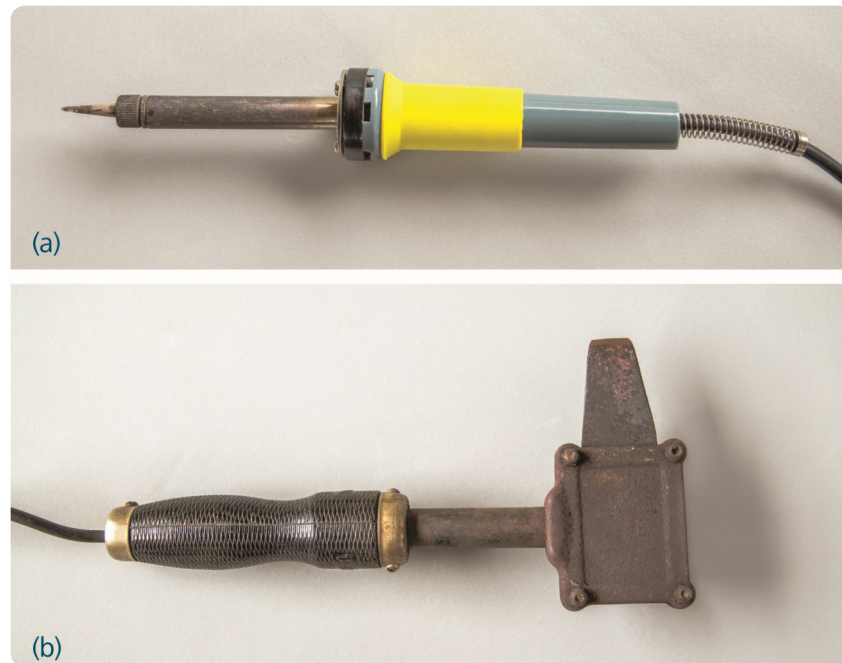


Figura: Diferentes tamanhos e formas de ponta de ferros de solda elétricos de menor potência (a) e de maior potência (b)

Cabe salientar que a Norma NBR 5410 no seu item 6.2.8.2 possui a seguinte nota:

**Nota**

É aconselhável evitar o uso de conexões soldadas em circuitos de energia. Se tais conexões forem utilizadas, elas devem ter resistência à fluência e a solicitações mecânicas compatível com a aplicação.

Outros itens importantes dessa norma sobre o uso de solda são os seguintes:

É vedada a aplicação de solda a estanho na terminação de condutores, para conectá-los a bornes ou terminais de dispositivos ou equipamentos elétricos.

A conexão entre cobre e alumínio deve ser realizada exclusivamente por meio de conectores adequados a este fim.



### Teste de presença de tensão

O testador de presença de tensão é um equipamento utilizado na detecção de tensão em painéis e cabos isolados ou não. Normalmente a detecção é rápida e fácil, por aproximação. Existem testadores de diversos formatos e tamanho. Para baixa tensão, o formato de caneta é muito comum e conveniente, pois possibilita guardá-la no bolso da camisa. Há diversos tipos e modelos desse equipamento, alguns deles exemplificado na Figura.

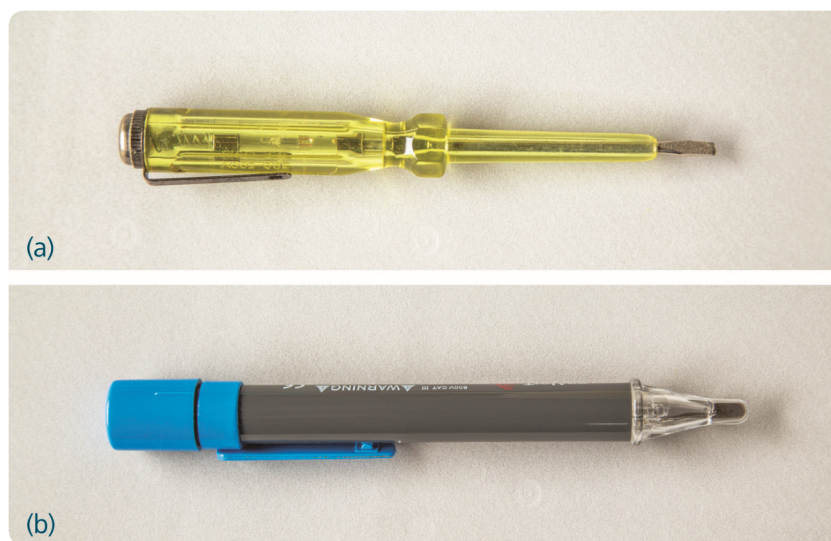


Figura: Canetas de teste de tensão de contato (a) e por campo elétrico (b)

Os modelos de detectores de tensão para alta tensão (AT) são por aproximação. Sendo que estes emitem sinais visuais e/ou audíveis quando aproximado de campo elétrico de condutores, chaves, cabines, etc. Os sinais emitidos são conjugados, permitindo ao usuário sua percepção em qualquer ambiente ou local de trabalho. A Figura apresenta alguns detectores de alta tensão.



Figura: Detectores de alta tensão

### **Dispositivos de controle dos circuitos**

Iremos estudar, de forma prática e objetiva, os conteúdos básicos que auxiliarão na escolha, construção, instalação e manutenção de chaves de partida e seus equipamentos de acionamento e proteção. A escolha de um sistema de acionamento e proteção merece muita atenção, pois dela dependem a durabilidade do sistema e o funcionamento correto dos circuitos de motores e consequentemente das máquinas a serem acionadas.

O desligamento de máquinas elétricas é feito pela desconexão destas com a rede. A forma mais intuitiva e visível desta ação é o corte dos condutores de alimentação de um determinado aparelho. Entretanto, o desligamento dos aparelhos elétricos deve ser realizado de forma que estes possam ser religados facilmente, assim caracterizando uma atividade periódica.

Desta forma, para a operação dos equipamentos elétricos, utiliza-se os dispositivos de controle de circuitos. Estes podem ser simples, como interruptores de luz comuns, e podem ser reforçados, como contadores.

### **Interruptores**

A Figura apresenta um interruptor utilizado em motores de baixa potência e outro interruptor simples. Estes elementos de controle são mais utilizados e difundidos, devido a sua simplicidade e confiabilidade. Usualmente são empregados no controle de cargas de pequenas potências, entretanto é possível encontrar estes dispositivos dimensionados apropriadamente para cargas trifásicas e de média potência.

A Figura apresenta o esquema elétrico multifilar de um interruptor simples ligando uma lâmpada. O interruptor simples possui dois terminais e duas posições. Na posição 1, o interruptor conecta estes dois terminais. Na posição 2, o interruptor desconecta estes terminais.



Ao observar a Figura é possível observar que a tensão de entrada é aplicada ao interruptor quando o circuito está desligado. Assim, é necessário cuidar a tensão máxima de isolamento do interruptor em uma instalação elétrica. Cuidados adicionais devem ser tomados quando o interruptor está comutando cargas indutivas, como motores.

Outro fator importante é a limitação de corrente do interruptor. Nota-se que toda corrente do circuito circula pelo interruptor. Assim, este dispositivo deve ser dimensionado apropriadamente para esta corrente.

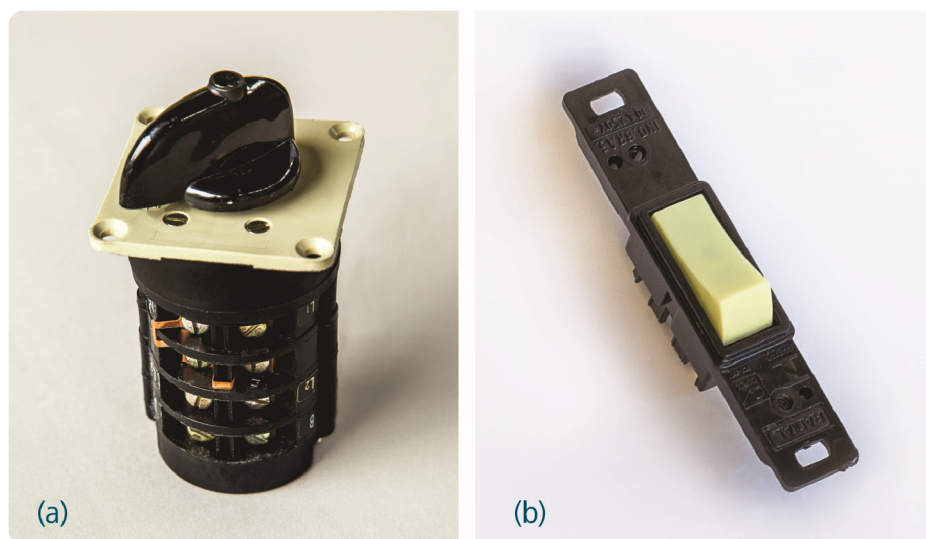


Figura: Chave motor (a) e interruptor simples (b)

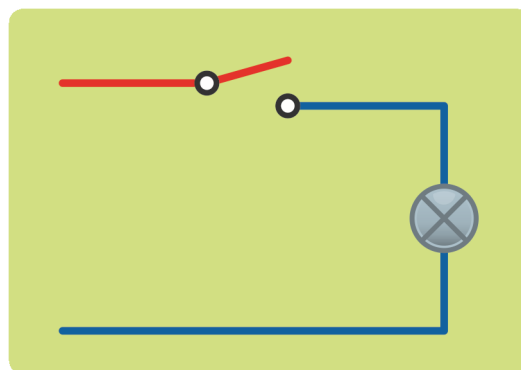


Figura: Esquema de ligação de interruptor simples

### Interruptor de várias seções

O interruptor de várias seções é um dispositivo no qual, uma mesma estrutura contém vários interruptores simples. Este agrupamento facilita a instalação e controle de diferentes dispositivos de um mesmo ponto de controle. A Figura apresenta um interruptor de duas seções, e a Figura apresenta o esquema elétrico multifilar deste interruptor para ligar duas lâmpadas.

Assim como os interruptores simples, os interruptores de várias seções são geralmente utilizados em cargas monofásicas e de pequenas potências. Da mesma forma, as mesmas especificações descritas sobre o interruptor simples são aplicáveis a este interruptor, como tensão e corrente máxima.



Figura: Interruptor duplo

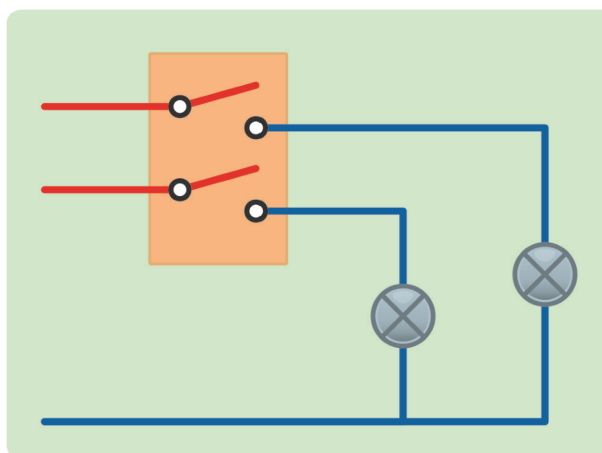


Figura: Diagrama unifilar de um interruptor duplo e duas lâmpadas

## Interruptor paralelo

O interruptor paralelo, também conhecido como chave hotel ou *three-way*, é um dispositivo de controle utilizado quando deseja-se ligar e/ou desligar uma carga elétrica em dois locais diferentes. Um exemplo da aplicação deste interruptor é a luz de corredores, onde é desejado ter o controle desta nos dois extremos do corredor.

A Figura apresenta um interruptor paralelo comum, utilizado em instalações elétricas. O esquema elétrico multifilar de ligação de dois interruptores paralelos para ligação de uma lâmpada é apresentado na Figura. Este dispositivo possui três terminais. É necessário notar que este interruptor sempre é utilizado em pares.

O interruptor 1, conforme Figura, escolhe qual condutor será energizado. O circuito sempre terá um condutor paralelo energizado, e outro não. Já o interruptor 2, escolhe qual condutor conectará a lâmpada, ligando-a ou não.



Figura: Vista traseira de um interruptor paralelo

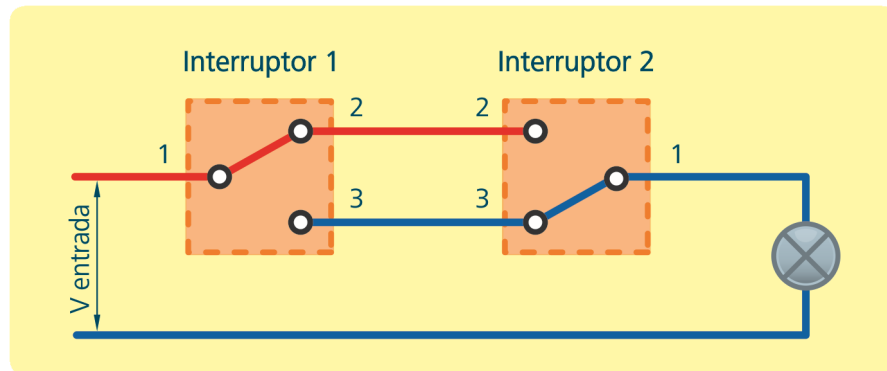


Figura: Diagrama unifilar de dois interruptores paralelos e uma lâmpada

### Interruptor *four-way* ou intermediário

Da mesma forma que o interruptor paralelo, o interruptor *four-way* possibilita o controle de um mesmo dispositivo de diferentes locais ou pontos.

Desconsiderando as perdas nos contatos dos interruptores e nos condutores, não há um limite para quantos interruptores *four-way* podem ser ligados juntos. Em outras palavras, com a utilização do interruptor *four-way*, não há um limite para o número de pontos de controle de um dispositivo.

Este interruptor sempre será utilizado em conjunto com os interruptores paralelos. A Figura apresenta um interruptor *four-way*. A Figura apresenta o esquema multifilar de um interruptor *four-way*, também conhecido por interruptor intermediário, utilizado em conjunto com dois interruptores paralelos. Para a utilização do interruptor *four-way* é necessária a utilização de um par de interruptores paralelos.

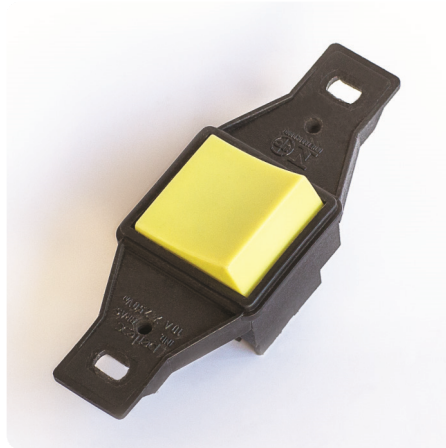


Figura: Interruptor intermediário

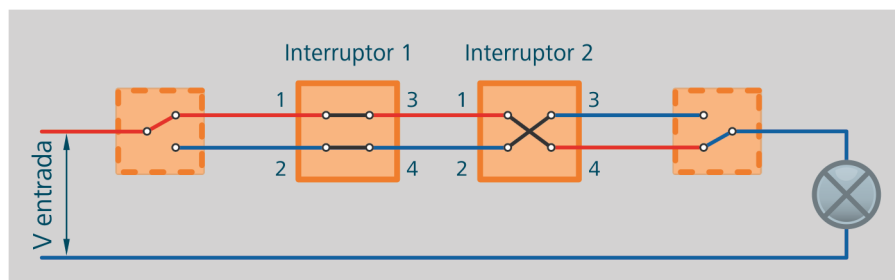


Figura: Diagrama unifilar de dois interruptores paralelos, dois interruptores intermediários e uma lâmpada

### Contatores e chaves magnéticas

Os dispositivos abordados até agora são, geralmente, de baixa potência e baixa corrente. Já os contatores e as chaves magnéticas são utilizadas para a ligação indireta de cargas de média a alta potência. As chaves magnéticas são também chamadas de relés.

Os contatores e relés utilizam o mesmo princípio de funcionamento: um bloco de contatos é movimentado por um campo magnético gerado por uma bobina. Este bloco de contatos móvel realiza a conexão e interrupção da alimentação da carga.

A Figura apresenta um modelo conceitual de um contator. Nesta imagem, o núcleo móvel é atraído para baixo pelo campo magnético gerado pela bobina. Quando isto acontece, o contato móvel encosta no contato fixo, no lado direito e esquerdo. O núcleo móvel é puxado para cima pela mola quando a bobina é

desativada, constituindo o processo de rearme. A Figura apresenta um contator aberto.

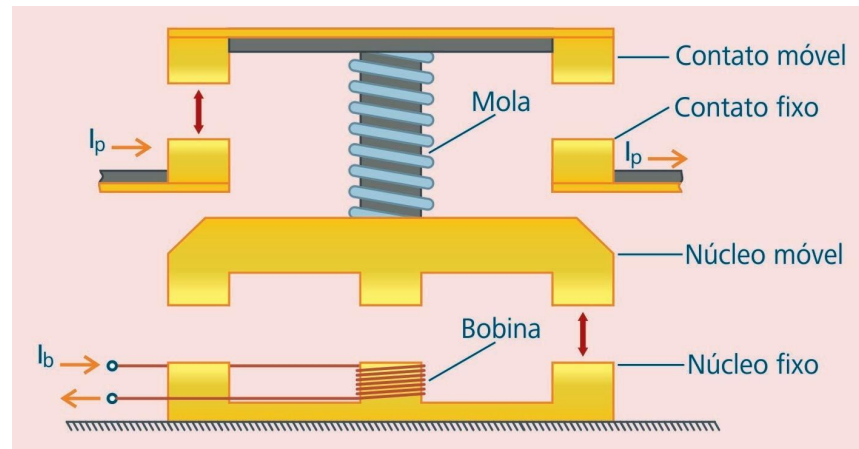


Figura: Visão de corte de um contator conceitual

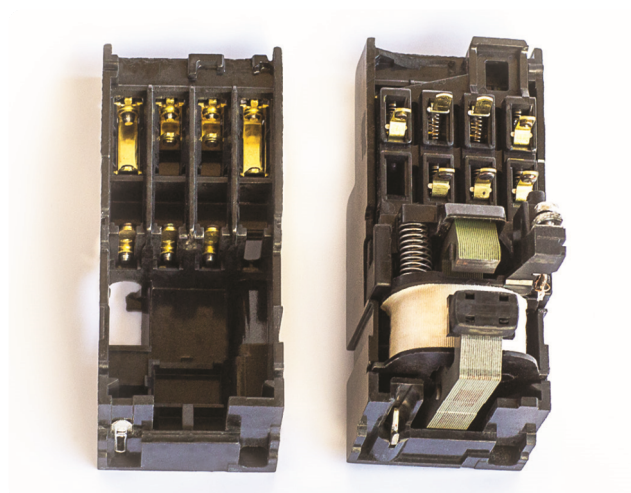


Figura: Contator aberto

A corrente de alimentação da bobina é pequena, entretanto é independente da corrente que circula nos contatos fixos e móveis. A corrente máxima possível nos contatos principais, sem danos aos mesmos, é limitada somente por sua construção física. Sabendo disso, os fabricantes projetam e dimensionam os dispositivos de acordo com a corrente máxima nos contatos.

O contator é um interruptor elétrico, assim outro parâmetro importante no projeto e dimensionamento do dispositivo é a tensão máxima de isolamento. Esta é

determinada pelo tipo de carga a ser comutado pelo contator e a distância entre os contatos fixos e móveis.

A tensão máxima de isolamento e a corrente máxima determinam a potência máxima de comutação de um contator. Os menores contatores podem alimentar cargas de até 3 kW, enquanto os maiores podem controlar cargas de até 500 kW. A Figura apresenta um contator.

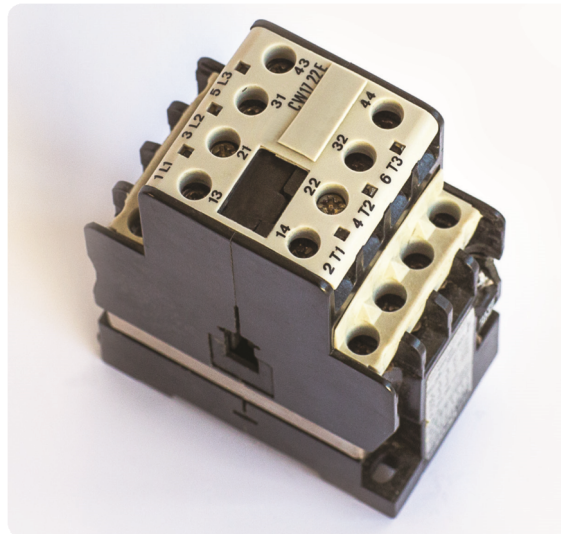


Figura: Contator

Por sua robustez, os contatores são utilizados para cargas de alta potência e ou reativas, tais como motores, bancos de capacitores, transformadores e grupo geradores. Os contatores menores, comumente conhecidos por relés, são geralmente utilizados em aplicações automotivas e eletrônicas. Estas aplicações são caracterizadas pela necessidade de uma baixa tensão e corrente da bobina para a alimentação de uma carga de média/baixa potência. Assim como os contatores, os relés possuem limites de tensão e corrente.

## **Comando de motores**

Iremos estudar, de forma prática e objetiva, os conteúdos básicos que auxiliarão na escolha, construção, instalação e manutenção de chaves de partida e seus equipamentos de acionamento e proteção. A escolha de um sistema de acionamento e proteção merece muita atenção, pois dela dependem a durabilidade do sistema e o funcionamento correto dos circuitos de motores e consequentemente das máquinas a serem acionadas.

### **Elementos**

Para o acionamento de máquinas e motores elétricos é necessário o auxílio de diversos elementos, sendo esses descritos a seguir.

#### **Contator**

Chave de operação não manual, eletromagnética, que tem uma única posição de repouso e é capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, inclusive sobrecargas no funcionamento. A Figura apresenta as partes de um contator.

Os principais elementos construtivos de um contator são: contatos, núcleo, bobina, molas e carcaça.



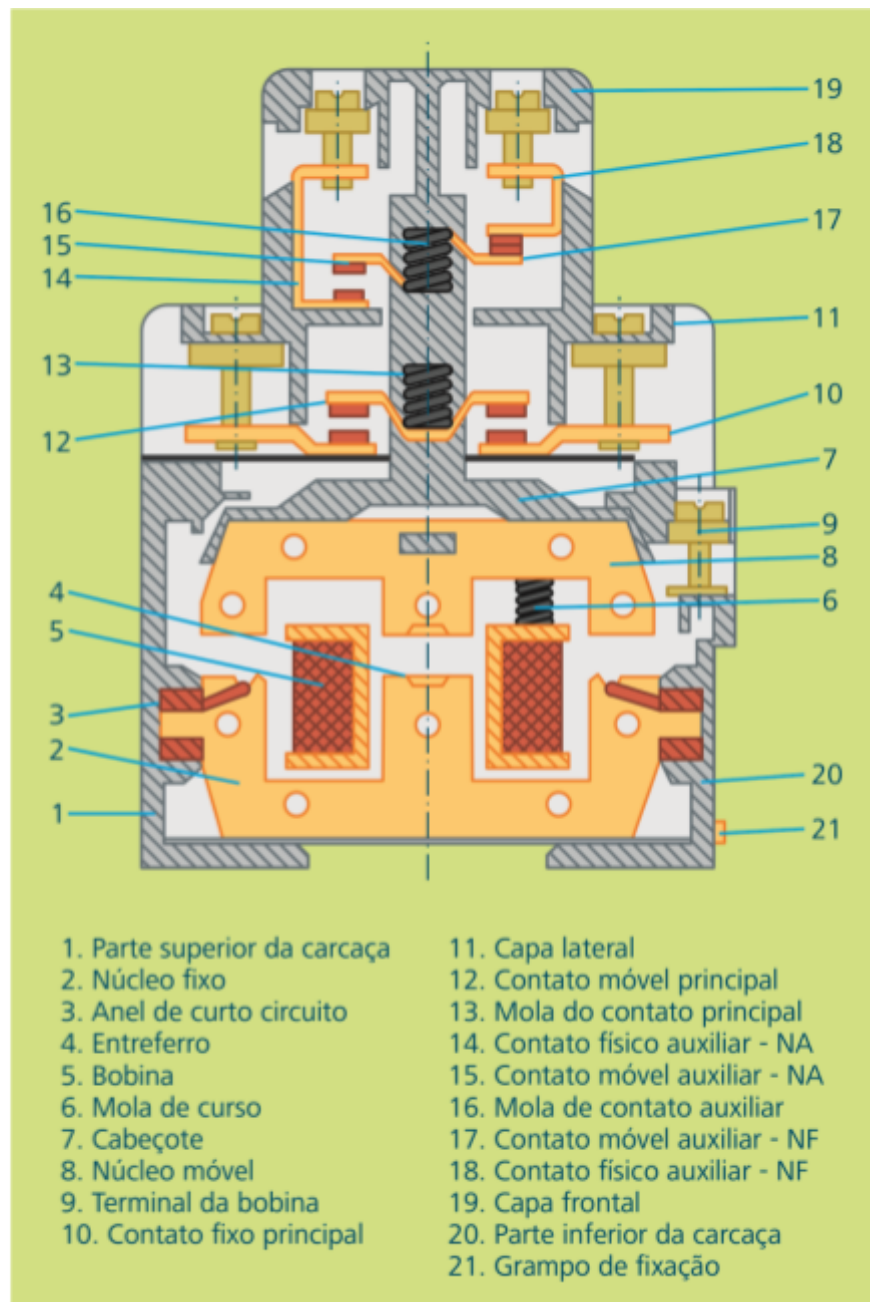


Figura: Partes de um contatores

### Contatores principal

É aquele componente de ligação que, em estado fechado, conduz a corrente do circuito principal. Os contatos principais de um contatores são dimensionados com o objetivo principal de estabelecer e interromper correntes de motores, podendo ainda, acionar as mais diversas cargas.

### **Contato auxiliar**

São dimensionados para a comutação de circuitos auxiliares para comando, sinalização e intertravamento elétrico, entre outras aplicações. O formato dos contatos auxiliares está de acordo com a função: normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF), podendo ser ainda adiantados ou retardados, dependendo da linha e modelo do contator utilizado.

A Figura apresenta contatos auxiliares removíveis.

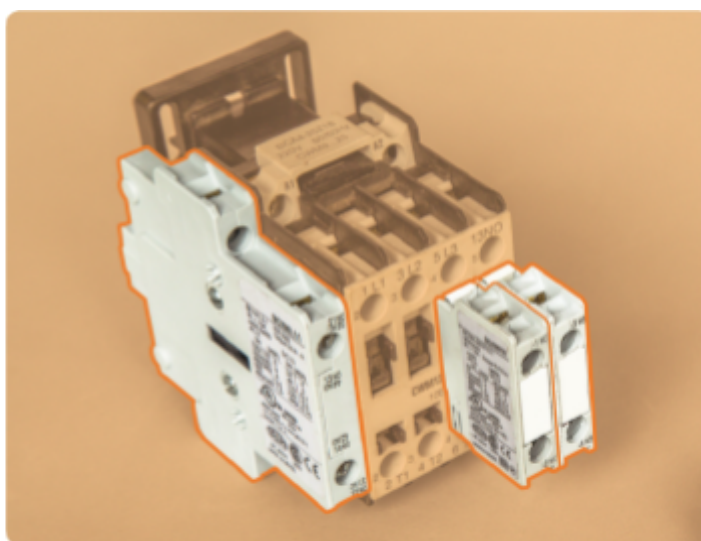


Figura: Contatos auxiliares

### **Sistema de acionamento**

O acionamento dos contadores pode ser realizado com corrente alternada (CA) ou contínua (CC), por serem dotados de sistemas específicos (bobina, núcleo) para cada tipo de corrente.

### **Nomenclatura de contatos**

A identificação de terminais de contadores e relés associados tem por finalidade fornecer informações a respeito da função de cada terminal ou sua

localização com respeito a outros terminais ou para outras aplicações. A nomenclatura assim como a simbologia de um contator é apresentada na Figura.

- **Bobinas** – são identificadas de forma alfanumérica com **A<sub>1</sub>** e **A<sub>2</sub>** ou **a** e **b**.

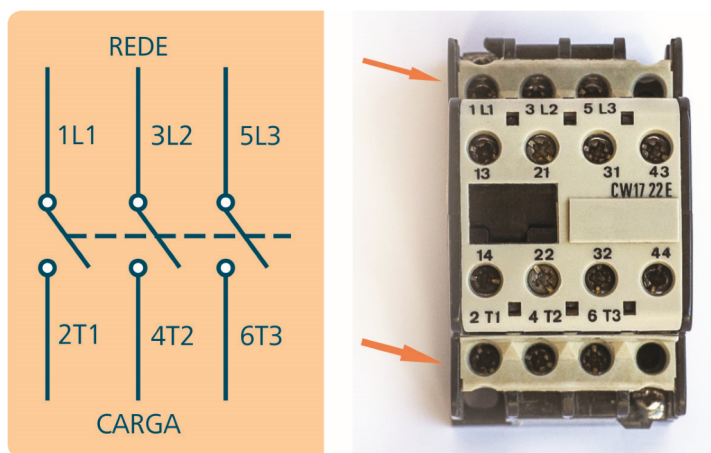


Figura: Terminologia dos contatos principais

- **Terminais do circuito principal (força)** – são identificados por números unitários e por um sistema alfanumérico. Os terminais **1L1**, **3L2** e **5L3** voltam-se para a rede (fonte) e os terminais **2T1**, **4T2** e **6T3** para a carga.
- **Terminais de contatos auxiliares** – os terminais dos circuitos auxiliares devem ser marcados ou identificados nos diagramas, através de figura com dois números, a saber:

- A unidade representa a função do contato.
- A dezena representa a sequência de numeração.

A Figura ilustra este sistema de marcação:

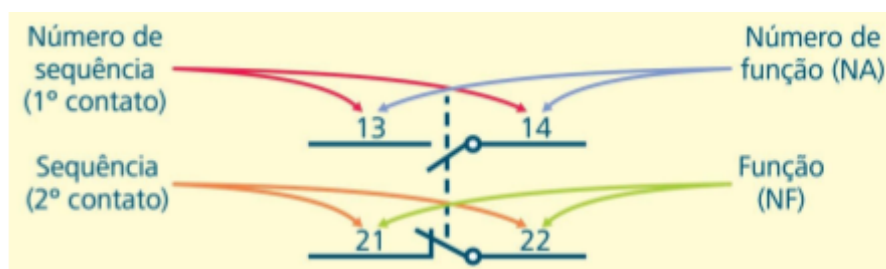


Figura: Sistema de marcação

- **Número de função** – os números de função **1** e **2** são próprios de contatos normalmente fechados. Os números de função **3** e **4** são próprios de contatos normalmente abertos.

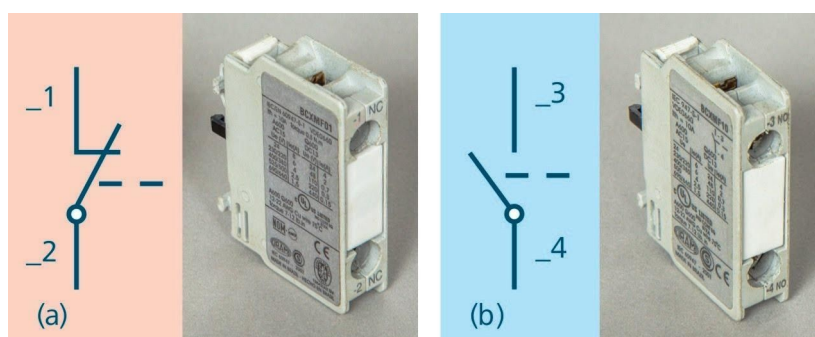


Figura: Contatos auxiliares removíveis contato NF (a) e contato NA (b)

Os traços antes dos números indicam a sequência. Os números de função **5** e **6** são próprios de contatos NF retardados na abertura, enquanto os números de função **7** e **8** são próprios de contatos NA adiantados no fechamento.

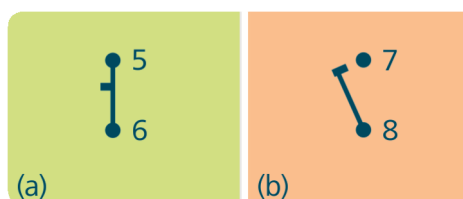


Figura: Contato normalmente fechado, atrasado na abertura (a) e contato normalmente aberto, adiantado no fechamento (b)

- **Número de sequência** – os terminais pertencentes a um mesmo elemento de contato devem ser marcados com o mesmo número de sequência, conforme Figura. Logo, todos os contatos de mesma função devem ter número de sequência diferentes.

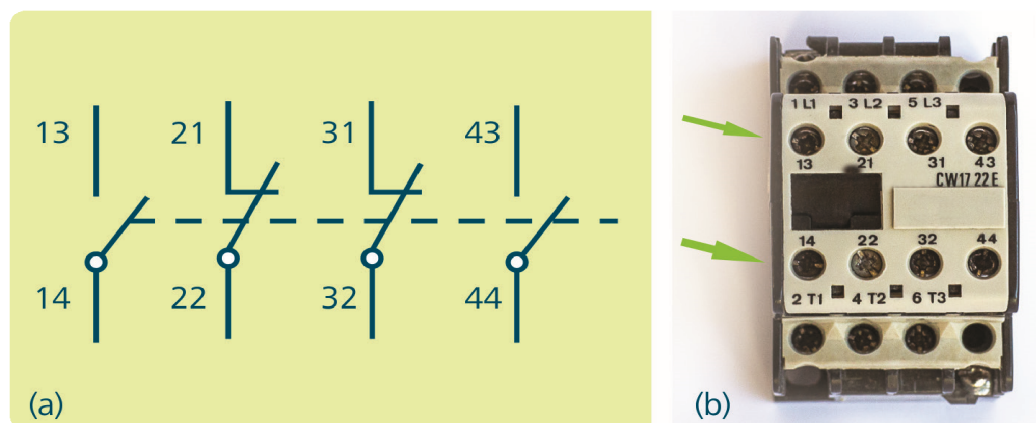


Figura: Representação numérica de circuitos auxiliares de um contator (a) e contator (b)

### Fusíveis

São os elementos mais tradicionais para proteção contra curto-circuito de sistemas elétricos. Sua operação é baseada na fusão do “elemento fusível”, contido no seu interior. O “elemento fusível” é um condutor de pequena seção transversal, que sofre, devido a sua alta resistência, um aquecimento maior que o dos outros condutores, à passagem da corrente.

O “elemento fusível” é um fio ou uma lâmina, geralmente, prata, estanho, chumbo ou liga, colocado no interior de um corpo, em geral de porcelana, hermeticamente fechado. Possuem um indicador, que permite verificar se operou ou não; ele é um fio ligado em paralelo com o elemento fusível e que libera uma mola que atua sobre uma plaqueta ou botão, ou mesmo um parafuso, preso na tampa do corpo. Os fusíveis contêm em seu interior, envolvendo por completo o elemento, material granulado extintor; para isso utiliza-se, em geral, areia de quartzo de granulometria conveniente. As Figuras 8.8 e 8.9 mostram a composição de um fusível (no caso mais geral).

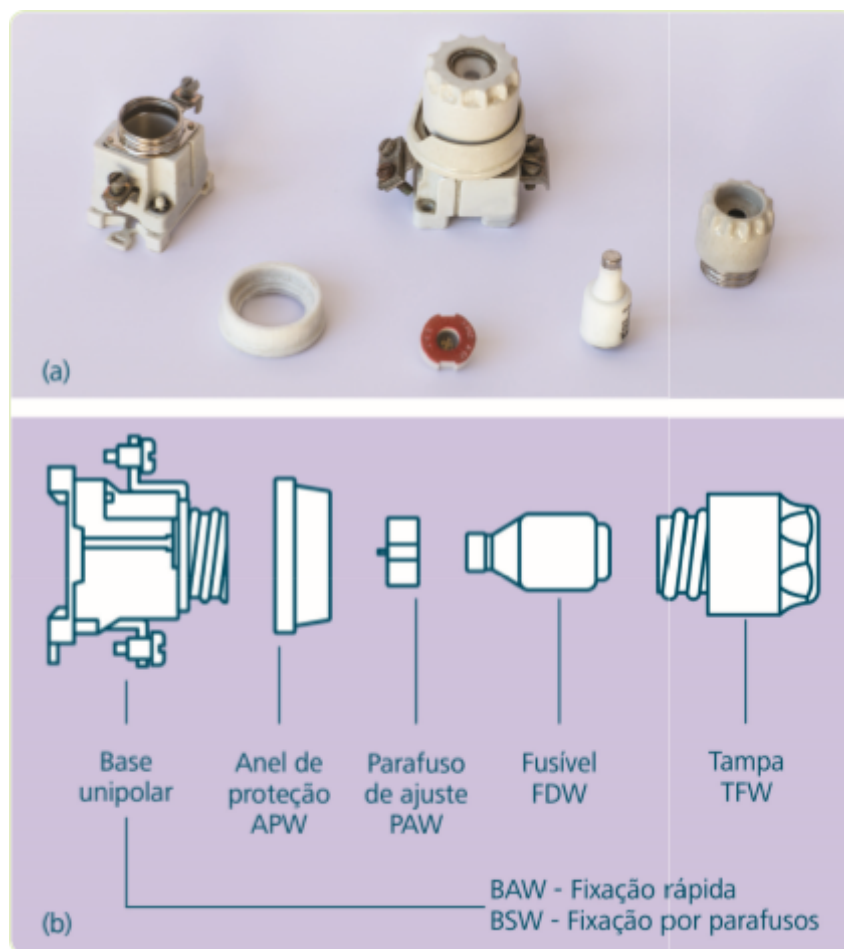


Figura: Fusível do tipo D com suporte para montagem (a) e detalhamento dos suportes (b)



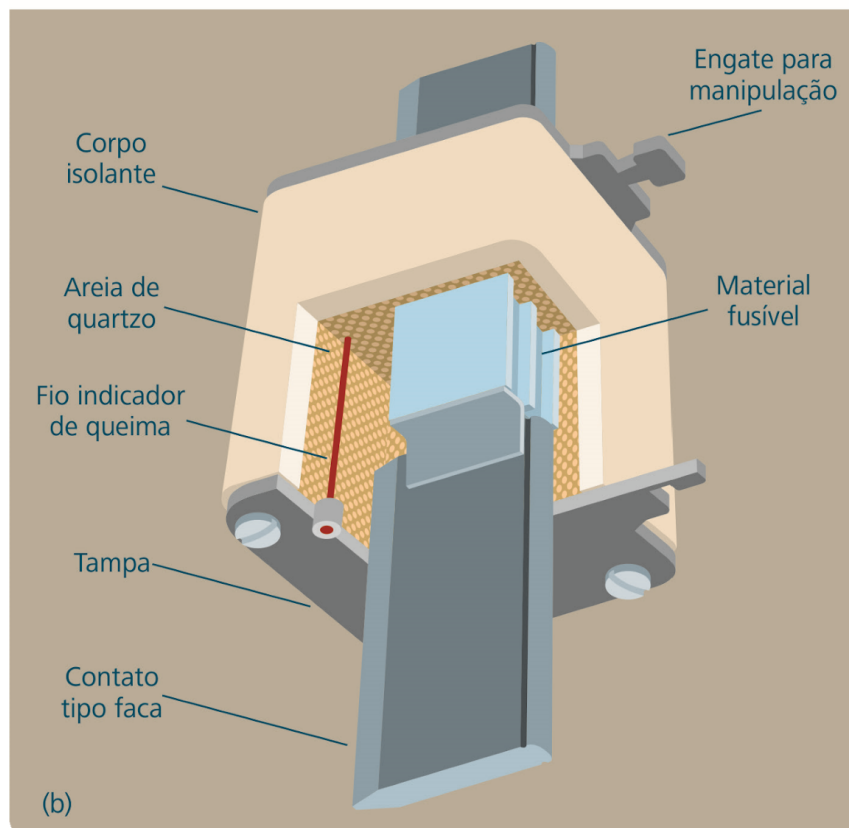


Figura: Fusível do tipo NH (a) e suas partes (b)

O elemento fusível pode ter diversas formas. Em função da corrente nominal do fusível, ele compõe-se de um ou mais fios ou lâminas em paralelo, com trecho(s) de seção reduzida. Nele existe ainda um ponto de solda, cuja temperatura de fusão é bem menor que a do elemento e que atua por sobrecargas de longa duração.

### **Relé de sobrecarga**

São dispositivos baseados no princípio da dilatação de partes termoelétricas (bimetálicos). A operação de um relé está baseado nas diferentes dilatações que os metais apresentam, quando submetidos a uma variação de temperatura.

Relés de sobrecarga são usados para proteger equipamentos elétricos, como motores e transformadores, de um possível superaquecimento.

Os terminais do circuito principal dos relés de sobrecarga são marcados da mesma forma que os terminais de potência dos contadores, conforme Figura.

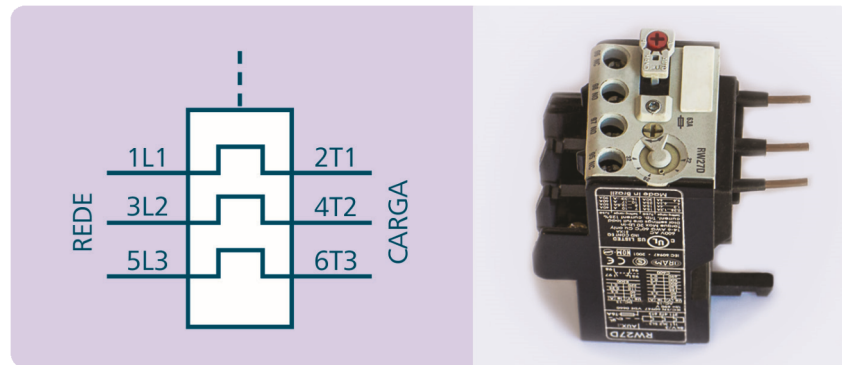


Figura: Terminais principais do relé de sobrecarga

Os terminais dos circuitos auxiliares do relé são marcados da mesma forma que os de contatores, com funções específicas, conforme a Figura.

O número de sequência deve ser o 9 (nove) e, se uma segunda sequência existir, será identificada com o 0 (zero).

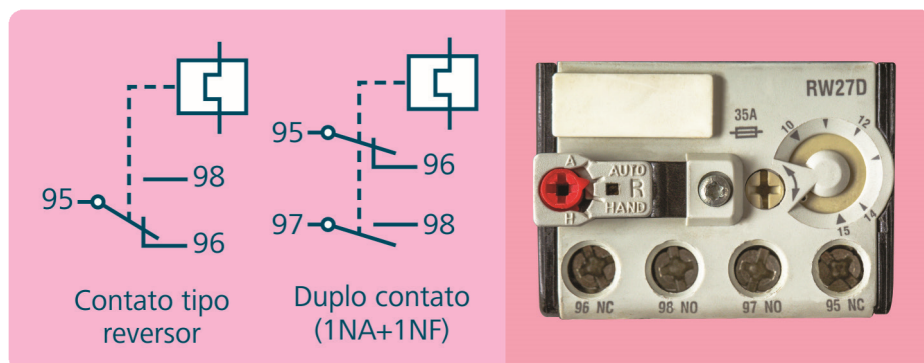


Figura: Contatos auxiliares do relé de sobrecarga

Há ainda em alguns relés de sobre carga o teclado multifunção conforme a Figura.



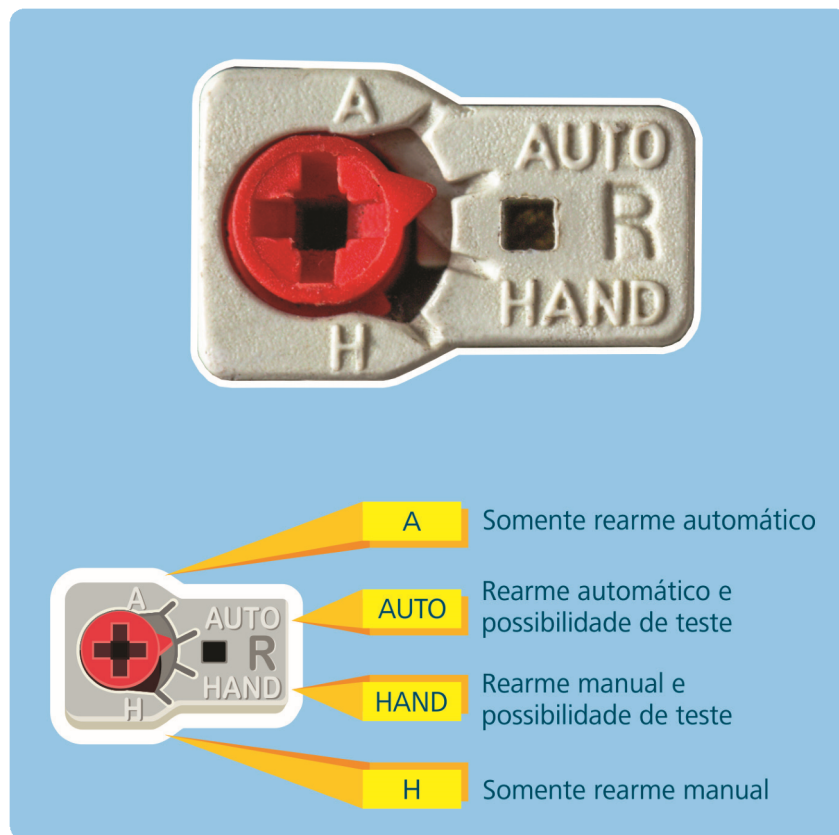


Figura - Detalhe do rearme manual ou automático dos relés de sobrecarga

A Figura apresenta um contator equipado com um contato auxiliar e com um relé de sobrecarga.



Figura: Contator equipado com um contato auxiliar e relé de sobrecarga

### **Relé tempo (temporizador)**

São temporizadores para controle de tempos de curta duração. Utilizados na automação de máquinas e processos industriais, especialmente em sequenciamento, interrupções de comandos e em chaves de partida. Exemplos de relés temporizados são apresentados na Figura.

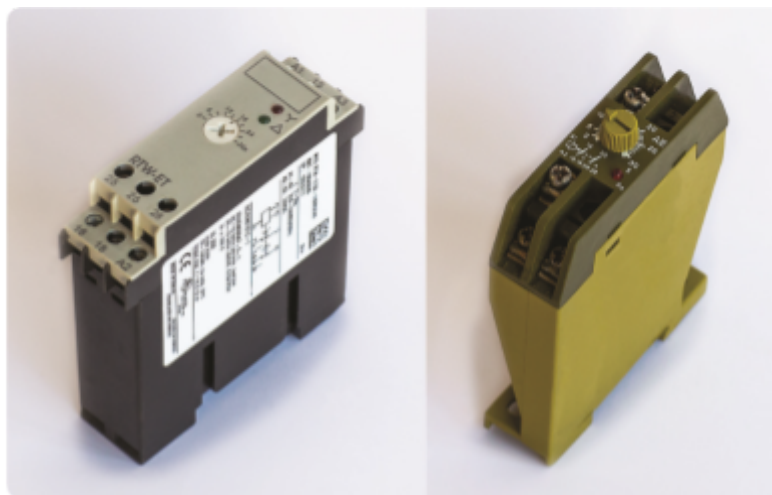


Figura: Relé de tempo

### **Montagem de circuito de partida direta**

A chave de partida direta é um dispositivo pelo qual o motor parte com o valor máximo de torque e de corrente de partida, pois suas bobinas recebem a tensão nominal de rede. Este modo de partida é utilizado para aplicações que partem praticamente sem carga, ou seja, aplicações em que a corrente de partida é relativamente pequena. Caso contrário, a corrente de partida seria muito maior que a corrente nominal, o que ocasionaria problemas para o sistema elétrico. Isso se deve ao fato que na partida, o motor parte com velocidade zero, e para tirá-lo da inércia inicial é necessário um esforço maior, por isso, quanto maior a carga, maior terá que ser o esforço, logo a corrente será maior. Outro cuidado, quanto à partida direta, que se deve tomar é na abertura de seus contatos. Por que, quando uma chave é aberta

sob tensão, a corrente tende a se manter, fechando um arco elétrico e gerando faiscamento entre os contatos da chave. A Figura exemplifica uma chave manual de partida direta antigamente utilizada. Tal chave não atende as normas de segurança atuais.

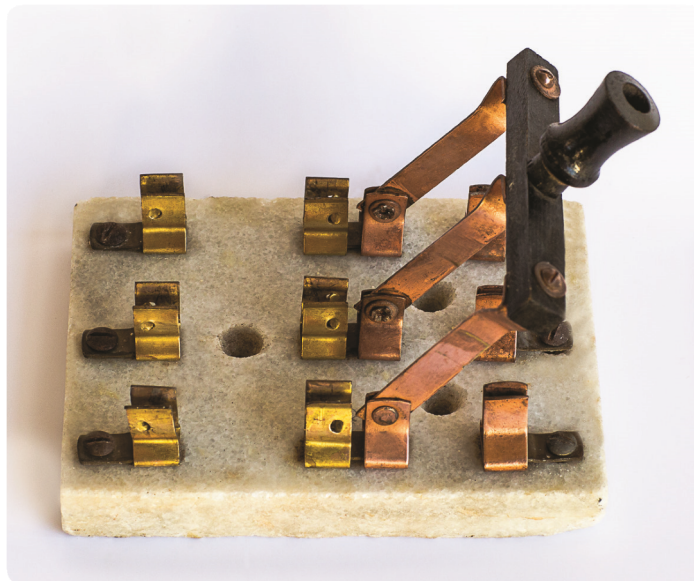


Figura: Chave manual de partida direta

Portanto, para esta forma de partida, pode se utilizar para dar a partida no motor: chave faca, interruptores simples ou ainda contadoras. Estes servindo apenas para fazer a interrupção direta da alimentação do motor.

O custo para implementação da chave de partida direta é a menor entre as chaves de partida, justamente por causa de sua simplicidade.

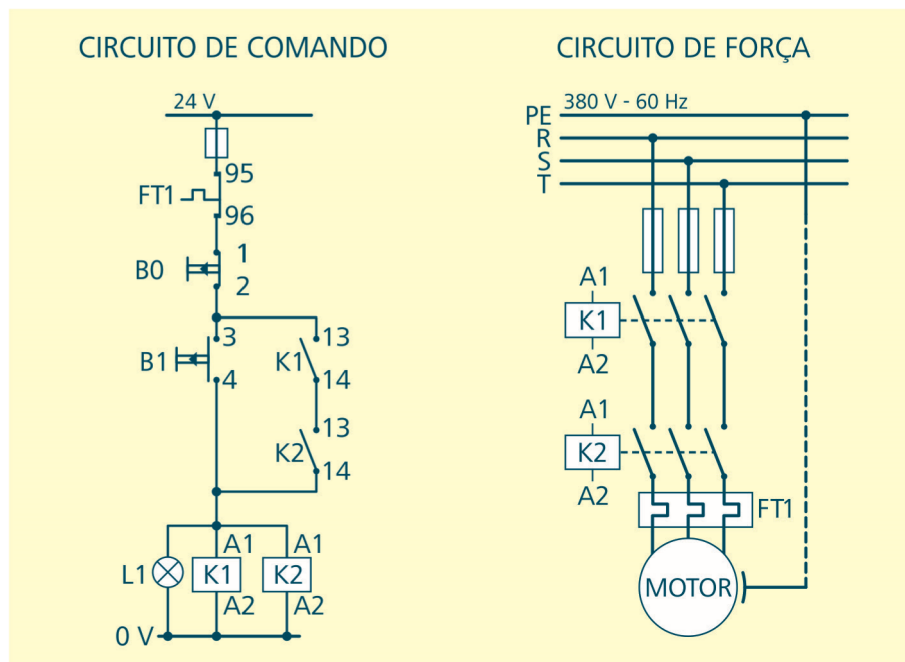


Figura: Circuito de comando e força da partida direta

Na Figura estão representados os circuitos de força (a) e de comando (b) de uma chave de partida direta, que utiliza apenas uma contatora para o controle do circuito.

Então a chave de partida direta possui sua aplicabilidade limitada a motores de pequeno porte, devido à alta queda de tensão, gerada pela corrente de partida elevada, e pelo super dimensionamento do sistema de proteção.

### Montagem de circuito de partida com reversão manual

A inversão do sentido de rotação do motor tem grande aplicabilidade em muitas atividades, portanto existem chaves de partida capazes de realizar a inversão do sentido de rotação do motor através de um comando humano.

Então, existe a chave de partida com reversão manual rápida, onde o controle é feito por duas botoeiras, e a inversão de rotação é instantânea, porém, há um grande pico de corrente nessa inversão instantânea. O circuito está representado na Figura.

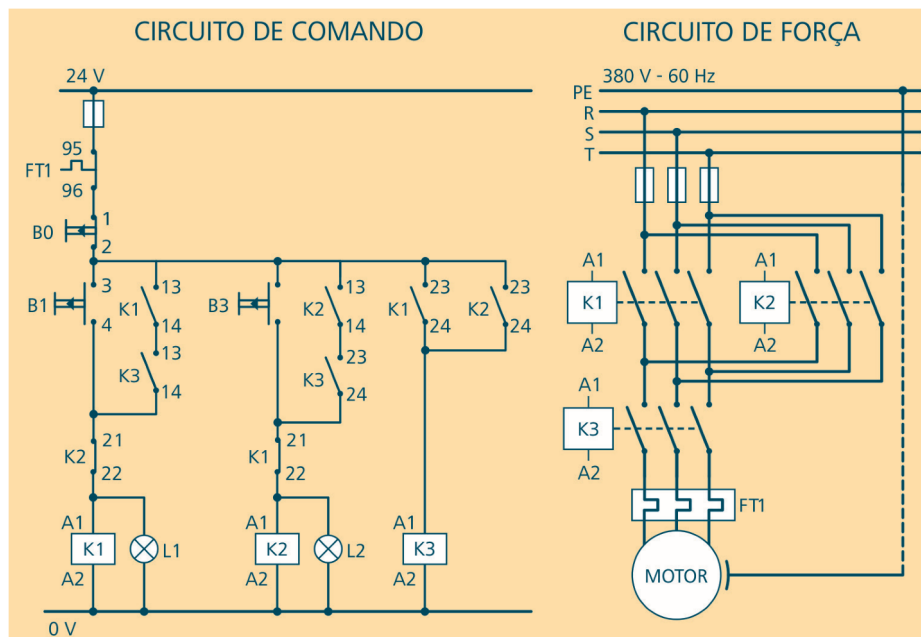


Figura: Circuito de comando e força da partida direta com reversão

Enquanto que, há também uma chave de partida, em que o motor diminui sua velocidade de rotação antes de ocorrer à inversão, também chamada de chave de partida com reversão manual lenta. Assim, nessa chave, a corrente no instante da inversão não sofre um acréscimo muito grande. Por isso a inversão com esta chave pode ocorrer com carga.

### Montagem de circuito de partida estrela-triângulo manual

Consiste na alimentação do motor com redução de tensão nas bobinas durante a partida. Na partida, as bobinas do motor recebem 58 % da tensão que deveriam receber. A chave estrela-triângulo é um dispositivo que liga as três fases do motor em estrela durante a partida até uma rotação próxima da nominal (90 %), quando comuta a ligação para triângulo. Isto significa que a tensão por fase na ligação estrela será por vezes menor que a tensão de alimentação, consequentemente, a corrente de linha na partida será por vezes menor, assim como o seu conjugado motor. É fundamental para esta chave de partida que o motor tenha possibilidade de ligação em dupla tensão, (220/380 V, 380/660 V, 440/760 V)

e que a menor tensão coincida com a tensão de linha da rede e os motores tenham no mínimo 6 terminais.

A Figura apresenta as ligações em triângulo (delta –  $\Delta$ ) e estrela (Y).

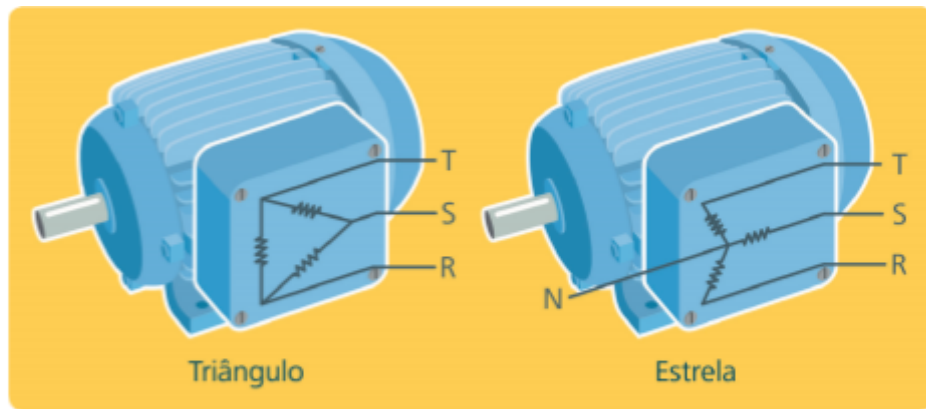


Figura: Ligações de cargas trifásicas

Durante a partida, as bobinas do motor são ligadas em estrela e uma tensão de aproximadamente 58 % da nominal é aplicada a elas, até que o motor atinja uma rotação próxima a nominal. Assim, possibilitando que manualmente, por meio de uma botoeira, a ligação entre as bobinas passe de estrela para triângulo, e a tensão aplicada às bobinas torne-se igual a tensão de linha.

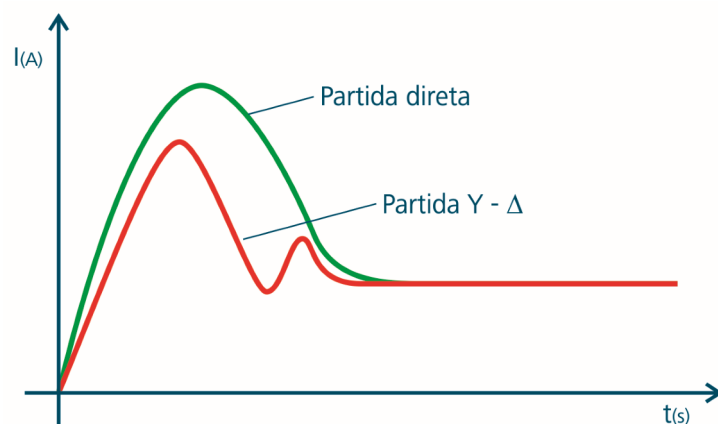


Figura: Comparativo entre ligação direta e ligação suave estrela-triângulo

O gráfico da Figura mostra a relação entre a corrente de partida de um motor com partida direta e um com partida  $Y - \Delta$ . Podendo-se notar a redução considerável de corrente na partida, para uma mesma carga.

Para que a ligação estrela-triângulo possa ocorrer, é necessário que o motor tenha possibilidade de ligação em dupla tensão.

### **Vantagens**

- É muito utilizada, devido ao seu custo reduzido.
- Não tem limites quanto ao seu número de manobras.
- Os componentes ocupam pouco espaço.
- A corrente de partida fica reduzida para aproximadamente  $1/3$  da nominal.

### **Desvantagens**

- A chave só pode ser aplicada em motores com no mínimo seis terminais acessíveis.
- A tensão de linha da rede deve coincidir com a tensão da ligação triângulo do motor.
- Reduzindo a corrente de partida em  $1/3$  reduz-se também o momento de partida em  $1/3$ .
- Se o motor não atingir 90 % da velocidade nominal, no momento da troca de ligação, o pico de corrente na comutação será quase como se fosse uma partida direta.

### **Montagem de circuito de partida estrela-triângulo temporizado**

A partida estrela-triângulo pode ser feita de forma automática, sem a necessidade de um operador realizar essa operação. E isto pode ser feito com o auxílio de um temporizador, apresentado na Figura, que será alimentado no momento em que a contatora, que é responsável pela partida em estrela, for

alimentada, para assim começar a contagem do tempo. O tempo que o motor leva para chegar a sua velocidade nominal depende da carga, então o tempo a ser estabelecido no temporizador deve ser suficiente para que o motor chegue a sua velocidade nominal.

Ao passar o tempo estabelecido no temporizador, este faz com que os contatos das contadoras mudem, o que tem como resultado a passagem da ligação das bobinas de estrela para triângulo. O circuito de força e de comando da partida estrela-triângulo temporizada é apresentado na Figura.

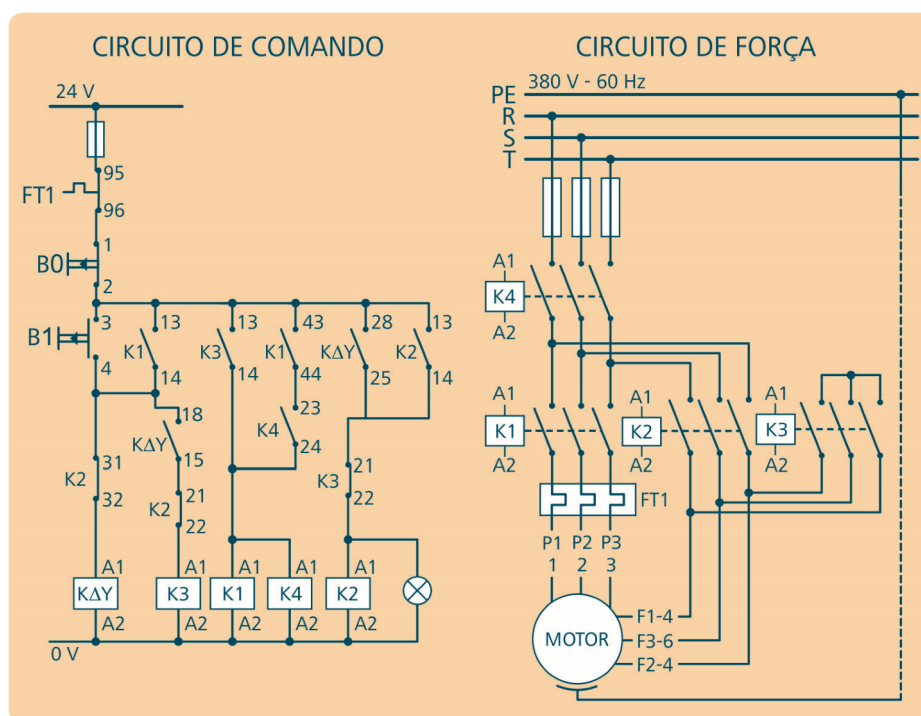


Figura: Circuito de comando e força da partida estrela-triângulo temporizado



## Referências

ALBUQUERQUE, R. O. Circuitos em corrente alternada. 7. ed. São Paulo: Érica, 1997a.

\_\_\_\_\_. Circuitos em corrente contínua. 7. ed. São Paulo: Érica, 1997b.

BOYLESTAD, R. L. Introdução à análise de circuitos. 10. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

EDMINISTER, J. A. Circuitos elétricos. 2. ed. Coleção Schaum. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2001.

GUSSOW, M. Eletricidade básica. 2. ed. Coleção Schaum. São Paulo: Pearson Makron Books, 1997.

LOURENÇO, A. C.; CRUZ, E. C. A.; JÚNIOR, S. C. Circuitos em corrente contínua. 5. ed. São Paulo: Érica, 1998.

NEVES, E. G. C. Eletrotécnica geral. 2. ed. Editora e Gráfica Universitária – UFPel, 2004.

REIS, L. B. D. Geração de energia elétrica. Barueri-SP: Ed. Manole, 2003.

WEG ACIONAMENTOS LTDA. Correção do fator de potência. Manual Técnico.