

ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA - USP

**ELETROTÉCNICA**

Prof. Paulo Armando Panunzio

## 1. Energia elétrica

---

O conceito de energia, já foi discutido durante muito tempo em busca de uma definição exata que satisfizesse plenamente os acadêmicos.

Definir energia é muito difícil e pouco importante e o mais relevante é definir e fixar um conceito de energia elétrica, sua origem, uso, limitações e recursos e estendê-lo até a prática final do nosso trabalho em racionalização e efficientização.

---

A energia elétrica pode ser definida como a energia resultante do movimento de cargas elétricas em um condutor. Infelizmente essa definição não será considerada muito acadêmica, mas servirá exatamente aos nossos propósitos.

A energia elétrica é inseparável da vida moderna. Poucos a percebem, mas sem energia elétrica nenhum avanço tecnológico seria possível. Para nós não é difícil imaginar como nossa vida seria bem diferente sem eletricidade.

Mas, porque é tão importante a ponto de se tornar praticamente indispensável à vida atual?

São muitos os motivos :

1. É facilmente transportável.  
Pode ser produzida no local mais conveniente e transmitida para consumidores distantes por uma simples rede de condutores.
2. Pode ser facilmente transformável em outras formas de energia : Calor, Luz, Movimento.
3. É elemento fundamental para a ocorrência de muitos fenômenos físicos e químicos que formam a base de operação de máquinas, equipamentos.  
Eletromagnetismo, efeito termico, efeito semiconductor, fotovoltaico, oxidação e redução, etc.

Entretanto, assim como qualquer forma de energia, a eletricidade obedece sempre ao primeiro princípio da termodinâmica, que diz que calor e energia são a mesma coisa. Uma quantidade de calor pode produzir um trabalho e vice-versa. Calor e trabalho são equivalentes. Assim, quando dizemos *geração* de energia elétrica, devemos entender como uma *transformação* de uma outra forma de energia em energia elétrica.

---

## 2. Geração de Energia Elétrica

---

Existem várias formas de se gerar energia elétrica. Mas as opções mais comuns diminuem quando se trata de grandes quantidades necessárias para o consumo de uma sociedade.

✓ **Térmica:**

O calor se transforma em energia, resultante da queima de algum combustível (em geral derivado do petróleo, como óleo combustível, gás natural, carvão, madeira, resíduos como bagaços, etc). Mundialmente representa a maior parcela. As instalações usam basicamente caldeiras que geram vapor que acionam turbinas que por sua vez acionam geradores. Ou então máquinas térmicas como motores diesel ou turbinas a gás.

Ambientalmente apresentam vários problemas. A queima de combustíveis produz na atmosfera vários poluentes como enxofre e dióxido de carbono, responsável pelo já preocupante aquecimento global. O desmatamento aumenta em razão do uso da madeira ou carvão vegetal que são intensamente usados.

✓ **Nuclear:**

Pode ser entendida como uma energia térmica que usa caldeira, sendo que a fonte de calor é um reator nuclear em vez da queima de combustível.

Por algum tempo foi considerada a solução do futuro para a geração de energia elétrica. Mas os vários acidentes ocorridos ao longo do tempo revelaram um enorme potencial de risco. Os resíduos (lixo atômico) são um problema ambiental gravíssimo. Atualmente em vários países, não é mais permitida a construção de novas usinas nucleares.

✓ **Hídrica:**

A mais usada no Brasil devido ao nosso grande potencial hídrico.

É a energia potencial de uma queda d'água que é usada para acionar turbinas que, por sua vez, acionam geradores elétricos. Em geral as quedas d'água são artificialmente construídas (barragens), formando extensos reservatórios, necessários para garantir o suprimento em períodos de pouca chuva. Não é, como supomos, um método inofensivo ao meio ambiente, porque os reservatórios ocupam áreas enormes, mas é bem menor que os anteriores. Evidente que a disponibilidade é dependente e limitada aos recursos hídricos de cada região. Como vimos recentemente com o racionamento nos ciclos de 2001/2002 depende muito das estações das chuvas.

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

Outros meios, considerados ambientalmente corretos estão sendo usados cada vez mais, embora a participação global seja ainda pequena: **solar** e **eólico**. No primeiro, em geral, a energia da radiação solar é convertida diretamente em elétrica com o uso de células fotovoltaicas. Há necessidade de acumuladores (baterias) para suprir picos de demanda e fornecer energia durante a noite. Usado principalmente para pequenas unidades residenciais em zonas rurais. No método eólico, o arraste dos ventos aciona pás acopladas a geradores. Obviamente a viabilidade do sistema depende das características climáticas da região. Em alguns países sua participação vem aumentando, devido à possibilidade de se obter quantidades razoáveis de energia com quase nenhum prejuízo ecológico. Entretanto, é sempre um sistema complementar a um outro, uma vez que a irregularidade dos ventos não permite um fornecimento constante.

### 3. Transmissão

Muitas vezes, a geração de energia elétrica ocorre em locais distantes dos centros consumidores. No caso predominante no Brasil (geração hídrica) a natureza é que impõe os locais onde sejam viáveis as construções das barragens.

É comum usinas geradoras distantes centenas ou milhares de quilômetros dos grandes centros. Assim, são necessários meios eficientes de levar essa energia.

A Figura 1 demonstra um esquema simplificado de uma transmissão de energia.

Depois do gerador, transformadores instalados em uma subestação elevadora, na própria usina, elevam a tensão para um valor de transmissão, que dependendo da região, pode variar de 88 até 750 kV. Fim da linha transmissão, transformadores de uma subestação distribuidora abaixam a tensão para um valor de distribuição.

Por que a tensão de transmissão precisa ser tão alta? Podemos fazer uma analogia com uma tubulação de água. Seja uma tubulação pela qual passa uma determinada vazão de água: se aumentamos a pressão no início, a vazão também aumentará sem necessidade de um tubo de maior diâmetro.

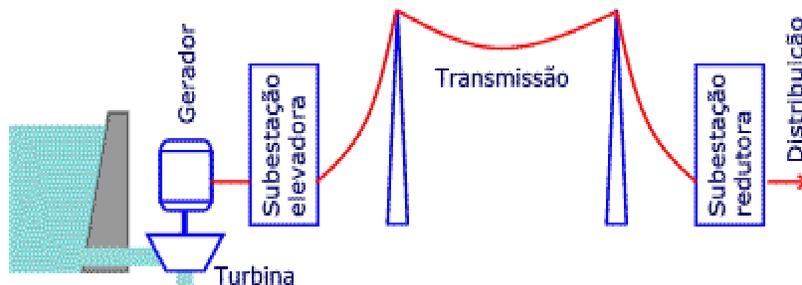


Fig 1

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

No caso da energia elétrica, se transmitida em baixas tensões e na potência necessária para atender milhares de consumidores, a secção dos condutores precisaria ser tão grande que tornaria o sistema economicamente inviável.

É claro que, na prática, os sistemas de transmissão não são tão simples assim.

Usinas normalmente dispõem de vários conjuntos turbina-gerador que trabalham em paralelo. As transmissões de diferentes usinas e diferentes centros consumidores são interligados de forma a garantir o suprimento em caso de panes e outros problemas.

### 4. Distribuição de Energia

Uma rede de distribuição deve fazer a energia chegar até os consumidores de forma mais eficiente possível. Como vimos, quanto mais alta a tensão menor a secção dos condutores para transmitir a mesma potência. Assim, redes de distribuição em geral operam com, no mínimo, duas tensões. As mais altas para os consumidores de maior porte e as mais baixas para os pequenos consumidores.

A Figura 2 mostra um esquema simplificado de uma distribuição típica. A subestação distribuidora diminui a tensão da linha de transmissão para 13,8 kV, chamada **distribuição primária**, que é o padrão geralmente usado nos centros urbanos no Brasil. São aqueles 3 fios que se vê normalmente no topo dos postes. Essa tensão primária é fornecida aos consumidores de maior porte os quais, por sua vez, dispõem de suas próprias subestações para rebaixar a tensão ao nível de alimentação dos seus equipamentos.

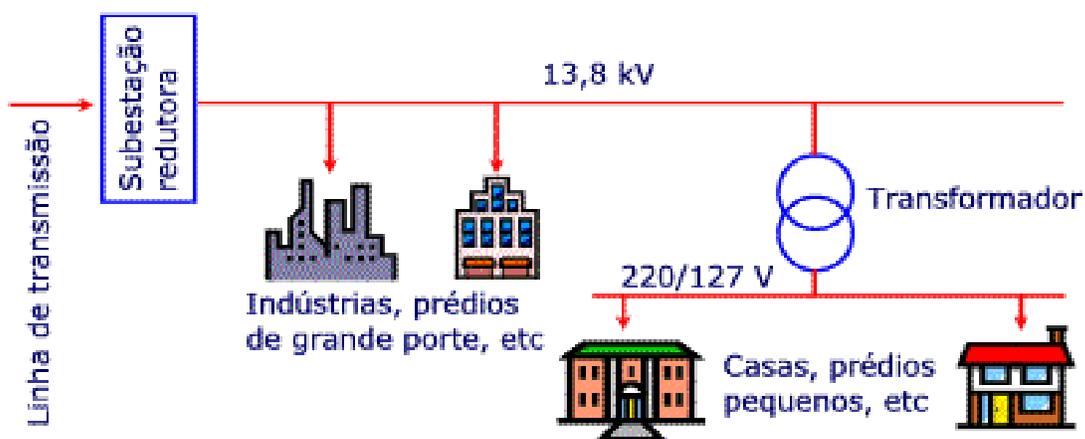


Fig 2

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

A tensão primária também alimenta aqueles transformadores localizados nos postes que reduzem a tensão ao nível de ligação de aparelhos elétricos comuns (127/220 V), para consumidores de pequeno porte. É a chamada **distribuição secundária**.

A rede é formada pelos quatro fios (separados e sem isolação ou juntos e com isolação) que se observam na parte intermediária dos postes.

É evidente que uma distribuição simples assim é típica de uma cidade de pequeno porte. Cidades maiores podem e são supridas com várias linhas de transmissão, dispondo de várias subestações distribuidoras e estas podem conter múltiplos transformadores, formando assim uma rede de distribuição. Também pode haver várias tensões de distribuição primária.

Indústrias de grande porte, consumidoras intensivas de energia elétrica, em geral são supridas com tensões bastante altas, às vezes a da própria transmissão, para evitar altos custos da rede.

### 5. Correntes Trifásicas

---

A **corrente alternada senoidal** é o sistema utilizado para a geração e distribuição de energia elétrica para consumo público. Isto significa que a tensão e a corrente variam ao longo do tempo em forma de uma função senoidal e a variação por unidade de tempo, isto é, a **freqüência**, é constante.

No Brasil foi adotada a freqüência padrão de **60 Hz**.

A escolha do padrão em corrente alternada e não de corrente contínua tem razões técnicas históricas, mas a maior razão para isso é que, provado por Tesla, geradores e motores de corrente alternada são muito mais simples e eficientes. Correntes contínuas não podem ter suas tensões facilmente convertidas (aumentadas ou reduzidas). De fato, é preciso transformá-las em alternadas, converter com transformadores e transformar novamente em corrente contínua.

Entretanto, por contraditório, a corrente contínua apresenta uma boa vantagem: as perdas na transmissão são menores.

Para distâncias e potências muito altas pode ser economicamente viável a transformação em corrente contínua na geração e o processo inverso no destino. ( Ex. transmissão da Usina de Itaipú)

Além disso, por razões de eficiência energética, a geração é sempre feita em forma **trifásica**. O que significa que temos três condutores cujas tensões ou correntes estão igualmente deslocadas entre si em relação ao tempo.

Desde que um período completo equivale a  $360^\circ$ , o deslocamento ou **diferença de fases** entre cada um é de  $360/3 = 120^\circ$ .

A Figura 3 dá uma representação gráfica dessa defasagem. É comum designar os condutores pelas letras R, S, T (ou L1, L2, L3). É genericamente o chamamos de **fases**.

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

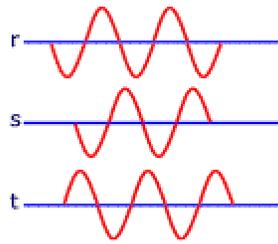


Fig 3

### 6. Correntes Alternadas

Em relação a corrente contínua, os conceitos da corrente alternada se mostram bem mais complexos, mas nada que assuste desde que se tenha uma razoável base matemática, em especial, em funções trigonométricas e integrais.

#### Equação geral da corrente senoidal

Em um circuito AC, tensão e corrente podem estar defasadas entre si. Daí o ângulo  $\phi$  em uma delas.

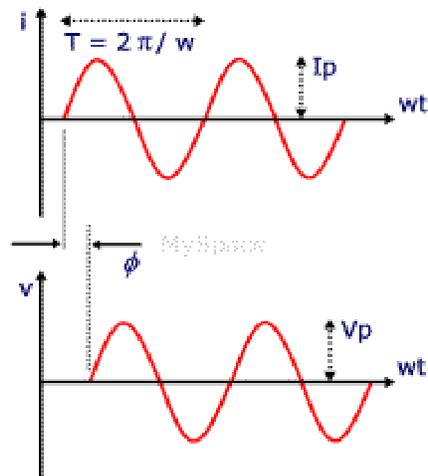


Fig 4

**Corrente:**  $i = I_p \text{ sen}(wt)$

**Tensão:**  $v = V_p \text{ sen}(wt + \phi)$

**Legenda:**

***v* - tensão instantânea**

*i* - corrente instantânea  
*V<sub>p</sub>* - tensão de pico  
*I<sub>p</sub>* - corrente de pico  
*f* - frequência  
*w* - frequência angular (=  $2 \pi f$ )  
*t* - tempo  
 $\varnothing$  - ângulo de fase  
*T* - período (=  $2 \pi / w = 1 / f$ )

### Valor eficaz

É o valor de uma corrente contínua que produz a mesma dissipação de calor em um resistor:

$P = (1/T) \int_{0,T} i^2 R dt = (1/T) \int_{0,T} I_p^2 \sin^2 wt R dt$  e, resolvendo as integrais, temos:

Corrente eficaz  $I_e = I_p / \sqrt{2}$  e tensão eficaz  $V_e = V_p / \sqrt{2}$

É também é chamado **rms** (root mean square).

Os voltímetros e amperímetros para corrente alternada indicam valores em **rms**.

Entretanto, lembrar que instrumentos comuns só indicam **rms** correto para tensões ou correntes senoidais.

Para outras formas devem ser usados tipos mais sofisticados, chamados de **true-rms**.

## 7. Fator de Potência

---

Seja um circuito em que tensão e corrente estejam defasadas de um ângulo  $\varnothing$  conforme equações genéricas informadas:  $i = I_p \text{sen}(wt)$  e  $v = V_p \text{sen}(wt + \varnothing)$ .

A potência instantânea é dada por  $p = vi$ . E a potência média por  $P = (1/T) \int_{0,T} v i dt$ .

Substituindo os valores de  $v$  e  $i$  e resolvendo a integral:

$$P = (V_p I_p \cos \varnothing) / 2 = V_e I_e \cos \varnothing.$$

Isto significa que, se não há defasagem ( $\varnothing = 0^\circ$ ) em um circuito AC, toda a potência é transferida para a carga. Do contrário é menor, podendo inclusive ser nula se  $\varnothing = 90^\circ$ .

Este conceito é muito importante na geração, transformação e distribuição de energia elétrica. Na prática, revela quanto da energia fornecida é realmente utilizada.

## Capacitância

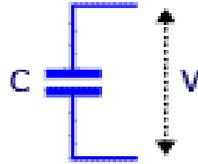


Fig 5

Capacitores são elementos basicamente formados por 2 superfícies condutoras separadas por uma camada isolante. Uma tensão elétrica aplicada entre as mesmas carrega as placas com cargas elétricas opostas, que teoricamente permanecem mesmo depois de retirada a tensão.

Em um capacitor a carga elétrica armazenada é proporcional à tensão aplicada:

$$q = C v$$

O fator de proporcionalidade  $C$  é denominado **capacitância** (unidade **farad**). Como a corrente é dada por  $dq/dt$ , temos:

$$i = dq/dt = C dv/dt = C d( V_p \text{ sen } wt )/dt$$

$$i = w C V_p \text{ cos } wt = w C V_p \text{ sen}(wt + \pi/2)$$

Assim, a corrente é senoidal e **adiantada de 90°** em relação à tensão.

Esta equação pode ser calculada em valores eficazes e então:  $V_e = (1/wC) I_e$

O fator  $1/wC$  é chamado **reatância capacitiva** e é dado em **ohms**.

É similar à resistência de um circuito DC, com a diferença que diminui com o aumento da frequência.

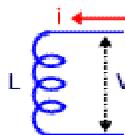
## Indutância

Indutores são condutores dispostos em forma de espiral nos quais os campos eletromagnéticos formados geram correntes que tendem a se opor às variações das correntes aplicada nos mesmos.

Em um indutor a relação entre tensão e corrente é dada por:

$$v = L di/dt$$

Onde o fator  $L$  é denominado **indutância** (unidade **henry**).



## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

Fig 6

Substituindo  $i = I_p \text{ sen}(wt)$  temos:

$$v = L \frac{d(I_p \text{ sen } wt)}{dt} = wL I_p \text{ cos } wt. \text{ Portanto, } v = wL I_p \text{ sem } (wt + \pi/2)$$

Ou seja, a corrente é **atrasada de 90°** em relação à tensão.

Com valores eficazes e de forma similar ao tópico anterior temos:  $V = w L I$

O fator  $wL$  é chamado de **reatância indutiva** e a unidade é o **ohm**.  
Ao contrário do capacitor, o valor aumenta com a frequência.

## 8. Equipamentos e Materiais Elétricos

---

### Transformadores

Os transformadores são umas das máquinas elétricas mais comuns e eficientes. Em sua configuração mais simples, consiste de dois enrolamentos (bobinas) eletricamente isolados entre si mas fisicamente bastante próximos, envoltos por um núcleo de material magnético (ferro). Uma corrente alternada aplicada em um enrolamento induz uma corrente de forma idêntica no outro, mas com tensão proporcional à relação entre os números de espiras de cada enrolamento.

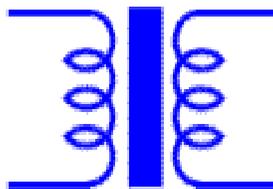


Fig 7

Assim, o transformador é um meio bastante prático para elevar ou reduzir tensões em circuitos de corrente alternada.

O enrolamento que recebe a tensão a modificar é chamado **primário** e o que fornece a tensão modificada, **secundário**.

A Figura 7 mostra o símbolo para um transformador simples.

Um **transformador trifásico** tem três enrolamentos primários e três secundários, ou seja, um par para cada fase.

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

A forma física de um transformador pode variar bastante, dependendo da aplicação. Em geral, conforme já dito, enrolamentos e núcleo são colocados bastante próximos para o máximo aproveitamento do fluxo magnético.

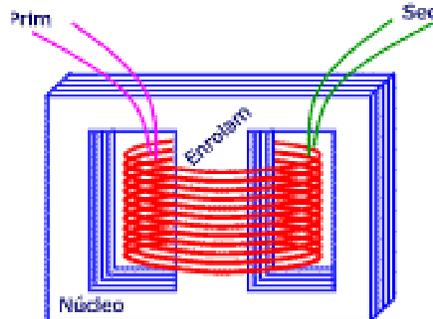


Fig 8

O núcleo não é um bloco maciço de ferro, mas chapas finas e eletricamente isoladas entre si. Isto é feito para minimizar o aquecimento provocado por correntes elétricas induzidas no próprio núcleo (afinal, o ferro também é condutor).

Os enrolamentos primário e secundário são sobrepostos, em torno da parte central do núcleo. Quase sempre, o material do fio é o cobre, revestido com esmalte isolante. As várias camadas dos enrolamentos são separadas por papel ou material similar e, em geral, todo o conjunto é impregnado com um verniz ou cera para melhorar a isolação e evitar penetração de umidade.

Transformadores para tensões mais altas, como as de distribuição, são, em geral, imersos em fluido (óleo) isolante, embora existam também tipos sem óleo, para tensões não muito altas. O fluido, além de proporcionar melhor isolação, permite também uma maior refrigeração do conjunto.

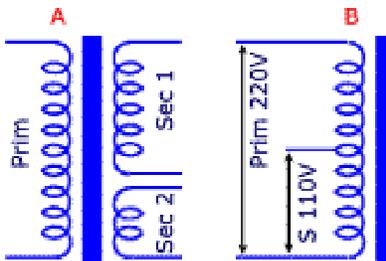


Fig 9

Um transformador não precisa ter necessariamente apenas um secundário para o primário. Pode ter mais de um, conforme Figura 9. Essa construção é útil quando há duas ou mais redes de diferentes tensões e se deseja alimentá-las a partir de uma fonte primária com o uso de somente um transformador. Embora seja encontrado em redes de distribuição, o arranjo é mais comum em pequenos transformadores, usados em aparelhos eletrônicos.

### Motores trifásicos

Motores elétricos trifásicos são uma das máquinas mais simples para se obter movimento. São formados basicamente por duas partes. A parte fixa, chamada **estator**, contém bobinas dispostas radialmente com um núcleo de ferro. Esquema simplificado na Figura 10. Combinando-se corretamente as ligações destas com as 3 fases, o vetor do campo magnético gerado irá girar devido ao deslocamento da corrente entre as fases.

A parte móvel, chamada **rotor**, tem o formato de um cilindro com uma armação de barras condutoras em um núcleo de ferro. As correntes induzidas formam um campo que irá acompanhar o campo girante do estator, produzindo o movimento de rotação.

A simplicidade se deve à ausência de ligação elétrica ao rotor, não existindo, portanto, anéis e escovas como nos motores de corrente contínua.

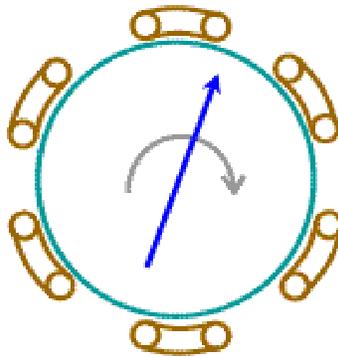


Fig 10

A rotação do campo girante, chamada **rotação síncrona**, é dada pela fórmula:  $w = 60 f / p$ . Onde  $f$  é a frequência e  $p$  o número de pares de pólos. O resultado é dado em rotações por minuto (rpm).

O esquema da Figura 10 se refere a um motor com 4 pólos, ou seja :

$$p = 2. \text{ Se } f = 60 \text{ Hz, então } w = 1800 \text{ rpm.}$$

Na prática a rotação é de 3 a 5% menor que a rotação síncrona devido ao efeito de escorregamento. A rotação de um motor trifásico pode ser facilmente invertida pela inversão da ligação de duas fases.

Motores monofásicos usam o mesmo princípio de campo girante dos trifásicos. Desde que a fase é única, é usado um enrolamento auxiliar em série com um capacitor que provoca o deslocamento de fase e, assim, a rotação do campo.

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

Entretanto o campo não é simétrico como nos trifásicos. Tem o formato de uma elipse, o que reduz bastante eficiência. Por isso são usados apenas para pequenas potências. Desde que a frequência da rede é fixa, pode-se concluir que não é possível ajustar a rotação de um motor trifásico. Entretanto, a evolução da tecnologia eletrônica, em especial dos semicondutores de potência, permitiu o desenvolvimento de equipamentos chamados inversores que convertem a corrente trifásica da rede em uma corrente trifásica de frequência ajustável, permitindo o controle da rotação.

### Condutores

Em geral, dá-se o nome de **cabo** ao conjunto de condutor, camada isolante e capa de proteção conforme Figura 11. É evidente que a única parte essencial é o condutor. As demais podem existir ou não. Exemplos: existem cabos completamente sem isolamento (cabos nus), usados em linhas aéreas e em outros casos. Nos cabos usados em instalações residenciais, tomadas, ligações internas de aparelhos e outros, isolante e capa são normalmente uma única camada. Cabos para alta tensão geralmente têm uma camada a mais, metálica, entre o isolante e a capa (blindagem).

O condutor pode ser um único fio (cabo rígido) ou ser formado por um agrupamento de fios mais finos, o que dá uma flexibilidade ao cabo (cabo flexível). É mais comum a designação **fio rígido** ou **fio flexível**.

A maioria das instalações residenciais e comerciais usa fios rígidos por uma questão de custo. Melhor se fossem flexíveis. Estes têm menos tendência de se soltarem dos terminais e bornes de ligação.

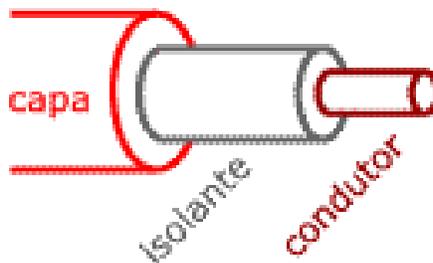


Fig 11

O material do condutor é quase sempre o cobre. É o metal que apresenta melhor compromisso entre condutividade elétrica e custo. Em alguns casos, como linhas de transmissão, é usado o alumínio. Mas isso está fora do escopo desta página.

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

A capacidade de condução de corrente de um cabo depende basicamente da bitola do condutor. Entretanto, isso não deve ser o único critério de dimensionamento. Exemplo: uma carga alimentada por um cabo de comprimento 10 m.

Se for deslocada e o cabo agora tem 100 m, poderá ser necessária uma bitola maior para manter a **queda de tensão** dentro do tolerável.

A padronização dos cabos segundo a capacidade é dada pela **área da seção transversal** do condutor em milímetros quadrados. Os fabricantes fornecem tabelas bastantes práticas para a capacidade de condução em ampères.

Na maioria das instalações residenciais e comerciais, não há qualquer critério para diferenciar os condutores. Uma distinção por meio de cores é altamente vantajosa, tanto para os serviços de instalação quanto eventuais reparos e substituições. A tabela ao lado dá o padrão normalmente adotado.

Padronização de cores de cabos para instalações dadas pela NBR 5410 :

**Fase R - preto**

**Fase S - branco**

**Fase T - vermelho**

**Neutro - azul claro**

**Terra - verde**

### Fusíveis

O **curto-circuito** é o contato direto acidental entre os condutores de uma rede. Pode ser entre fases ou entre fase e neutro. Pode ocorrer devido a algum problema na própria rede ou no interior de alguma máquina ou equipamento. A corrente atinge valores elevados, limitada apenas pela resistência ôhmica dos condutores ou capacidade da fonte geradora. Sem uma proteção adequada, danos graves ocorrerão e o risco de incêndio é grande.

O fusível é um dispositivo de proteção simples e econômico e, por isso, amplamente utilizado. Nada mais é que um pequeno trecho condutor de um material de baixo ponto de fusão. O aquecimento provocado por uma corrente elevada funde o elemento, abrindo o circuito.

Os pequenos fusíveis usados em circuitos eletrônicos são geralmente simbolizados por . Em instalações elétricas é comum o símbolo .

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

A principal característica de um fusível é a sua corrente nominal, isto é, o valor máximo de corrente que o mesmo suporta em regime contínuo sem abrir. Correntes maiores que a nominal irão provocar a ruptura do fusível após algum tempo e esta relação, tempo x corrente de ruptura é a curva característica do fusível.

Os fusíveis também têm uma tensão máxima de operação que deve ser obedecida.

Diferentes tipos de fusíveis, ainda que considerando as mesmas correntes nominais, podem ter curvas diferentes.

Alguns tipos, as vezes chamados de retardados, apresentam um tempo relativamente longo para abrir. Outros, chamados rápidos, abrem em um tempo bem menor, na mesma corrente. Esta diversidade é necessária, uma vez que cargas comuns como motores têm um pico de corrente na partida que deve ser suportado e, portanto, o tipo retardado deve ser usado. Equipamentos sensíveis como os eletrônicos precisam de uma ação rápida para uma correta proteção. É importante evitar confusões. Um fusível rápido colocado no lugar de um retardado provavelmente irá abrir ao se ligar a carga. E um retardado no lugar de um rápido poderá não proteger os componentes em caso de um curto interno no equipamento.

Fusíveis são uma boa proteção contra curtos-circuitos. Não são muito adequados contra sobrecargas. Para tais casos devem ser usados disjuntores, dos quais algumas informações básicas são dadas na próxima página.

### Chaves

Chave é o nome genérico para aqueles dispositivos simples mas extremamente úteis, que ligam ou desligam um circuito elétrico. São usadas nas entradas de rede, em pontos intermediários, nas entradas de aparelhos e máquinas, ou melhor, em tudo onde se faz necessária a ligação ou o desligamento da energia elétrica.

Podem ser tripolares, bipolares ou unipolares, de acordo com o número de fases a manobrar.

Em geral, aquelas pequenas que comandam iluminação são chamadas de interruptores. As maiores, usadas em redes e painéis de máquinas são chamadas de seccionadoras.

Os principais parâmetros de uma chave são a tensão e corrente máxima que pode suportar e nunca devem ser ultrapassados. Entretanto, um outro aspecto importante de uma chave é a capacidade de operar sob carga. Isto é de especial importância em circuitos de alta tensão e/ou potência.

Ao se ligar ou, principalmente, ao se desligar uma chave em um circuito com carga, um arco elétrico é formado por um breve período entre os contatos.

Se a tensão e/ou potência são altas, o arco pode ter intensidade suficiente para ionizar o ar ao redor e provocar uma passagem de corrente com a fase vizinha como se fosse um curto-circuito. As chaves que podem operar sob carga dispõem de meios de extinção do arco para evitar tal perigo.

# Energia Elétrica – Conceitos Básicos

## Diagrama unifilar

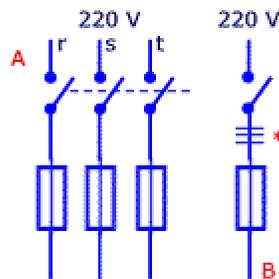


Fig 12

Na grande maioria dos casos, os componentes usados em cada fase de um circuito trifásico são idênticos. Isto ocorre porque sempre se deseja o maior equilíbrio possível entre as correntes que circulam em cada fase. Assim, a representação em um diagrama será repetitiva e a existência de 3 linhas dificulta a compreensão e torna a confecção do mesmo mais trabalhosa.

O **diagrama unifilar** é muitas vezes usado para facilitar tanto a elaboração quanto a visualização. Na Figura 12, temos o diagrama de uma alimentação trifásica com uma seccionadora trifásica e 3 fusíveis. Em B, a mesma representação unifilar. Os três traços (\*) indicam que são os 3 condutores das fases e fica subentendido que os componentes (chave e fusível) são trifásicos.

## Disjuntores

Disjuntores são dispositivos eletromecânicos de proteção que funcionam sob ação magnética e/ou térmica, interrompendo o circuito em caso de curto-circuito e/ou sobrecarga. A ação magnética funciona na

ocorrência de curtos-circuitos e um disjuntor somente magnético seria simbolizado por . Um disjuntor

somente térmico tem o símbolo  e protege contra sobrecargas. Em geral, os disjuntores combinam

ambas as formas de proteção. São chamados de **termomagnéticos**, com o símbolo . É claro que tais símbolos se referem a disjuntores monofásicos. Para os tipos bi e trifásicos, eles são agrupados de forma similar às chaves seccionadoras do tópico 1.

Existe uma ampla variedade de tipos e capacidades, que aqui não cabe detalhar. Entretanto, vale lembrar que, em instalações residenciais comuns, eles são muitas vezes os únicos meios de proteção usados, substituindo fusíveis e chaves.

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

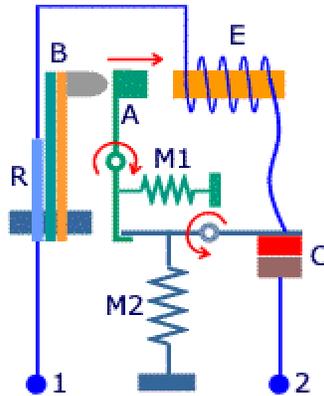


Fig 13

A Figura 13 mostra o esquema simplificado de um disjuntor termomagnético.

Entre os bornes 1 e 2, a corrente passa pela resistência de baixo valor R (que está próxima da lâmina bimetálica B), pela bobina do eletroímã E e pelo par de contatos C. Este tende a abrir pela ação da mola M2 mas o braço atuador A impede com ajuda da mola M1.

O eletroímã E é dimensionado para atrair a extremidade do atuador A somente em caso de corrente muito alta (curto circuito) e, nesta situação, A irá girar no sentido indicado, liberando a abertura do par de contatos C pela ação de M2. De forma similar, R e o bimetal B são dimensionados para que este último não toque a extremidade de A dentro da corrente nominal do disjuntor. Acima desta, o aquecimento do bimetal o levará a tocar o atuador A, interrompendo o circuito de forma idêntica à do eletroímã.

### Lâmpadas

As lâmpadas incandescentes, são bastante conhecidas e aqui não cabem mais detalhes. São de baixo custo e fáceis de instalar. O problema é a baixa eficiência. Apenas aproximadamente 5% da energia consumida é transformada em luz. O restante é perdido em forma de calor.

Como alternativas mais eficientes, existem as lâmpadas de descarga a gás, sendo a fluorescente a mais usada em ambientes comerciais e residenciais. Em indústrias e para iluminação de grandes áreas são usados também os tipos vapor de mercúrio e vapor de sódio.

A Figura 14 mostra o funcionamento de uma lâmpada fluorescente comum, tubular. A estrutura é um bulbo tubular de vidro, com um filamento em cada extremidade, contendo uma pequena quantidade de mercúrio e um gás nobre (argônio, criptônio ou neônio) em baixa pressão. Há também um revestimento opaco interno. Sob ação do potencial elétrico aplicado nos filamentos, os elétrons se movem de um lado a outro em alta

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

velocidade. A colisão com os átomos do mercúrio emite radiação ultravioleta. Um revestimento interno com material apropriado, por exemplo, halofosfato de cálcio, converte esta radiação em luz visível. A eficiência de uma lâmpada fluorescente está na faixa de 23%.

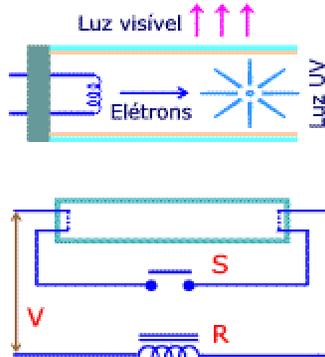


Fig 14

Entretanto, a lâmpada fluorescente exige dispositivos adicionais para operar. Na parte inferior da Figura 14, o esquema de ligação mais simples, com partida manual. O reator R (bobina com núcleo de ferro) é necessário para limitar a corrente e fornecer a tensão adequada. Para acender é necessário pressionar por um breve período o botão S, de forma a aquecer os filamentos e formar o arco entre as extremidades. Uma vez acesa o filamento pode e deve ser desligado, pois a descarga se mantém enquanto houver tensão aplicada. Evidente que este método é pouco prático. Existem dispositivos chamados **starters** que fazem esta operação automaticamente.

Há também reatores que dispensam starters, chamados de **partida rápida**. E também os reatores eletrônicos.

Desde a última década, são bastante usadas as lâmpadas fluorescentes compactas, em formato de U ou circular. Contendo o reator na própria base e soquete padrão, tornam a instalação tão simples quanto a das incandescentes.

### Interruptor de fuga

Também chamado **interruptor diferencial**, é na realidade um disjuntor. Mas não se destina à proteção contra curtos ou sobrecargas e sim contra falhas na isolação de aparelhos.

Na Figura 15 o princípio de funcionamento: um equipamento é ligado à rede monofásica e o conjunto interruptor é formado pelas partes dentro do retângulo tracejado. A alimentação da rede passa pelo núcleo da bobina L que alimenta o atuador A que, por sua vez, comanda o grupo de contatos C.

Em situação normal, a corrente no condutor fase é igual à do neutro mas em sentidos opostos. Assim, os campos magnéticos se anulam e não há tensão induzida na bobina L. Entretanto, se houver uma fuga F de corrente entre o circuito do equipamento e sua carcaça que está aterrada, a corrente na fase será maior que

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

a do neutro. Isso induz uma tensão na bobina L e o atuador A faz a abertura dos contatos. Opera de forma similar com circuitos trifásicos.

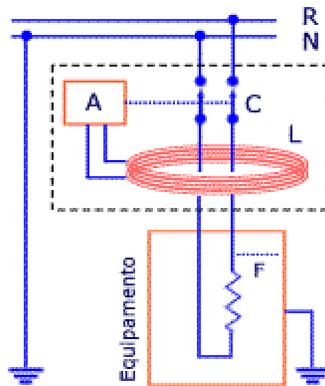


Fig 15

Notar que pode funcionar também como uma proteção contra choques. Se a carcaça do equipamento não estiver aterrada e houver uma fuga e for tocada por uma pessoa, o desequilíbrio de corrente ocorrerá e poderá fazer o interruptor atuar.

A principal característica, além da máxima tensão e corrente que pode suportar, é a **sensibilidade**, isto é, a menor corrente de fuga que provoca a abertura (o conceito está no sentido inverso, ou seja, quanto menor a corrente, maior a sensibilidade).

Interruptores de baixa sensibilidade, como por exemplo 500 mA, são usados para proteção somente contra fugas e as carcaças dos equipamento devem estar corretamente aterradas. Já os de alta sensibilidade como 30 mA são usados onde o aterramento não existe ou é deficiente. Entretanto, tais dispositivos não podem ser considerados substitutos do aterramento. O aterramento **deve ser** sempre usado.

## 9. Tensões no Circuito Trifásico

A tensão entre duas fases quaisquer de uma linha trifásica deveria ser a mesma, sendo esta a sua referência de tensão (às vezes chamada **tensão de linha** ou **tensão entre fases**).

Transformadores (e outros elementos trifásicos como motores) podem ter seus enrolamentos ligados em dois arranjos distintos: **triângulo** e **estrela**.

A Figura 16 mostra o esquema típico de uma ligação de um transformador para a distribuição secundária.

O primário tem seus enrolamentos ligados em triângulo e, assim, cada um recebe a tensão de 13,8 kV (poderia ser também em estrela mas foi colocado desta forma para visualizar as diferenças). Já o secundário tem os enrolamentos ligados em estrela e o nó central é chamado de **neutro**, o que adiciona um quarto condutor ao circuito (são os 4 fios que se vê na parte intermediária dos postes).

O condutor neutro é geralmente ligado a um aterramento, ficando portanto com um potencial nulo em relação à terra. Nesta configuração, a tensão entre fases é igual a  $\sqrt{3}$  vezes a tensão entre fase e neutro (às vezes chamada simplesmente **tensão de fase**). Pode-se conferir que  $220 \cong 127 \sqrt{3}$ .

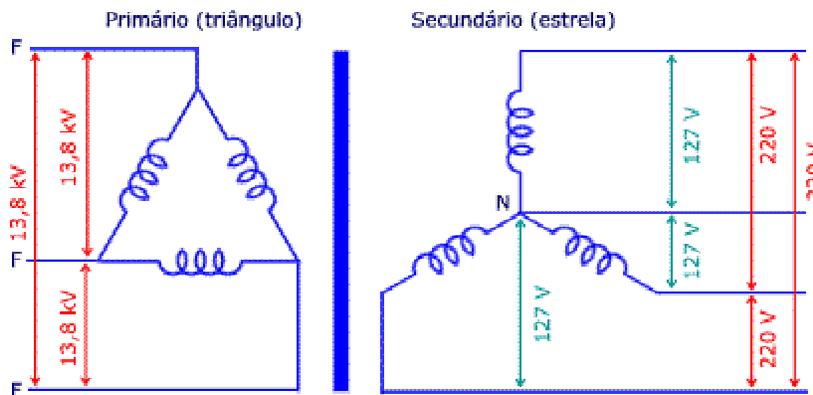


Fig 16

Este arranjo dá uma flexibilidade na ligação aos consumidores. Para a maioria dos consumidores de pequeno porte basta os 127 V de uma fase e o neutro, o que é chamado de **ligação monofásica**.

Se o consumidor tem um número de cargas maior, pode ser interessante fornecer duas fases e o neutro (**ligação bifásica**), para um melhor equilíbrio de cargas na rede.

Notar que o consumidor bifásico tem, além dos 127 V entre fases e neutro, a tensão de 220 V entre fases.

Assim, ele pode optar por usar esta tensão para aparelhos de maior potência (chuveiro, por exemplo), a fim de reduzir o custo da instalação (bitola menor do condutor).

A **ligação trifásica** deve ser usada se o número de cargas é ainda maior e/ou se existem equipamentos trifásicos como motores. Lembrar que motores trifásicos são mais simples e eficientes e apresentam menos problemas que os monofásicos.

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

Para consumidores de grande porte, indústrias e outros, ligados à distribuição primária e que têm, portanto, suas próprias subestações, existem padrões mais elevados de tensão para menores custos das instalações. Valores usuais são **220/380 V ou 254/440 V** ou maiores.

### Tensão, corrente e potência

Em um circuito de corrente contínua, a potência demandada por uma carga é o simples produto da tensão pela corrente que circula pela mesma. Para corrente alternada também, mas com algumas diferenças.

Seja o circuito simples da Figura 17 um gerador de corrente alternada que fornece uma tensão  $V$  para uma carga genérica  $c$  e por esta circula uma corrente  $I$ .

Se a carga  $c$  for puramente resistiva, o produto da tensão pela corrente será realmente a potência absorvida pela mesma. Mas se for uma carga indutiva (motor, reator de lâmpada fluorescente, etc), haverá uma defasagem  $\phi$  entre a tensão e a corrente no circuito conforme indicado.

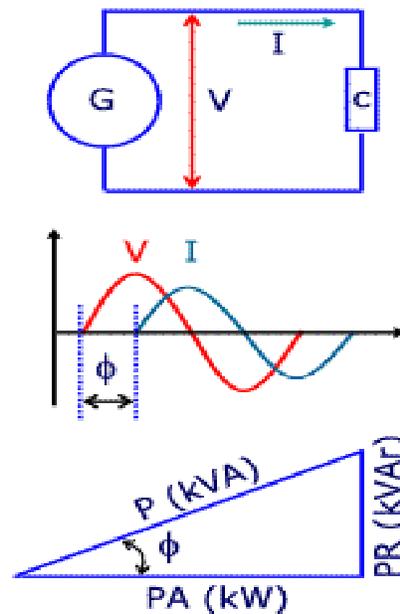


Fig 17

E a potência total (o produto da tensão pela corrente) será a soma ortogonal de dois componentes. E temos as seguintes definições e igualdades:

**Potência aparente ou total**  $S$  ou  $N = V I$ . [VA] – volt ampere

**Potência ativa**  $= P \cos \phi = V I \cos \phi$ . [W] - watts

**Potência reativa**  $Q = P \sin \phi = V I \sin \phi$ . [Var] – volt ampere reativo que pode ser capacitivo ou indutivo.

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

Como  $S \geq P$ , isto representa um importante dado em circuitos de corrente alternada, uma vez que a potência resultante de trabalho útil na carga é somente a potência ativa, mas o gerador fornece potência aparente. Isto significa que a potência reativa é indesejável. Ela não produz trabalho útil, mas é demandada do gerador e contribui para carregar a fiação entre este e a carga.

O parâmetro **cos  $\phi$**  é chamado **fator de potência** da instalação.

Portanto, uma instalação ideal deve ter  $\cos \phi = 1$ . Como isto só ocorre com cargas puramente resistivas (ex: lâmpadas incandescentes, resistências de aquecimento), para as demais é sempre menor que 1.

Em tópico posterior, será visto como o fator de potência pode ser corrigido.

A unidade de potência do Sistema Internacional é o watt (W). Em instalações elétricas é mais comum o uso do múltiplo quilowatt (kW). Entretanto, para designar a potência aparente, é praxe usar o quilo volt-ampère (kVA). Fisicamente as unidades se equivalem, isto é,  $1 \text{ kVA} = 1 \text{ kW}$ . É apenas para distinguir uma de outra. Analogamente, para potência reativa, é usado kVAr, que também equivale ao kW.

No circuito deste tópico está considerado um gerador como fonte da energia elétrica. Mas poderia perfeitamente ser um transformador alimentado a partir de uma rede elétrica. Assim, para transformadores e geradores, a especificação de potência é sempre dada em kVA (potência aparente) para ficar independente do fator de potência da carga. Exemplo: um gerador ou transformador com capacidade de 100 kVA poderá fornecer 100 kW de potência útil se o fator de potência da carga for 1. Se for 0,8, por exemplo, a potência útil que poderá fornecer será  $100 \times 0,8 = 80 \text{ kW}$ .

Para os circuitos trifásicos a energia reativa ocorre de forma similar conforme tópico a seguir, mas é importante não confundir a defasagem entre tensões ou entre correntes das três fases com a defasagem entre *tensão e corrente* devido à presença de carga indutiva. São coisas completamente distintas.

### Corrigindo o fator de potência

Conforme já visto, qualquer fator de potência menor que 1 significa desperdício. A energia reativa é suprida pela fonte fornecedora, mas não se transforma em trabalho útil para o consumidor. É dissipada na rede. Assim, as empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica agem para manter o fator de potência no mais alto valor possível.

Provavelmente devido a razões de custo-benefício, não há controle sobre os pequenos consumidores. Para os de maior porte é fixado um fator de potência mínimo, abaixo do qual o consumidor é penalizado com multa.

O método comum para correção do fator de potência é dado na Figura 18. Supomos que  $c$  é uma carga indutiva.

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

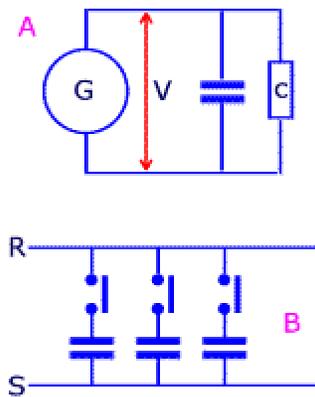


Fig 18

Um capacitor em paralelo com a carga e adequadamente dimensionado poderá fazer a corrente perfeitamente em fase com a tensão e, portanto, fator de potência unitário.

Na prática, um consumidor não tem apenas uma carga. Numa indústria, por exemplo, normalmente são muitas e podem ser ligadas ou desligadas ao longo do dia e a potência demandada das mesmas varia dependendo do equipamento.

Desde que não é possível construir capacitores variáveis nos valores de capacitância exigidos, normalmente é usada uma seqüência de capacitores comutados por chaves magnéticas conforme Figura 18.

Um circuito eletrônico monitora o fator de potência e liga ou desliga cada capacitor para mantê-lo o mais próximo possível da unidade.

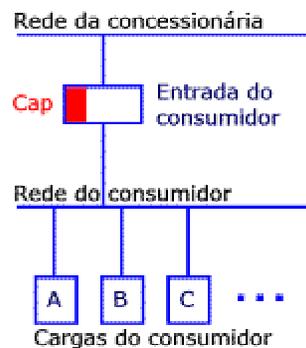


Fig 19

Evidente que num sistema trifásico os capacitores devem ser instalados em cada par de fases. Formam assim uma série de elementos e muitas vezes o conjunto é chamado **banco de capacitores**.

Normalmente o banco de capacitores é instalado na entrada de energia do consumidor (quadro ou

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

subestação própria, se é ligado à distribuição primária). Ver Figura 19. Se em subestação própria, deve ser ligado ao secundário do transformador. A instalação no primário pode atender os requisitos da concessionária mas o transformador do consumidor continuará fornecendo energia reativa para sua rede interna.

Se o consumidor tem uma carga significativamente alta em relação às demais (por exemplo A), pode ser interessante um banco específico junto à mesma. A eficiência da rede melhora.

### 10. Anexos Interessantes

---

#### Correntes não senoidais

Aqui não cabe a prova matemática, mas se demonstra que qualquer movimento periódico não senoidal pode ser representado pelo somatório de movimentos senoidais:

O primeiro chamado de **fundamental** (de freqüência mais baixa) e os restantes, chamados de **harmônicos** (de freqüências múltiplas inteiras da fundamental). Esta representação é conhecida por **série de Fourier**.

Alguns exemplos são dados a seguir.

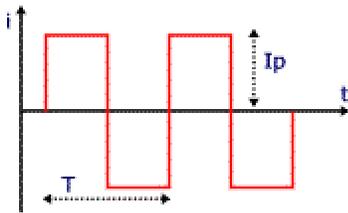


Fig 7.1: sinal quadrado

#### Forma quadrada (cálculo do valor eficaz):

Não há necessidade de cálculo. Como a potência dissipada num resistor não depende do sentido da corrente, ela seria a mesma se, por exemplo, todos os semiciclos negativos fossem positivos e, assim, a corrente seria contínua. Portanto:

$$I_e = I_p .$$

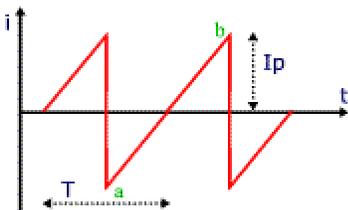


Fig 7.2: sinal dente de serra

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

**Forma dente de serra** (cálculo do valor eficaz):

Considerando um ciclo a parte linear que vai de **a** até **b**:

$$i = ( (2 I_p t) / T ) - I_p = I_p (-1 + 2t/T),$$

supondo **t=0** em **a**.

Substituindo na fórmula já dada,

$$(I_e)^2 = (1/T) \int_{0,T} i^2 dt, \text{ e resolvendo para este caso:}$$

$$I_e = I_p / \sqrt{3}$$

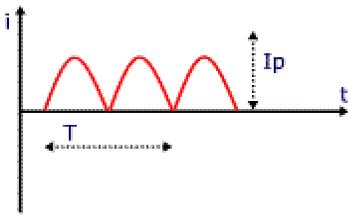


Fig 7.3: sinal meia senóide

**Forma meia senóide** (cálculo do valor eficaz):

Série de Fourier para esta forma de onda:

$$i = 2I_p/\pi - (4I_p/3\pi)\cos 2wt - (4I_p/15\pi)\cos 4wt + ..$$

Como a contribuição de cada componente para a potência não depende das demais temos:

$$(I_e)^2 = (I_{e0})^2 + (I_{e1})^2 + (I_{e2})^2 + ...$$

Pode-se verificar que apenas o componente fundamental (0) e a primeira harmônica (1) são significativos, sendo as demais de pequeno valor. Resolvendo conforme anterior:

$$I_e \cong (2 I_p) / (\pi) + (2 \sqrt{2} I_p) / (3\pi)$$

Observar que o componente fundamental é uma corrente contínua.

### Lei de Ohm

**Jorge Simon Ohm** verificou que, entre dois pontos de um material percorrido por uma corrente elétrica, existe uma proporcionalidade entre a corrente que circula e a diferença de potencial:

$$V = R I$$

R é o fator de proporcionalidade ou **resistência elétrica** entre os dois pontos e a unidade no Sistema Internacional é o **ohm** ( $\Omega$ ). Pela importância da descoberta, é denominada **Lei de Ohm**.

# Energia Elétrica – Conceitos Básicos

## Leis de Kirchhoff

### 1ª Lei:

A soma algébrica das correntes em qualquer nó é nula:

$$\Sigma I = 0$$

nó é uma junção de 3 ou mais condutores.

### 2ª Lei:

A soma algébrica das diferenças de potencial em qualquer laço é nula:

$$\Sigma V = 0$$

laço é qualquer caminho fechado no circuito.

---

## Resistividade

Para um condutor composto por um material homogêneo e de seção transversal constante, verifica-se que a resistência elétrica entre dois pontos é diretamente proporcional ao comprimento e inversamente proporcional à área da seção transversal:

$R = \rho L / A$  onde o fator  $\rho$  é a **resistividade** do material. Unidade:  $\Omega \cdot m$

Veja a resistividade típica de alguns metais ( $10^{-8} \Omega \cdot m$ ):

Prata: 1,5

Cobre: 1,7

Alumínio: 2,6

Tungstênio: 5,6

Também são bastante usadas as grandezas inversas:

**Condutância:** inverso da resistência. Unidade: **siemens** (S).

## Energia Elétrica – Conceitos Básicos

**Condutividade:** inverso da resistividade. Unidade: **siemens por metro** (S/m).

### Potência

Por definição, potência é a derivada da energia em relação ao tempo, isto é,

$$P = dW / dt.$$

Como  $dW = V dQ$ , temos:  $P = V dQ/dt$ , ou seja:

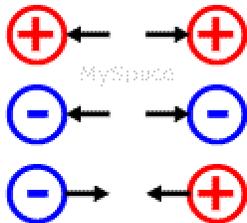
$$P = V I$$

Se substituirmos os fatores conforme lei de ohm, temos

$$P = I^2 R = V^2 / R$$

### Carga elétrica

A evolução das constatações de Mileto levou à conclusão da existência de **cargas elétricas**, que podem ser de duas espécies: **positiva** e **negativa**.



Entre cargas da mesma espécie ocorre uma repulsão e entre espécies diferentes, uma atração.

O modelo atual supõe que uma porção qualquer de matéria, no seu estado normal, contém a mesma quantidade de cargas positivas e negativas.

Quando, por exemplo, um bastão de vidro é atritado contra um tecido, o trabalho mecânico desfaz este equilíbrio, transferindo cargas entre os mesmos. O vidro passa a ter mais cargas positivas e o tecido, mais cargas negativas.