

Nestor Agostini
sibratec@sibratec.ind.br

PROCESSOS ELETRO-ELETRÔNICOS

Rio do Sul
2014

Histórico e conceitos fundamentais a respeito da eletricidade

A eletricidade é uma das formas de energia existente na natureza. Segundo a história, sua existência foi observada na antiga Grécia, porém, nesta época era vista apenas como uma curiosidade, pois não se conheciam aplicações práticas. Tudo começou com âmbar.

Âmbar é um mineral translúcido, quase amarelo. Próximo do ano 600 AC., os gregos descobriram uma peculiar propriedade deste material: quando esfregado com um pedaço de pelo de animal, o âmbar desenvolve a habilidade para atrair pequenos pedaços de plumas. Por séculos essa estranha e inexplicável propriedade foi associada unicamente ao âmbar.

Dois mil anos depois, no século XVI, William Gilbert provou que muitas outras substâncias são "elétricas" (palavra originária do termo em grego para âmbar, *elektron*) e que elas podem apresentar dois efeitos elétricos. Quando friccionado com peles o âmbar adquire uma "eletricidade de resina", entretanto o vidro quando friccionado com a seda adquire o que eles chamaram de "eletricidade vítrea", o que eles descobriram foram as cargas positivas e negativas. Eletricidade repele o mesmo tipo e atrai o tipo oposto. Cientistas pensavam que a fricção realmente criava a eletricidade, porém eles não notavam que uma igual quantidade de eletricidade oposta ficava na pele ou na seda.

Em 1747, Benjamin Franklin na América e William Watson (1715-1787) na Inglaterra independentemente chegaram a mesma conclusão: todos os materiais possuem um tipo único de "fluido elétrico" que pode penetrar no material livremente, mas que não pode ser criado e nem destruído. A ação da fricção simplesmente transfere o fluido de um corpo para o outro, eletrificando ambos. Franklin e Watson introduziram o *princípio da conservação de carga*: a quantidade total de eletricidade em um sistema isolado é constante.

Franklin definiu o fluido, que correspondia a eletricidade vítrea, como positiva e a falta de fluido como negativo. Portanto, de acordo com Franklin, a direção do fluxo (corrente) era do positivo para o negativo, porém atualmente sabe-se que o oposto é vem a ser verdade. Uma segunda teoria com base no fluido foi desenvolvida, subsidiadamente, na qual amostras do mesmo tipo se atraem, enquanto aquelas de tipos opostos se repelem.

Franklin ficou conhecido com a *Garrafa de Leyden*, uma garrafa recoberta por dentro e por fora com folhas de estanho. Foi o primeiro *Capacitor*, um dispositivo utilizado para estocar carga elétrica. A Garrafa de Leyden poderia ser descarregada tocando o seu interior e seu exterior recoberto de estanho simultaneamente, causando um choque elétrico na pessoa. Se um condutor de metal fosse usado, uma faísca poderia ser vista e ouvida. Franklin tinha dúvidas de que o raio e o trovão eram um resultado de uma descarga elétrica. Durante uma tempestade em 1752, Franklin empinou uma pipa que tinha uma extremidade de metal. No fim da chuva, na linha condutora de cânhamo da pipa empinada, ele atou uma chave de metal, na qual amarrou um barbante de seda não condutor que colocou em sua mão. O experimento foi extremamente arriscado, mas o resultado foi inconfundível: quando ele colocou os nós de seus dedos perto da chave, ele pode atrair faíscas para si. Os outros dois que tentaram esse experimento extremamente perigoso morreram.

Já era conhecido em 1600 que a força repulsiva ou atrativa diminuía quando as cargas eram separadas. Essa relação foi primeiro abordada de uma forma numericamente exata, ou quantitativa, por Joseph Priestley, um amigo de Benjamin Franklin. Em 1767, Priestley indiretamente deduziu que quando a distância entre dois pequenos corpos carregados é aumentada por um fator, as forças entre os corpos são reduzidas pelo quadrado do fator. Por exemplo, se a distância cargas é triplicada, a força resultante diminui para um nono do valor anterior. Ainda que rigorosa, a prova de Priestley foi tão simples que ele mesmo não ficou plenamente convencido. O assunto não foi considerado encerrado até 18 anos depois, quando John Robison da Escócia fez mais medidas diretas das força elétrica envolvida.

O físico francês Charles A. de *Coulomb*, cujo nome é usado para designar a unidade de carga elétrica. Este fato aconteceu depois deste realizar uma série de experimentos, que adicionou importantes detalhes (bastante precisos) à prova de Priestley. Ele também desenvolveu a teoria de dois fluidos para cargas

elétricas, rejeitando tanto a ideia da criação de eletricidade pela fricção e o modelo de um único fluido de Franklin.

Hoje a lei da força eletrostática, também conhecida como *Lei de Coulomb*, é expressa da seguinte forma: se dois pequenos objetos, separados por uma distância "r", tem cargas "p" e "q" e estão em repouso, a magnitude da força F entre elas é dada por $F=kpq/rr$, onde "k" é uma constante. De acordo com o Sistema Internacional de Medidas, a força é medida em Newtons, a distância em metros, e a carga em Coulombs.

Também foi concluído que cargas de sinais opostos se atraem, enquanto aquelas que possuem o mesmo sinal se repelem.

Um Coulomb (C) representa uma grande quantidade. Para manter um Coulomb positivo (+C) 1m de distância de um Coulomb negativo (-C) seria necessário uma força de 9 bilhões de Newtons. Uma nuvem eletricamente carregada típica pode causar um raio que possui uma carga de 30 Coulombs.

Por causa de um acidente, no século XVIII o cientista italiano Luigi Galvani começou uma cadeia de eventos que culminaram no desenvolvimento do conceito de voltagem e a invenção da bateria. Em 1780, um dos assistentes de Galvani noticiou que uma perna de rã dissecada se contraria, quando ele tocava seu nervo com um escalpelo. Outro assistente achou que tinha visto uma faísca saindo de um gerador elétrico carregado ao mesmo tempo. Galvani concluiu que a eletricidade era a causa da contração muscular da rã. Ele, erroneamente pensou, entretanto, que o efeito era devido à transferência de um fluido, ou "eletricidade animal", em vez da eletricidade convencional.

Em experimentos com o que ele chamava de eletricidade atmosférica, Galvani descobriu que uma perna de rã poderia se contrair quando presa por um gancho bronze em uma treliça de aço. Outro italiano, Alessandro Volta, um professor da Universidade de Pavia, afirmou que o bronze e o aço, separados por um tecido úmido de rã, geravam eletricidade, e que a perna de rã era apenas um detector. Em 1800, Volta conseguiu amplificar o efeito pelo empilhamento de placas feitas de cobre, zinco e papelão úmido respectivamente e fazendo isto ele inventou a bateria.

Uma bateria separa cargas elétricas através de reações químicas. Se a carga é removida de alguma forma, a bateria separa mais cargas, transformando energia química em energia elétrica. Uma bateria pode produzir cargas, por exemplo, para forçá-las através do filamento de uma lâmpada incandescente. Sua capacidade para realizar trabalho por reações elétricas é medida em *Volt*, unidade nomeada por Volta. Um volt é igual a 1 joule de trabalho ou energia por cada Coulomb de carga. A capacidade elétrica de uma bateria para realizar trabalho é denominada *Força Eletromotriz*, ou fem.

Outro dispositivo capaz de trabalho elétrico é o *Capacitor*, um descendente da Garrafa de Leyden, que é usado para estocar carga. Se uma carga "Q" é deslocada entre placas de metal a voltagem sobe para uma quantidade V. A medida utilizada para medir o quanto de carga um capacitor pode estocar é a *Capacitância* "C", onde $C=Q/V$. Carga flui de um capacitor da mesma forma que na bateria, mas com uma diferença significativa. Quando a carga deixa as placas do capacitor, não possível obter mais sem recarregar o dispositivo. Isso acontece devido o caráter conservativo da força elétrica. A energia liberada não pode exceder a energia estocada. Essa capacidade para realizar trabalho é denominada *Potencial Elétrico*.

Um tipo de conservação de energia é também associado com a fem. A energia elétrica obtida de uma bateria é limitada pela energia estocada nas ligações químicas das moléculas. Tanto a fem como o potencial elétrico são medidos em volts, e, infelizmente, os termos voltagem (também chamada tensão), potencial e fem são usados indistintamente. Por exemplo, no caso da bateria o termo potencial muitas vezes é utilizado em lugar de fem.

Seja como uma fem ou um potencial elétrico, tensão é uma medida da capacidade de um sistema para realizar trabalho por meio de uma quantidade de carga elétrica unitária. Para exemplificar tensão tem-se: a voltagem medida em eletrocardiogramas, que fica em torno de 5milivolts, a tensão disponível nas tomadas das casa de 220V, e além disso tem-se o enorme potencial de milhares de volts existentes entre uma nuvem carregada e o chão, que é necessário para a produção de um relâmpago.

Dispositivos para o desenvolvimento de tensão inclui baterias, geradores, transformadores e geradores de Van de Graaff.

Algumas vezes altas tensões são necessárias. Por exemplo, os elétrons emitidos em tubos de televisão requer mais de 30.000 volts. Elétrons se movendo devido a essa tensão alcançam velocidades perto de um terço da velocidade da luz e tem energia suficiente para produzir um ponto na tela. Essas altas diferenças de potenciais podem ser produzidas por baixas tensões alternadas utilizando-se um *Transformador*.

Uma carga elétrica em movimento é denominada *corrente elétrica*. A magnitude de uma corrente é a quantidade de carga passado em um determinado ponto (seção de um fio) por segundo, ou $I=Q/t$, onde Q é a quantidade de carga em Coulombs que passa na seção do fio. A unidade utilizada para medir corrente é o *Ampere*, que é igual a 1 Coulomb/s.

Por ser a fonte do magnetismo também, a corrente é a ligação entre eletricidade e magnetismo. Em 1819 o físico dinamarquês Hans Christian Oersted descobriu que uma agulha de bússola era afetada pela passagem de corrente em um fio. Quase que imediatamente, André Ampere na França descobriu a lei da força magnética. Michael Faraday na Inglaterra e Joseph Henry nos Estados Unidos adicionaram a ideia da indução magnética, pelo qual uma variação do campo magnético produz um campo elétrico. Esse foi o início para a formulação da teoria eletromagnética de James Clerk Maxwell.

Atualmente, um moderno amperímetro pode detectar correntes muito baixas da ordem de 1/100.000.000.000.000 amperes, que é apenas 63 elétrons por segundo. A corrente em um impulso nervoso é aproximadamente de 1/100.000 amperes, um relâmpago atinge uma corrente de 20.000 amperes, e uma bomba nuclear chega a 10.000.000 de amperes com 115V.

Muitos materiais são *Isolantes*. Neles todos os elétrons estão nos limites dos átomos e não permite um fluxo de cargas, menos quando submetidos a altos campos elétricos que proporcionam uma "quebra" dessas iterações dos elétrons. Então, em um processo denominado ionização, os elétrons mais "frouxos" são arrancados dos átomos, formando um fluxo de corrente. Essa condição existe durante uma tempestade elétrica. A separação de cargas entre as nuvens e o chão cria um grande campo elétrico que ioniza os átomos do ar, pelo qual é formado um caminho de condução elétrica entre as nuvens e o chão (relâmpago).

Embora um condutor permita o fluxo de cargas, isso não ocorre sem uma perda de energia. Os elétrons são acelerados por um campo elétrico. Em geral, eles se movem a distâncias razoáveis, porém eles colidem com alguns dos átomos do condutor, diminuindo sua velocidade ou mudando sua direção. Como resultado, eles perdem energia para os átomos. Essa energia aparece como calor, e essa dispersão é uma resistência para a corrente.

Em 1827 um professor alemão de nome Georg Ohm demonstrou que a corrente em um fio aumenta em proporção direta com a tensão V e com área A da seção transversal do fio, e em proporção inversa ao comprimento L do fio. Dessa forma, a corrente também depende das propriedades do material, a *Lei de Ohm* é então escrita em dois passos, $I=V/R$ e $R=\rho L/A$, onde ρ é a resistividade. A quantidade R é denominada *Resistência*. A *Resistividade* depende apenas do tipo de material. A unidade de resistência é o *Ohm*, onde 1 ohm é igual a 1 volt/amp.

No chumbo, um condutor razoável, a resistividade é 22/100.000.000 ohm-metro; no cobre, um excelente condutor, é apenas 1,7/100.000.000 ohm-metro. Onde altas resistências entre 1 e 1 milhão ohms são necessárias, *Resistores* são feitos de materiais como o carbono, que tem uma resistividade de 1.400/100.000.000 ohm-metro.

Certos materiais perdem sua resistência quase que completamente quando submetido a uma temperatura de alguns graus acima do zero absoluto. Esses materiais são denominados de *Supercondutores*. Algumas substâncias recentemente encontradas mantêm a supercondutividade em temperaturas mais elevadas.

O calor resistivo causado pelo choque dos elétrons é um efeito muito importante e é usado em alguns dispositivos elétricos como a lâmpada incandescente. Em um resistor, a potência P, ou energia por segundo, é dada por $P=(I \text{ ao quadrado}).R$.

A possibilidade que a eletricidade não consista de um uniforme e contínuo fluido provavelmente ocorreu a muitos cientistas. Mesmo Franklin, uma vez, escreveu que o "fluido" consiste de "partículas extremamente sutis".

Todavia, uma grande quantidade de evidências tinham se acumulado antes da eletricidade ser aceita como formada por minúsculas partículas, quantidades discretas, e não mais como um fluido, quando vista

microscopicamente. James Clerk Maxwell se opôs a teoria corpuscular. Por volta do fim do século XIX, entretanto, o trabalho de Sir Joseph John Thompson (1856-1940) e outros provaram a existência do elétron. Thompson tinha medido a proporção da carga do elétron para a sua massa. Então em 1899 ele deduziu um valor para a carga eletrônica pela observação do comportamento de uma nuvem de minúsculas partículas de água carregadas em um campo elétrico. Essa observação conduziu ao Experimento da Gota de Óleo de Millikan.

Robert Millikan, um físico da Universidade de Chicago, com a assistência de um estudante Harvey Fletcher, procuraram medir a carga de um único elétron, um objetivo ambicioso em 1906. Uma minúscula gotinha com um pequeno excesso de elétrons foi formada forçando o líquido através de um dispositivo especial. A gota foi então, em verdade, suspensa, com um campo elétrico atraindo para cima e a força gravitacional puxando para baixo. Para a determinação da massa da gota de óleo e do valor do campo elétrico, a carga na gota foi calculada. O resultado: a carga do elétron "e" é negativa e tem como magnitude $1,60/10.000.000.000.000.000$ Coulombs.

Millikan também determinou que as cargas sempre aparecem com um valor de mais ou menos "e", em outras palavras, a carga é quantizada. Outras partículas elementares descobertas depois tiveram também suas cargas determinadas e foi possível notar que seguiam esta mesma característica. Por exemplo, o *Positron*, descoberto em 1932 por Carl David Anderson do Instituto de Tecnologia da Califórnia, é exatamente a mesma do elétron, exceto que esta é positiva.

A maior parte da matéria, em geral, é neutra. A tendência é que para cada próton (carga positiva) no átomo, para este ser eletricamente neutro, deve existir um elétron (carga negativa), e a soma das cargas deve ser nula. Em 1911, Ernest Rutherford propôs um modelo para o átomo. Ele sugeriu que os elétrons orbitavam um núcleo carregado, com um diâmetro de $1/100.000.000.000.000$ metros, da mesma forma que os planetas orbitavam o Sol. Rutherford também sugeriu que o núcleo era formado por prótons, sendo que cada um teria uma carga de "+e".

Essa visão da matéria, ainda considerada correta em muitos casos, estabilizou a força elétrica que mantém um átomo unido. Depois que Rutherford apresentou seu modelo atômico, o físico dinamarquês Niels Bohr propôs que os elétrons ocupam apenas certas órbitas em torno do núcleo, e que outras órbitas são impossíveis.

1. Grandezas elétricas

A eletricidade é tratada, basicamente, por um conjunto de 3 grandezas fundamentais (Corrente, voltagem e resistência) e mais 2 derivadas (Potência e energia) das 3 fundamentais. São as seguintes:

1.1. Corrente elétrica

A corrente elétrica é o movimento ordenado das cargas elétricas. A carga elétrica mais comum é o elétron livre que está presente nos metais, assim não basta o corpo ter elétrons, alias todos os corpos possuem elétrons, para termos uma corrente elétrica estes elétrons devem ser do tipo elétrons livres, é por isto que a madeira é um isolante, apesar de ter elétrons eles não são livres, a ligação química é forte bastante para prender os elétrons, já os metais possuem uma ligação química que permite que os elétrons fiquem livres no material, são estes elétrons que serão usados para gerar uma corrente elétrica. Não basta termos o movimento dos elétrons livres, isto pode ocorrer com o aumento da temperatura, para termos uma corrente elétrica estes elétrons devem movimentar-se em ordem, todos no mesmo sentido, afinal: A união faz a força. Para que os elétrons se movimentem é preciso aplicar uma força sobre eles, em eletricidade esta força é chamada de Campo Elétrico. A fonte de energia elétrica é a responsável por criar este campo elétrico. Esta força aparece entre cargas elétricas de tipos diferentes, assim, a fonte de energia elétrica cria uma região com excesso de cargas negativas, chamado de polo negativo e outra com falta de cargas negativas, chamadas de polo positivo. A falta de cargas negativas equivale a uma carga positiva. Assim quando um condutor é

conectado entre o polo negativo e o polo positivo o excesso de cargas presentes no polo negativo fluem para completar a falta de elétrons do polo positivo.

Em eletrônica, devido a fatos históricos, consideramos que as cargas elétricas que se movimentam no circuito são as cargas positivas que saem do polo positivo em direção ao polo negativo, o efeito é exatamente o mesmo. Você poderá ver isto caso tomar um choque, não importa se a corrente vem ou cima ou por baixo o efeito vai ser o mesmo, muito chato.

A unidade de corrente é o Ampère e sua representação no circuito deve ser na forma de uma seta, pois a corrente tem direção e sentido.

1.2. Tensão ou diferença de potencial

Para entender o conceito de tensão elétrica, utiliza-se a ideia básica de uma instalação hidráulica. Uma instalação hidráulica simples possui uma caixa de água, uma torneira e os canos que servem para conduzir a água da caixa de água até a torneira. Em eletricidade a caixa de água é o gerador, o cano é o condutor elétrico (fio) e a torneira é a resistência, assim quanto mais aberta a torneira menor a resistência a passagem da água. A corrente elétrica é representada pelo fluxo de água, a água é a carga elétrica.

Para que a água possa fluir pela torneira, não basta ter a caixa de água, é preciso que esta caixa esteja posicionada acima da torneira, para que haja pressão suficiente para empurrar a água para baixo, quanto mais alta a caixa, maior a pressão que empurra a água. A pressão é proporcional a diferença de altura entre a caixa de água e a torneira.

Em eletricidade, tensão é a grandeza equivalente a pressão, é uma espécie de pressão elétrica que empurra os elétrons. Em eletricidade a tensão é proporcional a diferença de potencial elétrico, que é na verdade a diferença de número de cargas elétricas entre os polos da fonte de tensão. Assim a tensão é a diferença de potencial entre os polos da fonte de tensão. Note que a diferença de potencial é essencial para que haja corrente elétrica, mas, não é o suficiente, assim como no circuito hidráulico só a caixa de água alta não basta. Para que haja corrente elétrica (fluxo de elétrons) é preciso que haja um caminho entre o polo positivo e o polo negativo.

A tensão está associada a energia potencial, que é uma energia que está presente pronta para ser usada, mas, somente será aproveitada quando o circuito for fechado.

A corrente está associado a energia cinética, isto é, a energia do movimento dos elétrons livres.

1.3. Resistência elétrica

Como o nome está dizendo, resistência elétrica é aquele componente que se opões (resiste) a passagem da corrente elétrica. Quanto maior a resistência, maior a oposição a passagem da corrente, menor a corrente.

A unidade de resistência elétrica é o Ohm e o seu símbolo é a letra grega Omega Ω . A resistência elétrica é uma característica física do material: cada material existente possui uma determinada resistência. A classificação dos materiais em bons e maus condutores foi feita tomando-se como base a sua resistência. Aqueles que possuem baixa resistência são considerados bons condutores e os que possuem resistência elétrica elevada são os maus condutores. Em geral os metais são bons condutores e os ametais são maus condutores de eletricidade.

A tabela seguinte apresenta alguns materiais e sua resistividade:

Tabela 1.1: Resistividade de alguns materiais

Material	Resistividade ρ ($\Omega \cdot m$)	Coef. de Temp. α ($^{\circ}C^{-1}$)
Condutores		
Prata	$1,58 \times 10^{-8}$	0,0061
Cobre	$1,67 \times 10^{-8}$	0,0068
Alumínio	$2,65 \times 10^{-8}$	0,0043
Tungstênio	$5,6 \times 10^{-8}$	0,0045
Ferro	$9,71 \times 10^{-8}$	0,0065
Semicondutores		
Carbono (grafite)	$(3 - 60) \times 10^{-5}$	-0,0005
Germânio	$(1 - 500) \times 10^{-3}$	-0,0500
Silício	0,1 - 60	-0,0700
Isolantes		
Vidro	$10^9 - 10^{12}$	
Borracha	$10^{10} - 10^{15}$	

1.4. Potência elétrica

Potência elétrica é uma grandeza que mede a rapidez com que a energia elétrica é transformada em outra forma de energia. Define-se potência elétrica como a razão entre a energia elétrica transformada e o intervalo de tempo dessa transformação. Para entender bem esse conceito suponha que seja necessário bombear 1200 m^3 de água de um ponto. Analise as duas sugestões para realizar essa tarefa:

- Realizar o trabalho em 120 horas. Neste caso é necessário bombear $10 \text{ m}^3/\text{hora}$.
- Realizar o trabalho em 12 horas. Neste caso é necessário bombear $100 \text{ m}^3/\text{hora}$.

Pode-se notar que no final, em ambas as situações, os 1200 m^3 serão bombeados, mas então qual a diferença entre as duas situações apresentadas?

A diferença está no fato de que na segunda situação a taxa de realização do trabalho é maior, por isso necessita-se de um sistema de bombeamento com mais potência.

O mesmo poderíamos dizer a respeito de duas lâmpadas incandescentes, uma de 40W e outra de 100W. A de 100W clareia mais porque a taxa de realização de trabalho é maior do que na de 40W.

Em termos elétricos a potência é definida como sendo:

$$P = V \times I$$

Onde: P é a potência em Watts (W), V é a voltagem em Volts (V) e I é a corrente em Amperes (A)

Nota: No caso de circuitos de corrente alternada é necessário considerar o fator de potência da instalação para o cálculo da potência. Esse assunto será visto mais adiante.

1.5. Energia elétrica consumida

A energia elétrica tem a ver com a utilização da eletricidade e é o que é cobrado nas contas de energia elétrica. Ninguém cobra pela potência instalada, mas sim pela utilização das cargas instaladas.

Suponha duas lâmpadas, uma de 100W e outra de 40W de potência. Ninguém paga nada por ter essas lâmpadas instaladas em casa. Agora suponha que ambas são ligadas durante o mesmo tempo. Todos sabemos que quando ligadas as lâmpadas começam a consumir eletricidade e que isso vai para a conta de energia elétrica. Intuitivamente todos sabemos que a lâmpada de 100W produziu um consumo maior do que a de 40W.

A energia elétrica consumida pode então ser definida da seguinte maneira:

$$E = P \times t$$

Onde: E é a energia elétrica consumida em kWh, P é a potência em kW, t é o tempo em horas

Aqui cabe a seguinte pergunta: qual é o aparelho de uso residencial que produz mais consumo de energia ao longo do mês? A maioria das pessoas tende a dizer que é o chuveiro. Mas isso não está correto porque tudo vai depender de quantas horas cada aparelho foi utilizado. Assim, suponha essas duas situações:

- a) Um chuveiro de 5kW de potência é utilizado 10 horas por mês. Esse chuveiro Gasta $5 \times 10 = 50\text{kWh}$;
- b) Um televisor de 200W (0,2kW) é utilizado 10 horas por dia, totalizando 300 horas por mês. Esse televisor irá consumir $0,2 \times 300 = 60\text{kWh}$.

Nota-se que, mesmo que o televisor tenha uma potência menor, ele produziu um consumo maior em função do tempo de utilização.

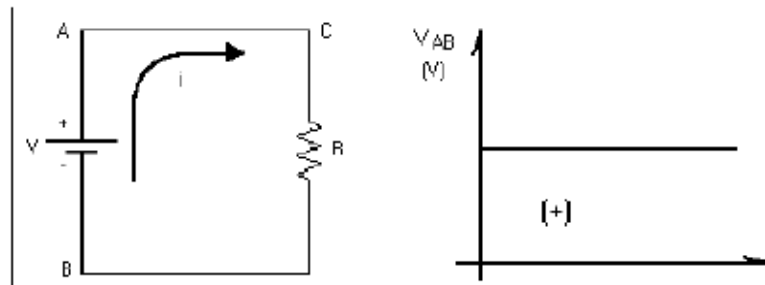
1.6. Tipos de corrente elétrica

Do ponto de vista de sentido de deslocamento há dois tipos de corrente elétrica:

a) Corrente contínua: a corrente elétrica flui sempre no mesmo sentido, ou seja nunca há inversão do sentido. Notar que qualquer corrente em que não há inversão de sentido é considerada contínua, não sendo necessário que apresente sempre o mesmo valor de tensão.

Como principais fontes decorrente contínua cita-se:

Baterias:



Geradores Rotativos:

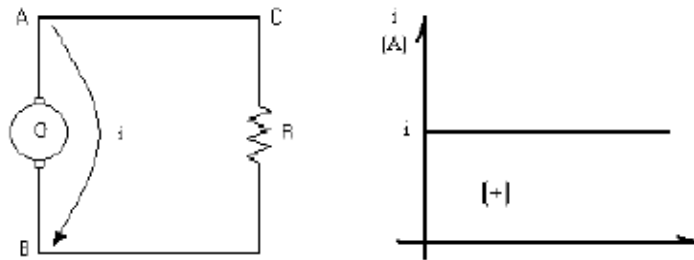


Figura 1.1: Geradores de corrente contínua

b) Corrente alternada: o sentido da corrente elétrica é invertido a cada meio ciclo. Geralmente, a corrente alternada é senoidal e produzida pelos alternadores, que são geradores de energia baseados em campos magnéticos.

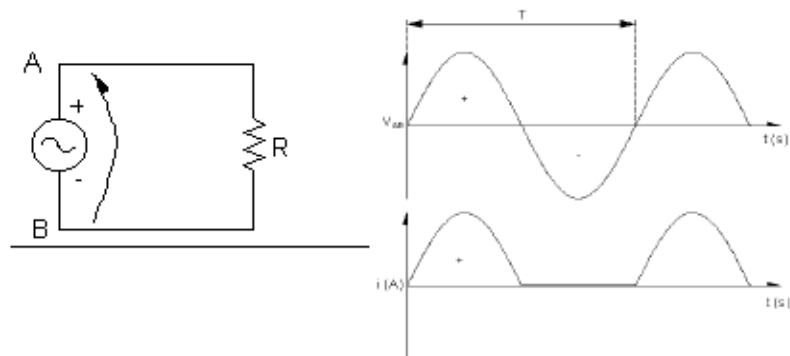


Figura 1.2: Geradores de corrente alternada

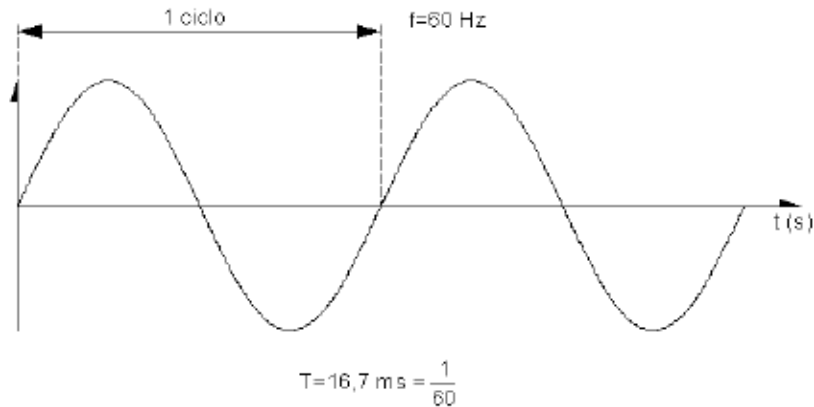


Figura 1.3: Onda senoidal

No caso da corrente contínua não há nenhuma dúvida quanto ao valor da tensão. Um bateria automotiva, por exemplo, possui uma tensão de 12Vcc. Esses 12 Vcc, se postos em um gráfico formam uma reta paralela ao eixo das abscissas.

Se a corrente for alternada, então, não se tem um valor fixo de tensão, pois esta pode variar desde um valor de pico positivo até um valor de pico negativo de mesmo valor absoluto do que o pico positivo.

Então o que significa dizer que uma determinada rede é de 127V ou de 220V se o valor da tensão darede varia desde um mínimo negativo até um máximo positivo?

A questão toda está relacionada à capacidade de realizar trabalho. Quando se passou a utilizar a corrente alternada em redes de distribuição foi necessário determinar qual deveria ser a amplitude da senoide, ou seja, quais deveriam ser os valores de pico desta senoide, para que se produzisse o mesmo trabalho que uma tensão contínua de determinada voltagem. Ou seja: se tivermos uma bateria automotiva com 12Vdc e ligarmos uma lâmpada apropriada para esta tensão, qual deve ser o valor de pico da senoide de corrente alternada para que a mesma lâmpada produza o mesmo brilho que produziu com corrente contínua?

Este problema foi solucionado com a determinação de uma nova grandeza elétrica relacionada a corrente alternada, chamada de *valor eficaz*, ou *valor RMS* da tensão.

O valor eficaz de uma tensão alternada é um valor que indica o equivalente em corrente contínua para a tensão alternada. Por exemplo, se uma tensão alternada possui um valor eficaz de 12Vca, então ela é equivalente a tensão de uma bateria automotiva de 12Vcc.

A fórmula matemática para determinar o valor eficaz de uma função é dada por:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t)^2 dt} \quad \text{onde:}$$

V_{ef} = Valor eficaz da função (ou valor RMS da função)

T = período da função

$f(t)$ = expressão matemática da função

Esta fórmula é genérica e é válida para qualquer função periódica com período T. No caso da senoide de tensão, a fórmula pode ser apresentada como sendo:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{\omega T} \int_0^{\omega T} (V_p \cdot \text{sen}(\omega t))^2 \cdot d\omega t} \quad \text{onde:}$$

V_{ef} = Valor eficaz da tensão

ωT = período (no caso de rede de 60Hz, $\omega T = 377 \text{ rad/s}$)

V_p = tensão de pico da senoide

Resolvendo essa equação chega-se a seguinte relação entre V_p e V_{ef} para uma onda senoidal (somente para onda senoidal. Outras formas de onda possuem diferentes relações entre o valor de pico e o valor eficaz):

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

Portanto, uma onda senoidal com valor eficaz de 220V, possui um valor de pico que varia de:

$$\pm 311 \text{ V}$$

Do ponto de vista intuitivo, o valor eficaz pode ser entendido como um rebatimento da parte negativa da onda senoidal, isto ocorre quando a tensão é elevada ao quadrado, seguido da busca de um valor médio obtido após o rebatimento da onda.

1.7. Lei de Ohm

Em certos materiais condutores a relação entre a tensão aplicada e a corrente que flui por ele, a uma dada temperatura, é constante. Neste caso diz-se que o condutor obedece a lei de Ohm, que pode ser formalizada pela equação:

$$k = V/I \quad (1.1)$$

A constante de proporcionalidade é conhecida como resistência e a equação acima pode ser reescrita como:

$$R = V/I \quad (1.2)$$

Assim, a lei de Ohm se baseia na relação linear entre a tensão e a corrente. Entretanto, uma resistência cujo valor não permanece constante é definida como uma *resistência não-linear* (filamento da lâmpada incandescente, por exemplo).

Resistência: é a propriedade de um material se opor ao fluxo de corrente elétrica e dissipar potência.

Resistor: um componente especificamente projetado para possuir resistência.

2. Redes monofásicas, bifásicas e trifásicas

As redes elétricas usuais podem ser monofásicas, bifásicas ou trifásicas. O critério para a utilização de cada um desses tipos de rede é:

- Carga instalada: geralmente cada concessionária permite uma carga máxima para redes monofásicas e bifásicas. Quando esta carga é ultrapassada, obrigatoriamente, o consumidor é atendido em rede trifásica.
- Carga bifásica ou trifásica na instalação: se houver uma única carga na instalação do cliente que necessite de rede bifásica ou trifásica, então o fornecimento será nessas modalidades, independente da carga total instalada.

A título de exemplo, no caso da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) são válidos os seguintes limites (segundo norma atual e para redes 220/380V):

Atendimento em rede	Disjuntor máximo (A)	Carga Instalada (W)
Monofásica	50	11000
Bifásica	50	25000
Trifásica	125	75000

Acima de 75000W de carga instalada o fornecimento será feito em tensão primária (subestação própria).

Nota: existem vários critérios descritos nas normas da concessionária que fazem com que, mesmo para cargas instaladas menores do que 75000W, seja utilizado o fornecimento em tensão primária.

2.1. Redes monofásicas

Estas redes possuem dois condutores: fase e neutro. O neutro pode ou não ser aterrado, de acordo com o tipo de sistema de aterramento utilizado. Aqui em Santa Catarina é adotado o padrão de neutro aterrado e a tensão entre fase e neutro é 220V. Outros estados possuem outros padrões de neutro e também de tensões. As cargas são sempre ligadas entre fase e neutro.

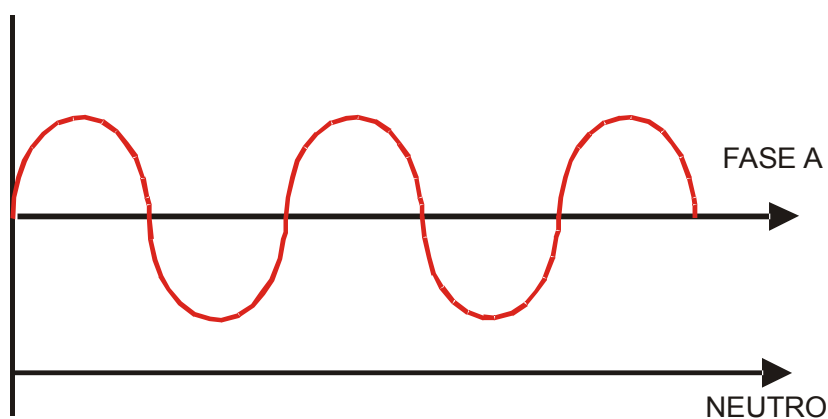


Figura 2.1: Formato da corrente elétrica em rede monofásica

2.2. Redes bifásicas

As redes bifásicas são similares às redes monofásicas. A diferença está no fato de que ao invés de se utilizar fase-neutro agora é utilizado fase-fase. Esse tipo de rede possui ampla utilização nos meios rurais porque

possibilita a ligação de motores de maior potência com um custo de instalação da rede relativamente baixo. As redes bifásicas são obtidas, geralmente, a partir de apenas uma fase da tensão primária e um transformador com tomada central aterrada. Em uma rede bifásica com neutro é sempre possível ter duas tensões: uma medida entre a fase e o neutro, neste caso é como se fosse uma tensão medida em rede monofásica. Outra tensão medida entre duas fases: neste caso a tensão é sempre o dobro da tensão medida entre fase e neutro, visto que a defasagem entre as duas fases é de 180 graus.

Em Santa Catarina as tensões bifásicas padronizadas são 220/440V. Já outros estados possuem o padrão 127/254V.

As figuras seguintes mostram como são as ondas das redes bifásicas e como o transformador é ligado a fim de obter as duas fases a partir de apenas uma fase de tensão primária.

Note que as duas ondas estão defasadas de 180 graus, logo, a tensão fase-fase é sempre o dobro da tensão fase-neutro.

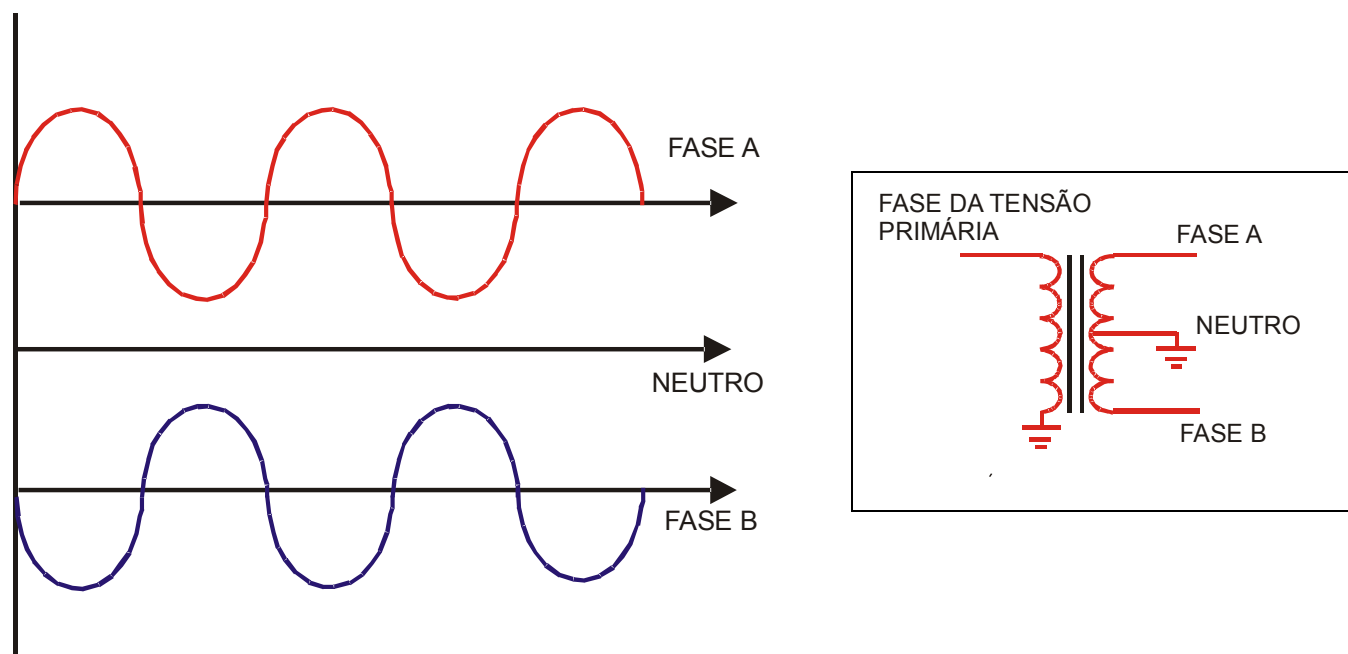


Figura 2.2: Formato da corrente elétrica em rede bifásica

2.3. Redes trifásicas

As ligações monofásicas e bifásicas são utilizadas em grande escala na iluminação, pequenos motores e eletrodomésticos. Nos níveis da geração, transmissão e utilização da energia elétrica para fins industriais utiliza-se quase que exclusivamente as ligações trifásicas.

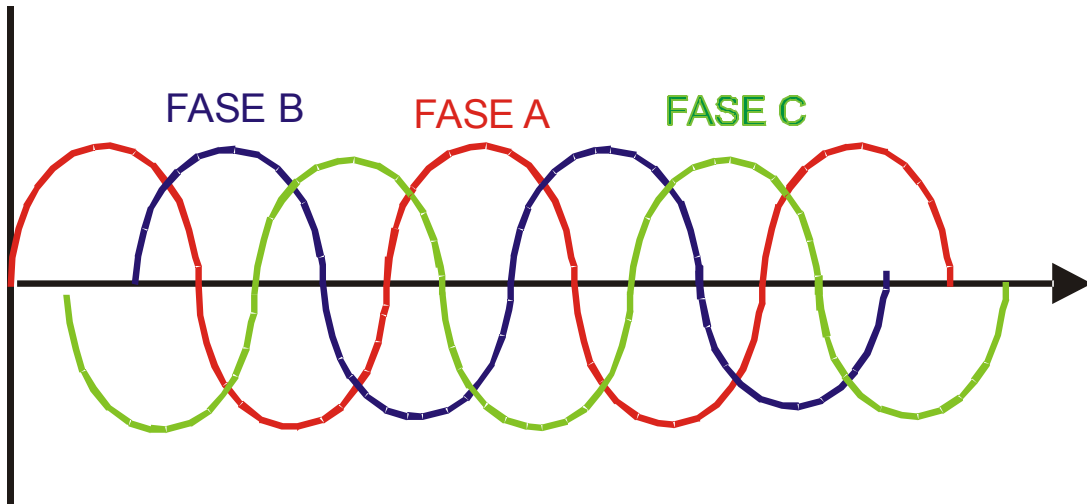


Figura 2.3: Formato da corrente elétrica em rede trifásica

Notar que a amplitude das fases é igual. O que ocorre é que os valores de pico são atingidos em pontos diferentes, ou seja, os sistemas trifásicos são, na verdade, três sistemas monofásicos, onde cada fase apresenta uma defasagem de 120° em relação a outra fase adjacente.

Em termos vetoriais, os sistemas trifásicos podem ser representados da seguinte maneira:

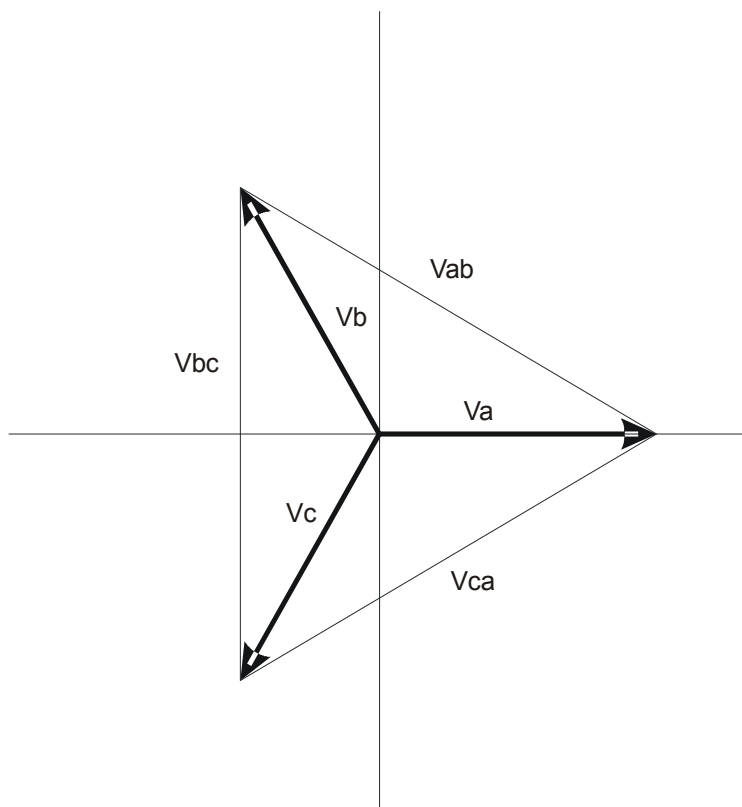


Figura 2.4: Esquema vetorial das redes trifásicas

Va, Vb e Vc são chamadas de tensões de fase porque são todas referidas a um ponto comum, chamado neutro. Em Santa Catarina $V_a=V_b=V_c=220V$.

Vab, Vbc e Vca são chamadas tensões de linha. Elas não possuem referência a um ponto comum, mas sim, entre duas fases. Em Santa Catarina $V_{ab}=V_{bc}=V_{ca}=380V$.

Notar que, para sistemas trifásicos balanceados com neutro, a relação entre tensões de fase e tensões de linha é sempre:

$$V_L = V_f \cdot \sqrt{3}$$

2.4. Tensões padronizadas no Brasil

De acordo com determinação da ANEEL as tensões secundárias no Brasil foram padronizadas em:

Sistemas monofásicos/trifásicos:

127/220V	Tensão de fase 127 volts e tensão de linha 220 volts
220/380V	Tensão de fase 220 volts e tensão de linha 380 volts

Sistemas monofásicos/bifásicos:

127/254V	Tensão de fase 127 volts e tensão de linha 254 volts
220/440V	Tensão de fase 220 volts e tensão de linha 440 volts

As tensões domiciliares monofásicas, quando não é de 220V é, geralmente, de 127V e não 110V como supõem a maioria dos consumidores.

A tensão de 220V é obtida do transformador trifásico de 380V, através da ligação fase-neutro, conforme a equação:

Tensão \div 1.73 (raiz de 3). Então: $380(\text{trifásica}) \div 1.73 = 220V$ (monofásica).

O mesmo ocorre com 127V.

Ela é obtida através de 220V: $220V(\text{trifásica}) \div 1.73 = 127V$ (monofásica).

Desde 1986 o governo tomou uma série de medidas visando padronizar as tensões da energia elétrica, padronizando os sistemas para 60 Hz e proibindo ampliações por parte das concessionárias de redes secundárias de 110, 115 e 120 volts ou outras tensões não padronizadas em uso na época. O DNAEE deu um prazo que terminou em Dezembro de 1999 para que as concessionárias substituam as redes despadronizadas como 110V, 115V e 120V, mas ainda restam algumas áreas servidas por estas tensões despadronizadas. As áreas abrangidas por estas últimas tensões estão se tornando raras, concentradas na área da antiga Eletropaulo, mas elas estão sendo substituídas para o sistema padrão de 127V ou 220V.

O governo através da fiscalização, vem coibindo gradativamente as vendas de aparelhos eletro-eletrônicos com entrada de 110V. Hoje não se encontra mais geladeiras, Freezer, lâmpadas e outros artigos para 110V. Se sua geladeira é nova, veja a etiqueta atrás da mesma.

As consequências em usar aparelhos de 110V em uma rede de 127V:

Exemplo:

Um aquecedor de 1.000W - 110V.

Segundo a lei de Ohm, este aparelho consome 1.000W em 110V por possuir uma resistência interna dinâmica de 12,1 Ohm conforme a fórmula:

$$V^2 / W = R$$

Sendo que: (V^2 =tensão ao quadrado) (W = Potência consumida) (R = Resistência em Ohm)

$$110 \times 110 = 12.100 - 12.100 / 1.000W = 12,1R$$

Ligando um aparelho de 12,1R em 127V este mesmo aparelho irá consumir:

$$127 \times 127V = 16.129 \quad 16.129 / 12,1R = 1.339W, \text{ correspondendo a uma sobrecarga de } 33,9\%, \text{ tendo a sua vida útil consideravelmente reduzida e sua conta de luz no final do mês aumentada.}$$

Em 1989 as tensões estavam distribuídas em 52% para 127V, 30% em 220V e o restante, 18% em tensões não padronizadas de 110V, 120V e 115V. Atualmente o percentual de tensões não padronizadas decaiu, mas ainda não acabou, conforme prevê a lei.

Variação máxima permitida nas redes elétricas:

VOLTAGENS SECUNDÁRIAS PADRONIZADAS NO BRASIL

Muitos clientes têm dúvidas a respeito das voltagens secundárias padronizadas adotadas no Brasil.

Nota: Voltagens secundárias são aquelas utilizadas pelos consumidores atendidos em baixa tensão, geralmente, consumidores residenciais e pequenos estabelecimentos industriais e comerciais.

De acordo com a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, que é o órgão responsável pela padronização das questões relacionadas à distribuição de energia elétrica no Brasil, as tensões secundárias devem estar de acordo com a tabela seguinte:

TENSÕES PADRONIZADAS NO BRASIL

TENSÃO NOMINAL		VARIÇÃO ADEQUADA DA TENSÃO (V)	
LIGAÇÃO	VOLTAGEM (V)	MÍNIMA	MÁXIMA
TRIFÁSICA	127/220	116	133
		201	231
	220/380	201	231
		348	396
MONOFÁSICA/ BIFÁSICA	127/254	116	132
		232	264
	220/440	201	229
		402	458

A ANEEL também prevê as três seguintes tensões não padronizadas de utilização restrita a algumas cidades do Brasil.

TENSÕES NÃO PADRONIZADAS NO BRASIL

TENSÃO NOMINAL		VARIÇÃO ADEQUADA DA TENSÃO (V)	
LIGAÇÃO	VOLTAGEM (V)	MÍNIMA	MÁXIMA
TRIFÁSICA	120/208	113	132
		196	229
MONOFÁSICA/ BIFÁSICA	115/230	108	127
		216	241
	120/240	108	127
		216	254

Nota: Os dados das tabelas podem ser encontrados na Portaria número 505 de 26/11/2001 editada pela ANEEL.

A ANEEL não prevê a existência de nenhum outro tipo de rede elétrica para distribuição secundária e nem de nenhuma variação adequada nas voltagens, além das apresentadas nas tabelas acima.

Figura 2.5: Voltagens padronizadas no Brasil e suas tolerâncias (Fonte: ANEEL)

3. O Sistema Elétrico Brasileiro

A eletricidade entrou no Brasil no final do século 19, através da concessão de privilégio para a exploração da iluminação pública, dada pelo Imperador D. Pedro II a Thomas Edison. Em 1930, a potência instalada no Brasil atingia a cerca de 350 MW, em usinas hoje consideradas como de pequena potência, pertencentes a indústrias e a Prefeituras Municipais, na maioria hidroelétricas operando a “fio d’água” ou com pequenos reservatórios de regularização diária. Em 1939, no Governo Vargas, foi criado o Conselho Nacional de Águas e Energia, órgão de regulamentação e fiscalização, mais tarde substituído pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE- subordinado ao Ministério de Minas e Energia. A primeira metade do século 20 representa a fase de afirmação da geração de eletricidade como atividade de importância econômica e estratégica para o País.

A partir do fim da Segunda Guerra Mundial, o Sistema Elétrico ganhou impulso com a construção da primeira grande usina, a de Paulo Afonso I, com a potência de 180 MW, seguida pelas usinas de Furnas, Três Marias e outras, com grandes reservatórios de regularização plurianual. No final da década de 60, foi criado o Grupo de Coordenação de Operação Interligada, tomando corpo o sistema nacional interligado.

Nos seus 100 anos de existência, o Sistema Elétrico Brasileiro, predominantemente hídrico, gerou cerca de 5.000 TWh, quantidade de energia que, na geração exclusivamente térmica, corresponde a mais da metade da reserva brasileira de petróleo, avaliada em 20 bilhões de barris. Nesse século, o Sistema passou por períodos com diferentes taxas de crescimento, decorrentes ora do regime hidrológico, ora de dificuldades econômicas. A interpretação da trajetória histórica do Sistema permitiria discriminar os efeitos atribuíveis à sua interação com outros setores (o econômico, o petrolífero, o ambiental, etc...) e os problemas inerentes a ele, de forma a se projetar com maior segurança a evolução futura, em especial sua participação no parque gerador após a instalação das termoeletricas a gás natural. Na descrição que se segue, usamos dados do Balanço Energético Nacional, elaborado desde 1974 e contendo séries históricas iniciadas no ano de 1970, complementados por dados de outras fontes quando necessário. A projeção focaliza principalmente a potência instalada que, por sua inércia, determinada pelo tempo relativamente longo de maturação e implementação dos aproveitamentos, é uma função relativamente “lisa” do tempo, e a geração efetiva (energia firme) ou fator de capacidade para examinar os transientes.

A figura seguinte mostra, de forma aproximada, a distribuição das fontes de energia elétrica no Brasil no ano de 2009.

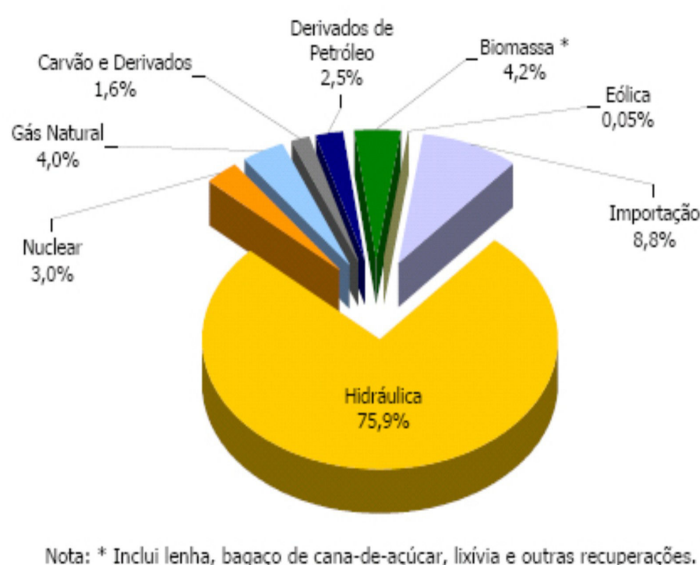


Figura 3.1 – Distribuição das fontes de eletricidade no Brasil em 2009 (Fonte: ANEEL)

3.1. Potência instalada.

Os dados anteriores a 1970 constam nos registros do DNAEE e em trabalhos de consultores e de pesquisadores; o gráfico 1 abaixo resume os dados utilizados.

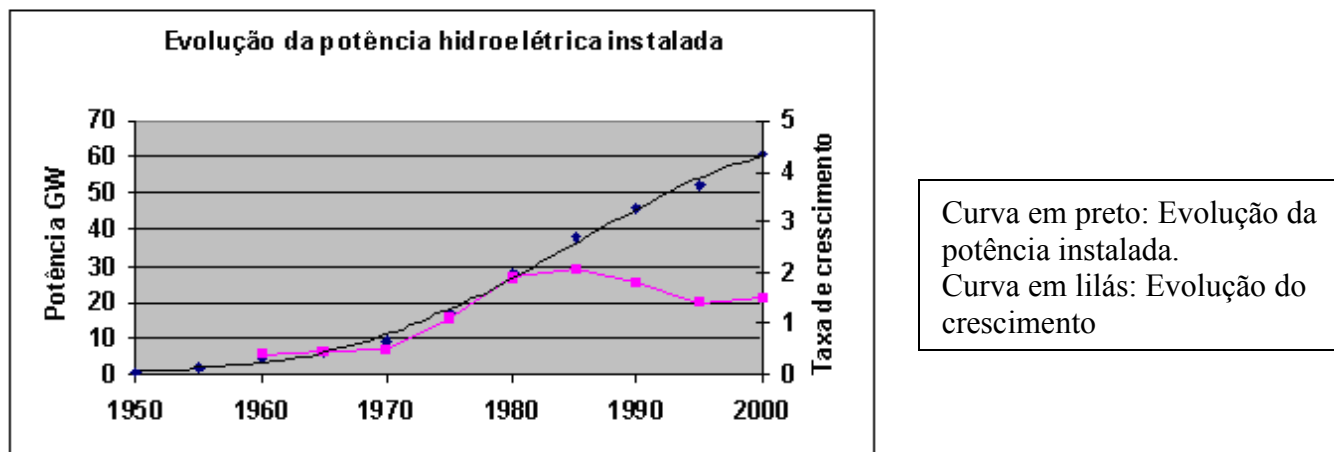


Gráfico 3.1 – Evolução da potência hidroelétrica instalada.

A curva de taxa de crescimento, com a forma clássica de sino, sugere que a potência instalada tende a alcançar um valor máximo inferior ao potencial hídrico inventariado e estimado, de 260 GW, denotando a existência de um fator de resistência ao crescimento do sistema. O estudo detalhado, segundo a metodologia descrita na Nota Técnica “Prospecção Tecnológica” - SECT mostrou o limite de cerca de 66 GW (gráfico 2). Outros exercícios da mesma natureza, usando dados de outros intervalos de tempo e outras técnicas de agrupamento, deram resultados variando entre 70 e 120 GW, o que mostra a dependência do resultado ao método específico de tratamento. Porém, todos eles indicam a existência de um limite entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ do potencial registrado. É interessante observar que em outros países e regiões de extensão territorial comparável à do Brasil o potencial hídrico também não foi completamente aproveitado. Na Região Sudeste, já existem poucos locais propícios ao aproveitamento para a geração de eletricidade.

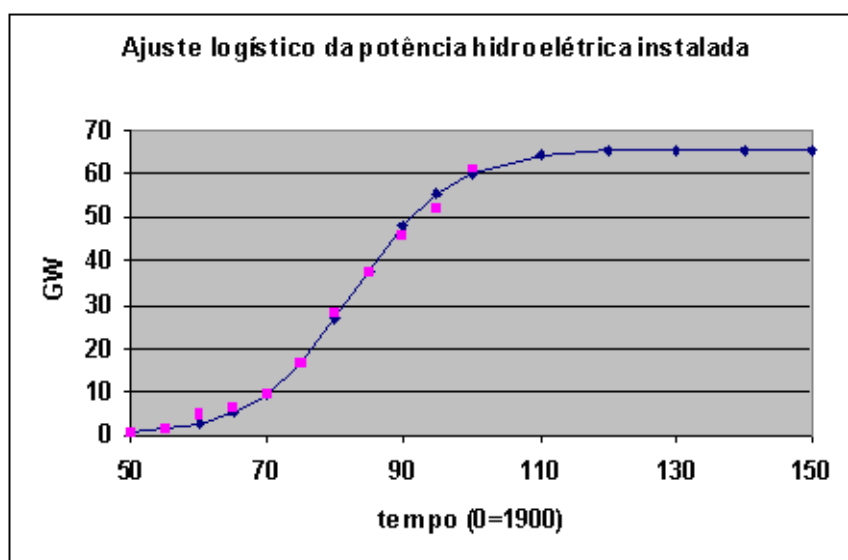


Gráfico 3.2 - Potência hidroelétrica instalada.

Ajuste $y=65,5/(1+105 e^{-0,139 t})$. A escala de tempo tem o zero em 1900.

A metodologia de projeção, baseada na Teoria de Sistemas, é fenomenológica e, portanto, não identifica a natureza dos fenômenos que condicionam a evolução do sistema, que teriam que ser investigados por outros métodos. No caso presente, esses fatores podem ser de natureza econômica (custo de geração, p. ex.), social (preferência por outros modos de uso da terra e da água, reserva de território para populações indígenas) ou ambiental (prevenção da propagação de endemias).

De qualquer forma, a importância da geração hidroelétrica para o Brasil justifica os esforços para esclarecer a questão. Nesta primeira abordagem, o tema estudado é o custo de geração que poderia estar propiciando a substituição gradual da geração hídrica pela térmica, como aconteceu nos outros países citados. Entretanto, as características do território brasileiro, de grande área e cortado por uma verdadeira nervura de rios de grande vazão, induzem a consideração de outros fatores a serem considerados em outros trabalhos.

3.2. Geração pelo Sistema Hidroelétrico.

Os dados sobre a geração de eletricidade estão relacionados com os de potência instalada através do fator de capacidade, definido como a razão da quantidade gerada para a quantidade máxima possível, suposto que as usinas funcionassem durante todo o tempo à potência máxima.

Episódios de queda expressiva da geração são relativamente raros, tendo-se conhecimento da queda da década de 50, causada por regime hidrológico severamente desfavorável, e a recente crise de 2001, causada pela conjunção de regime hidrológico moderadamente desfavorável com o aumento da demanda devido ao crescimento da atividade econômica, com a restrição ao investimento em novos empreendimentos e também com o transiente de implantação do novo modelo de gestão do Setor.

Desde a crise de geração da década de 50, o sistema foi concebido para operar com fator de capacidade adequado à garantia do fornecimento de energia elétrica, existindo, pois, certa latitude para a exploração da potência instalada que tem sido usada para acomodar transientes de oferta e de demanda. O gráfico 3, a seguir ilustra o uso dessa folga.

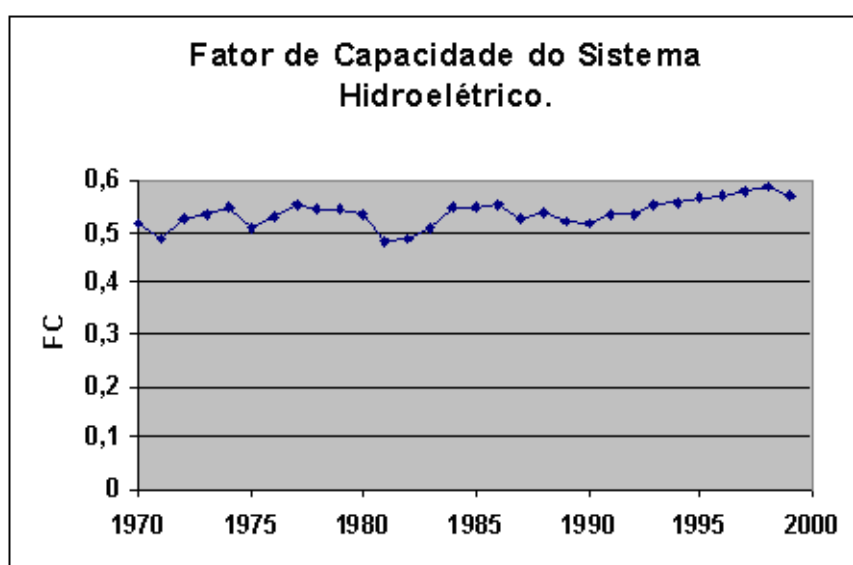


Gráfico 3.3 – Fator de capacidade do Sistema Hidroelétrico.

Observa-se que, até o início do Plano Real, o fator de capacidade manteve-se abaixo de 0,56, o que induz a atribuir-se ao abuso desse mecanismo de ajuste o recente racionamento de eletricidade.

3.3. Mapa do sistema elétrico brasileiro (2007)

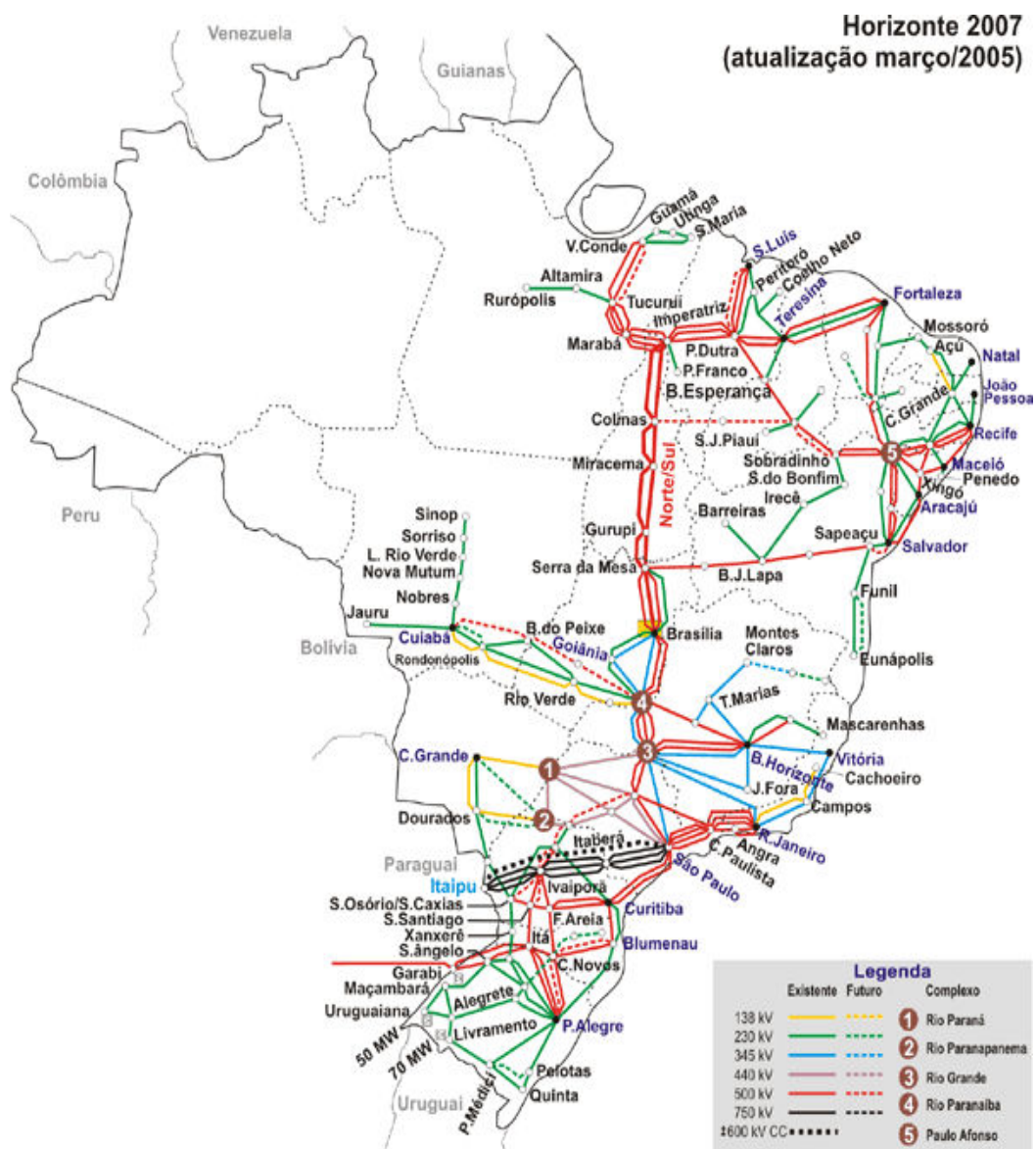


Figura 3.2 - Mapa do sistema elétrico brasileiro em 2007 (Fonte ANEEL)

4. Estrutura básica dos sistemas elétricos de potência

Do ponto de vista estrutural os sistemas elétricos de potência são praticamente iguais em qualquer parte do mundo. O sistema, desde a geração até o consumidor pode ser dividido em 3 partes: geração – transmissão – distribuição. As figuras 4.1 e 4.2 mostram um esquema básico de um sistema elétrico.

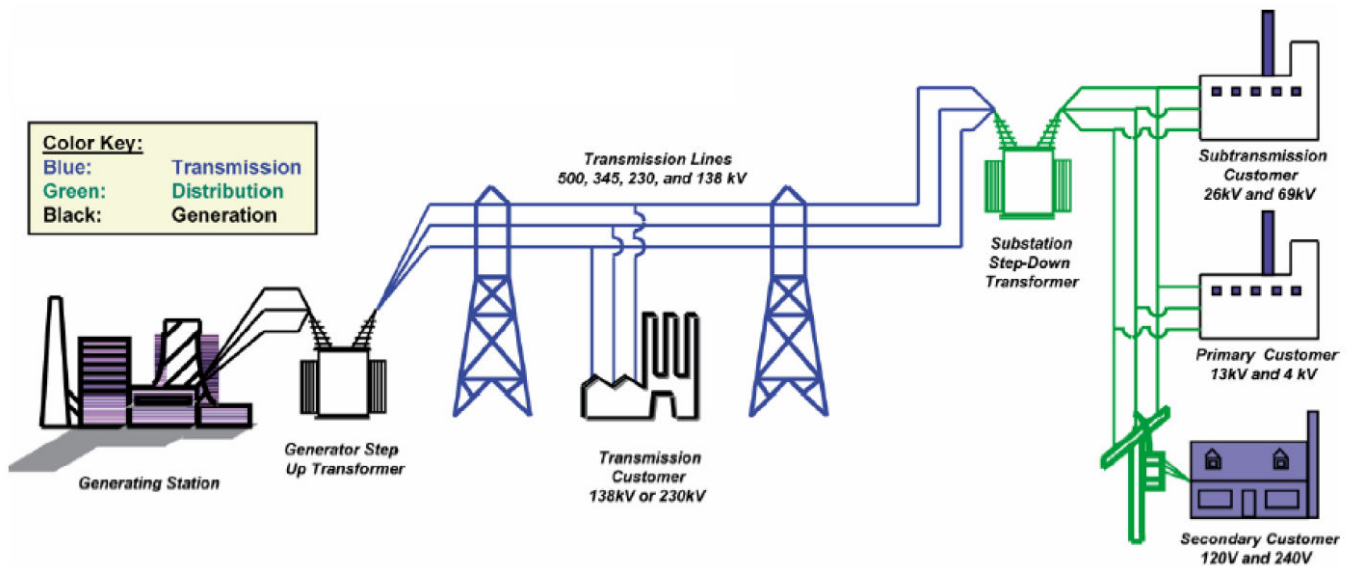


Figura 4.1: Sistema elétrico de potência (Fonte: Leão, Ruth – Geração e distribuição de energia elétrica no Brasil)

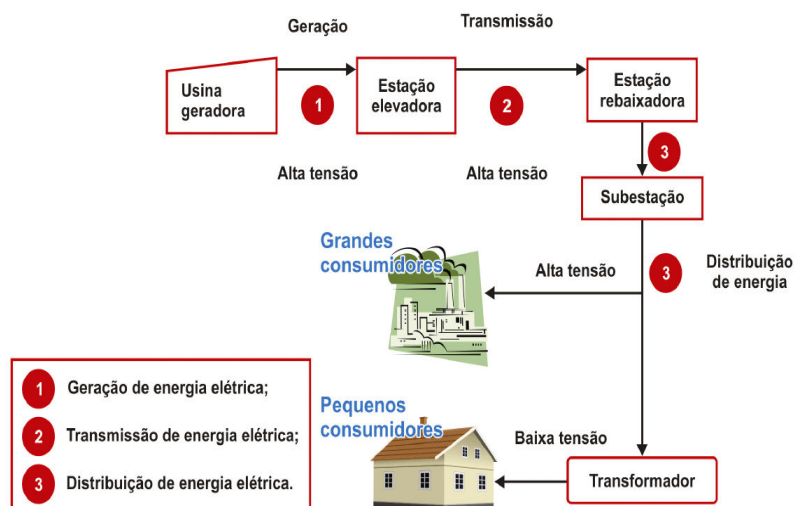


Figura 4.2: Sistema elétrico de potência e sua distribuição

Do ponto de vista esquemático a figura 4.3 mostra uma clássica distribuição de um sistema elétrico.

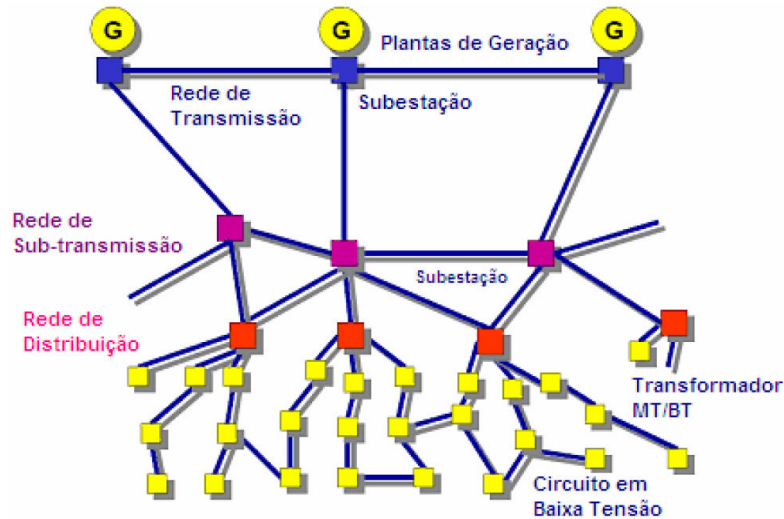


Figura 4.3: Esquemático de um sistema elétrico de potência
(Fonte: Leão, Ruth – Geração e distribuição de energia elétrica no Brasil)

4.1. Geração de Energia Elétrica

Na geração de energia elétrica uma tensão alternada é produzida, a qual é expressa por uma onda senoidal, com frequência fixa e amplitude que varia conforme a modalidade do atendimento em baixa, média ou alta tensão, porém, a tensão gerada, em geral, não é suficientemente alta para tornar econômica a distribuição, por isso, logo na saída dos geradores há uma sub estação cuja finalidade é elevar os níveis de tensão de modo a tornar mais prática e econômica a distribuição da eletricidade. Após a sub estação a onda de eletricidade propaga-se pelo sistema elétrico mantendo a frequência constante e modificando a amplitude à medida que passa por transformadores. Os consumidores conectam-se ao sistema elétrico e recebem o produto e o serviço de energia elétrica.

Segundo dados da ANEEL, os maiores agentes geradores de eletricidade no Brasil estão mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Maiores geradores de energia elétrica no Brasil (Fonte: ANEEL)

4.2 Rede de Transmissão

A rede de transmissão liga as grandes usinas de geração às áreas de grande consumo. Em geral apenas poucos consumidores com um alto consumo de energia elétrica são conectados às redes de transmissão onde predomina a estrutura de linhas aéreas. A segurança é um aspecto fundamental para as redes de transmissão. Qualquer falta neste nível pode levar a descontinuidade de suprimento para um grande número de consumidores. A energia elétrica é permanentemente monitorada e gerenciada por um centro de controle. O

nível de tensão depende do país, mas normalmente o nível de tensão estabelecido está entre 220 kV e 765 kV.

De acordo com dados da ABRATE (Associação Brasileira de Transmissores de Eletricidade), as maiores companhias de transmissão estão mostradas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Maiores transmissores de energia elétrica do Brasil (Fonte: ABRATE)

Nº	Agentes do Setor	Potência Instalada (kW)
1º	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco CHESF	10.618.327
2º	Furnas Centrais Elétricas S/A. FURNAS	9.456.900
3º	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A. ELETRONORTE	9.256.933,10
4º	Companhia Energética de São Paulo CESP	7.455.300
5º	Itaipu Binacional ITAIPU	7.000.000
6º	Tractebel Energia S/ATRACTEBEL	6.965.350
7º	CEMIG Geração e Transmissão S/A CEMIG-GT	6.782.134
8º	Petróleo Brasileiro S/APETROBRÁS	4.832.276,60
9º	Copel Geração e Transmissão S.A.COPEL-GT	4.544.914
10º	AES Tietê S/AAES TIETÊ	2.645.050

4.3 Rede de Sub-Transmissão

A rede de sub-transmissão recebe energia da rede de transmissão com objetivo de transportar energia elétrica a pequenas cidades ou importantes consumidores industriais. O nível de tensão está entre 35 kV e 160 kV. Em geral, o arranjo das redes de sub-transmissão é em anel para aumentar a segurança do sistema. A estrutura dessas redes é em geral em linhas aéreas, por vezes cabos subterrâneos próximos a centros urbanos fazem parte da rede. A permissão para novas linhas aéreas está cada vez mais demorada devido ao grande número de estudos de impacto ambiental e oposição social. Como resultado, é cada vez mais difícil e caro para as redes de sub-transmissão alcançar áreas de alta densidade populacional. Os sistemas de proteção são do mesmo tipo daqueles usados para as redes de transmissão e o controle é regional.

4.4 Redes de Distribuição

As redes de distribuição alimentam consumidores industriais de médio e pequeno porte, consumidores comerciais e de serviços e consumidores residenciais. Os níveis de tensão de distribuição são assim classificados segundo o Programa de Distribuição Brasileiro (Prodist):

- Alta tensão de distribuição (AT): tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou superior a 69kV e inferior a 230kV.
- Média tensão de distribuição (MT): tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 1kV e inferior a 69kV.
- Baixa tensão de distribuição (BT): tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 1kV.

De acordo com a Resolução No456/2000 da ANEEL e o módulo 3 do Prodist, a tensão de fornecimento para a unidade consumidora se dará de acordo com a potência instalada:

- Tensão secundária de distribuição inferior a 2,3kV: quando a carga instalada na unidade consumidora for igual ou inferior a 75 kW;
- Tensão primária de distribuição inferior a 69 kV: quando a carga instalada na unidade consumidora for superior a 75 kW e a demanda contratada ou estimada pelo interessado, para o fornecimento, for igual ou inferior a 2.500 kW;
- Tensão primária de distribuição igual ou superior a 69 kV: quando a demanda contratada ou estimada pelo interessado, para o fornecimento, for superior a 2.500 kW.

As tensões de conexão padronizadas para AT e MT são: 138 kV (AT), 69 kV (AT), 34,5 kV (MT) e 13,8 kV (MT). O setor terciário, tais como hospitais, edifícios administrativos, pequenas indústrias, etc, são os principais usuários da rede MT.

A rede BT representa o nível final na estrutura de um sistema de potência. Um grande número de consumidores, setor residencial, é atendido pelas redes em BT. Tais redes são em geral operadas manualmente.

Para finalizar, a figura 4.4 mostra um diagrama de um sistema elétrico de potência com os seus vários níveis de tensão.

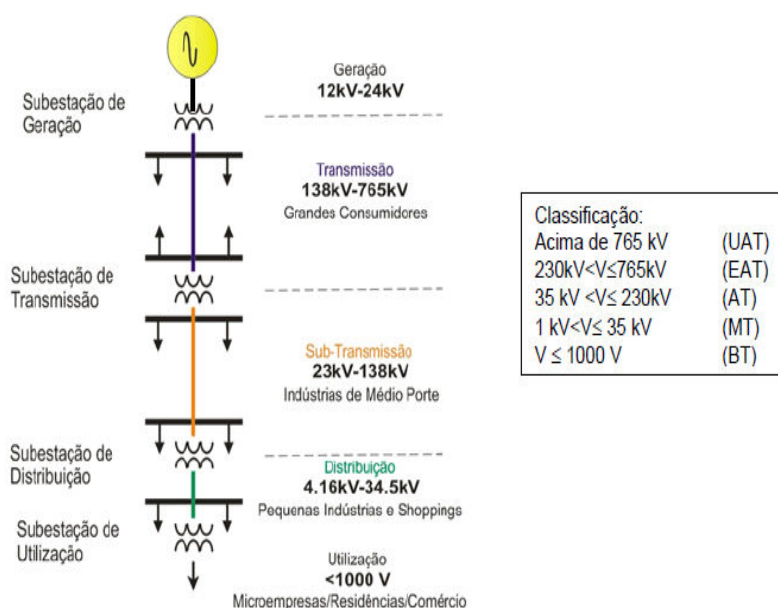


Figura 4.4: Sistema elétrico com os seus níveis de tensão
(Fonte: Leão, Ruth – Geração e distribuição de energia elétrica no Brasil)

A tabela 4.3 mostra as maiores companhias de distribuição de eletricidade do Brasil.

Tabela 4.3: Maiores distribuidores de eletricidade do Brasil (Fonte: ABRATE)

Nº	Empresa	Consumo em GWh
1º	Eletropaulo	32.548
2º	Cemig	20.693
3º	CPFL	18.866
4º	Copel	18.523
5º	Light	18.235
6º	Celesc	13.829
7º	Coelba	11.403
8º	Elektro	10.055
9º	Celpe	8.171
10º	Piratininga	8.015

5. Estrutura básica dos sistemas elétricos dos consumidores

No capítulo anterior vimos como a energia elétrica sai das estações geradoras e chega até os pontos de entrega (consumidores finais). Agora vamos apresentar uma breve análise do que acontece com a energia elétrica nas unidades consumidoras básicas (indústrias, comércio, residências, etc).

Em geral todas as concessionárias dividem os consumidores em classes, de acordo com a previsão de consumo.

5.1. Consumidores atendidos em baixa tensão

Cada concessionária tem suas regras básicas para classificação dos consumidores. Aqui serão sempre consideradas as normas vigentes da CELESC.

Os consumidores podem ser atendidos em baixa tensão (127V ou 220V) na modalidade monofásica, bifásica ou trifásica. O critério básico para determinar se um consumidor irá receber uma, duas ou três fases é a carga instalada, porém, havendo apenas uma carga que necessite alimentação bi ou trifásica a instalação passa a ser nestas modalidades independente da carga instalada.

As regras básicas da CELESC para atendimento são as seguintes:

Carga Instalada (kW)	Tipo de rede
Até 11kW	Monofásica em baixa tensão
De 11kW até 22kW	Bifásica em baixa tensão
De 22kW até 75kW	Trifásica em baixa tensão
Acima de 75kW	Atendimento em Alta tensão

Nota: existem várias exceções que obrigam o consumidor a mudar para atendimento em alta tensão mesmo com carga menor do que 75kW. Ver norma específica da concessionária.

5.2. Consumidores atendidos em alta tensão

Todos os consumidores que não se enquadram no item 5.1 são atendidos em alta tensão. Essa alta tensão é variável de concessionária para concessionária e na mesma concessionária pode haver mais de uma alta tensão para abastecer grandes consumidores.

Ser atendido em alta tensão tem vantagens e desvantagens, dentre as quais podemos citar:

Vantagens:

- Custo do kWh mais barato
- Maior estabilidade na tensão de abastecimento
- Maior confiabilidade (há menos desligamentos nas redes de alta tensão)

Desvantagens:

- Custo inicial da implantação da subestação relativamente elevado
- Necessidade de contrato de demanda o que implica em maior controle no consumo
- Valores mínimos de consumo previamente contratados e cobrados independente de ter ocorrido o consumo ou não.

No capítulo referente ao faturamento da energia elétrica serão analisados com mais profundidade as implicações da alimentação em baixa tensão ou em alta tensão.

5.2. Distribuição interna dos clientes

A partir da medição a responsabilidade pela administração, distribuição e utilização da energia elétrica passa a ser do cliente. É muito difícil, porém não impossível, que a partir da medição a concessionária intervenha em qualquer questão relacionada à utilização da energia elétrica.

Em geral os sistemas internos (do cliente) de distribuição de energia elétrica seguem sempre uma mesma filosofia de montagem: parte-se de um disjuntor geral e, em seguida, são instalados os diversos centros de distribuição em cada setor de utilização, sempre levando em conta a questão do sincronismo das proteções, ou seja, a proteção posterior a uma outra deve sempre ter o seu valor de disparo mais baixo, de modo que, em caso de anormalidade, somente uma parte do circuito é desligada.

A figura seguinte mostra uma seção de uma instalação elétrica do consumidor. A energia entra pelo barramento geral e se distribui ao longo da instalação até chegar a CARGA. Do ponto de vista de proteções este circuito está bem distribuído, visto que o primeiro disjuntor trifásico é de 60A, o segundo é de 40A e o terceiro é de 30A. Se houver algum problema na CARGA, o disjuntor de 30A desarma antes do que os outros dois, o que é o correto.

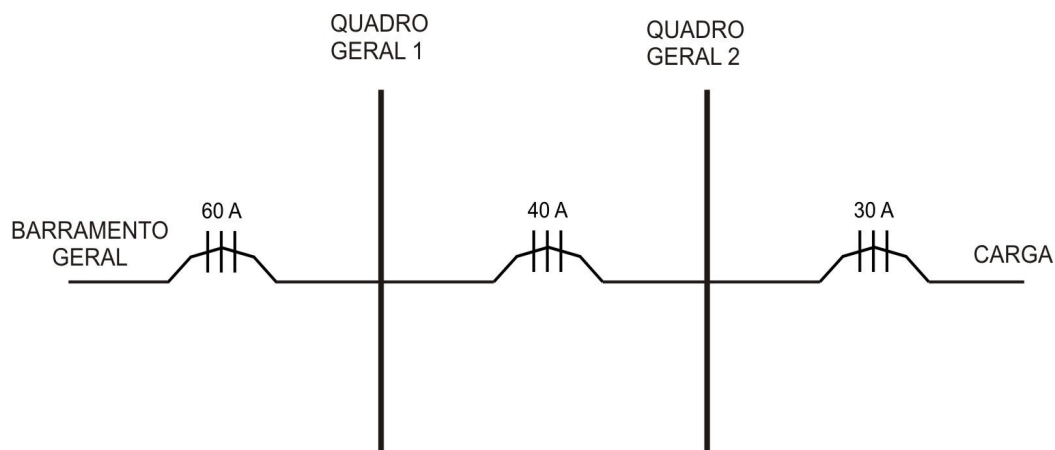


Figura 5.1: Exemplo de sincronismo de proteções correto

A mesma parte da instalação do consumidor é mostrada abaixo. Note que o terceiro disjuntor, que era de 30A foi trocado por um de 50A. Agora se houver um problema na CARGA o disjuntor de 40A desarma antes do que o de 50A. Isso não é correto porque o disjuntor de 40A pode estar alimentando outras partes da instalação e se desarme implica na parada de toda a parte da instalação ligada a esse disjuntor.

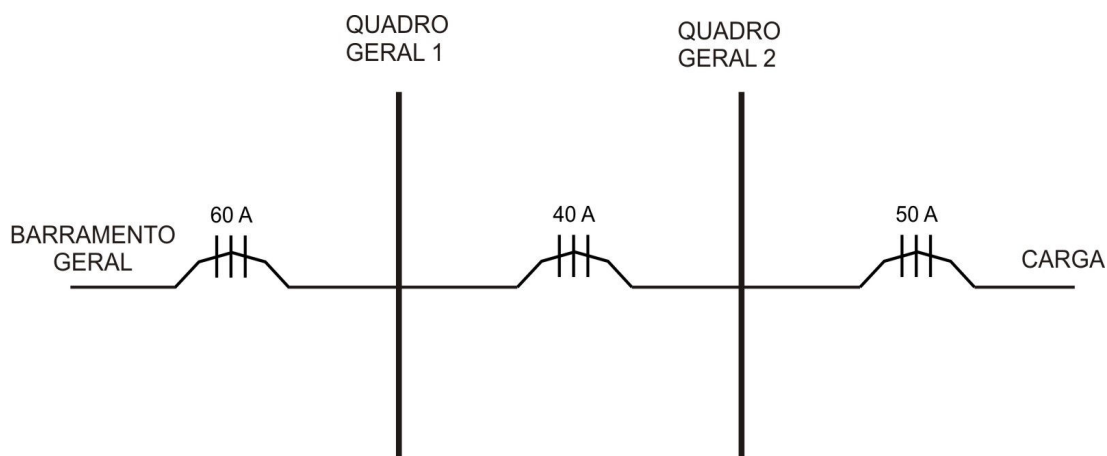


Figura 5.2: Exemplo de sincronismo de proteções incorreto

Na figura seguinte é mostrada parte de uma instalação elétrica de um consumidor onde se pode notar o correto sincronismo dos disjuntores.

O primeiro disjuntor é um trifásico de 150A. Os disjuntores de grupo de circuitos são bem menores do que o geral. Finalmente os disjuntores individuais de cada grupo são de amperagem menor do que o geral. Assim qualquer problema em um circuito específico irá desarmar o disjuntor do circuito, deixando o restante da instalação em funcionamento normal.

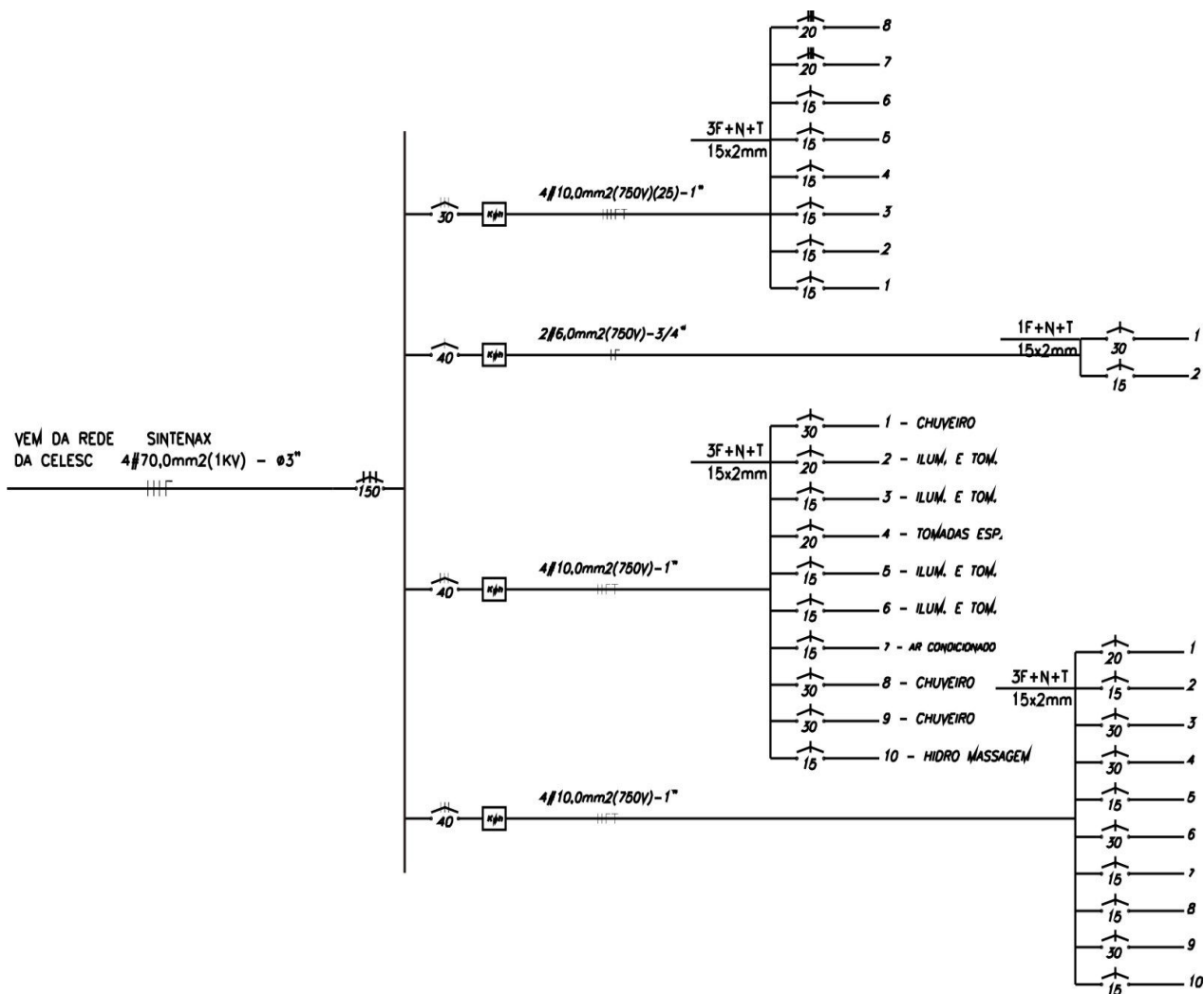


Figura 5.3: Parte de uma instalação elétrica de consumidor com sincronismo de proteções correto

6. Configurações de redes elétricas e seus aterramentos

As redes elétricas, tanto de distribuição das concessionárias como as particulares podem possuir várias configurações. Na sequência apresentam-se os tipos mais comuns, especialmente para redes trifásicas, visto que estas são as mais utilizadas na indústria

Na Classificação dos tipos de redes e seus aterramentos tem-se sempre duas ou três letras.

A primeira letra indica a situação da alimentação em relação à terra.

T – para um ponto diretamente aterrado;

I – isolamento de todas as partes vivas em relação à terra ou emprego de uma impedância de aterramento, a fim de limitar a corrente de curto-circuito para a terra;

A segunda letra indica a situação das massas (partes metálicas das máquinas) em relação à terra.

T – para massas diretamente aterradas, independentemente de aterramento eventual de um ponto de alimentação;

N – massas diretamente ligadas ao ponto de alimentação aterrado (normalmente o ponto neutro);

Outras letras (eventualmente), para indicar a disposição do condutor neutro e do condutor de proteção.

S – quando as funções de neutro e de condutor de proteção são realizadas por condutores distintos;

C – quando as funções de neutro e de condutor de proteção são combinadas num único condutor (chamado de PEN)

6.1. Sistema TN-S

Sistema em que o neutro é aterrado logo na entrada, e levado até a carga. Paralelamente, outro condutor identificado como PE (Condutor de Proteção) é utilizado como fio terra, e é conectado à carcaça (massa) dos equipamentos. Este sistema deve ser utilizado em casos que, por razões operacionais e estruturais do local, não seja possível o sistema TT.

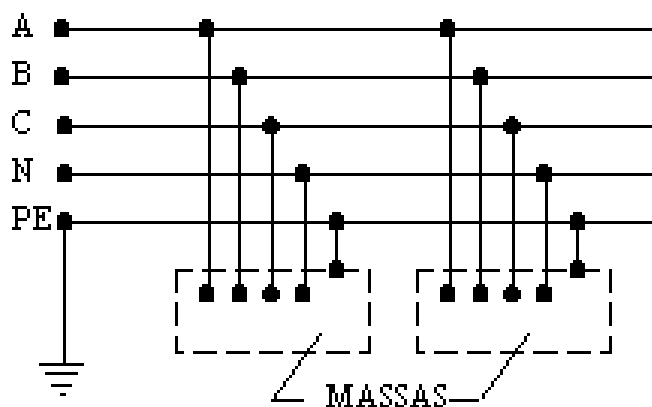
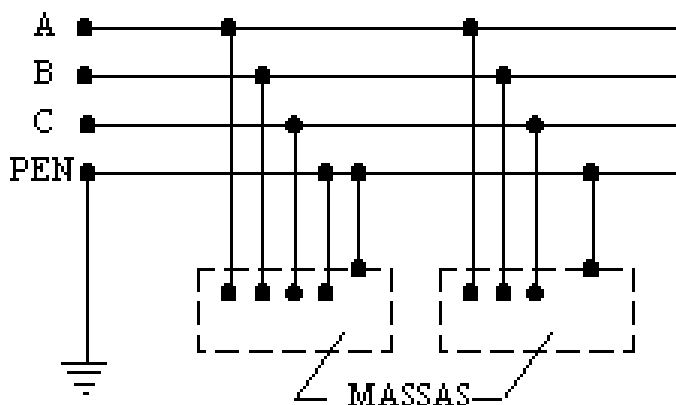


Figura 6.1: Rede TN-S

6.2. Sistema TN-C

Sistema que, embora normalizado, não é aconselhável, pois o fio terra e o neutro são constituídos pelo mesmo condutor. Desta vez, sua identificação passa a ser PEN (Condutor de proteção e neutro). Neste esquema, após o neutro ser aterrado na entrada, ele próprio é ligado ao neutro e à massa do equipamento.

Este sistema deve ser escolhido somente em último caso quando realmente for impossível estabelecer qualquer um dos outros sistemas.



6.3. Sistema TT

Esse é o sistema mais eficiente de todos. Nele o neutro é aterrado logo na entrada e segue (como neutro) até a carga (equipamento). A massa do equipamento é aterrada com uma haste própria, independente da haste de aterramento do neutro.

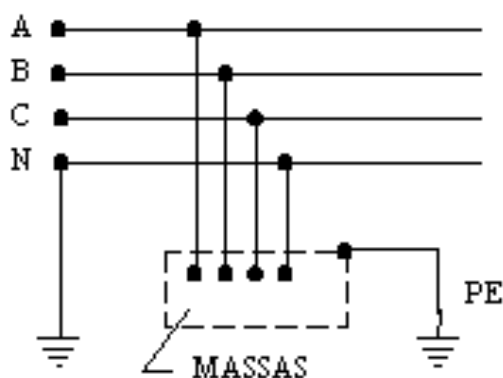


Figura 6.3: Rede TT

6.4. Sistema TT-C-S

Sistema em que temos o condutor neutro e o condutor terra, independentes em parte do sistema e combinados em um só, antes da ligação ao eletrodo de terra.

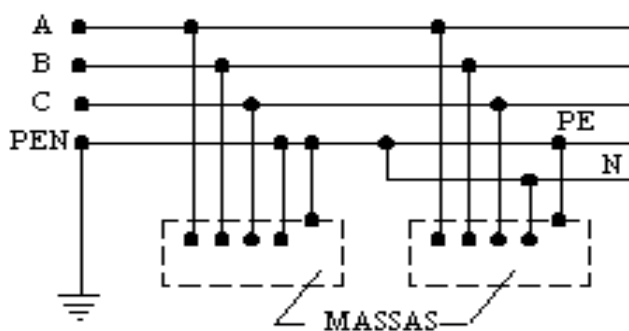


Figura 6.4: Rede TT-C-S

6.5. Sistema IT

Sistema em não há condutor de alimentação diretamente aterrado, e sim, através de um dispositivo limitador de corrente de curto-circuito para a terra (impedância de aterramento).

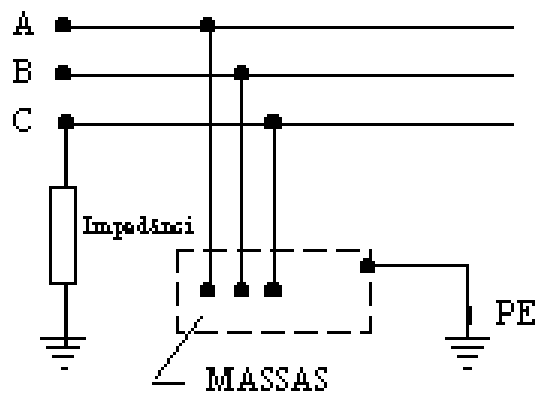


Figura 6.5: Rede IT

Quanto as tensões, em qualquer sistema é possível ter-se 440V, 380V, 220V, 127V e 110V como as mais comuns e também são possíveis outras tensões diferentes das apresentadas.

7. Tipos de cargas elétricas

Apesar de toda a variedade de cargas elétricas que parecem existir nas redes usuais, basicamente, todas essas cargas podem ser agrupadas em dois tipos:

- Carga resistiva
- Carga reativa

As cargas reativas podem ser do tipo indutivas ou capacitivas, porém o efeito final de uma carga reativa será sempre daquele que predominar (indução ou capacitância).

7.1. Cargas resistivas

As cargas resistivas são basicamente as utilizadas para aquecimento e iluminação incandescente. Se for feito um gráfico de tensão corrente e resistência para este tipo de carga tem-se a seguinte configuração:

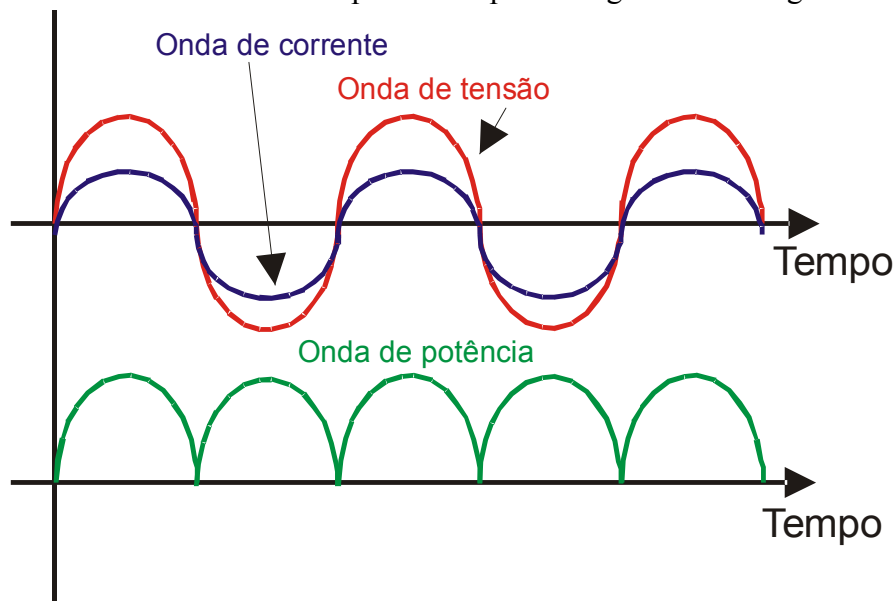


Figura 7.1: Onda de corrente e de tensão em cargas resistivas puras

Observe que as ondas de tensão e de corrente estão sempre em fase, ou seja, se a tensão está no semicírculo positivo a corrente também está neste semicírculo.

A potência elétrica consumida por uma carga resistiva é expressa pela fórmula:

$$P = V \times I$$

Observe que os sinais de V e I são sempre iguais, ou ambos negativos, ou ambos positivos, assim a potência será sempre um número positivo. Potência positiva significa potência enviada pela fonte à carga.

Assim, para cargas resistivas, a potência sempre se desloca da fonte para a carga.

7.1.1. Resistências elétricas de uso industrial

As resistências elétricas de uso industrial, geralmente utilizadas em processos de aquecimento (líquidos, gases, etc) possuem tamanhos e potências bastante grandes. O dimensionamento dessas resistências é bastante complexo e envolve vários parâmetros mecânicos que não vem ao caso no nosso curso.



Figura 7.2: Formatos de resistores de uso industrial

A título de exemplo, uma resistência industrial comum é a aletada, como mostrado abaixo. Suponhas que essa resistência seja utilizada para aquecer o ar dentro de uma tubulação de ar quente. O processo de dimensionamento é mostrado na sequência



Figura 7.3: Resistência industrial aletada

O gráfico abaixo mostra a capacidade de dissipação em W/cm^2 para as diferentes velocidades do ar dentro da tubulação e diferentes temperaturas finais exigidas.

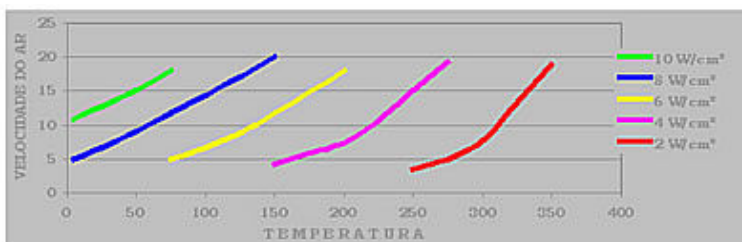


Figura 7.4: Capacidade de dissipação em resistores industriais

Observe abaixo a potência máxima dissipada para os vários comprimentos

Tabela 7.1: Potência dissipada em resistores industriais

COMPRIME NTO	DISSIPACÃO						
	4W/cm2	5W/cm2	6W/cm2	7W/cm2	8W/cm2	9W/cm2	10W/cm2
250 mm	200	250	300	350	400	460	510
300 mm	270	340	410	480	550	620	690
350 mm	350	430	520	610	690	780	870
400 mm	420	520	630	730	840	940	1050
450 mm	490	610	740	860	980	1110	1230
500 mm	560	700	850	990	1130	1270	1410
550 mm	640	790	950	1110	1270	1430	1590
600 mm	710	890	1060	1240	1420	1590	1770
650 mm	780	980	1170	1370	1560	1760	1950
700 mm	850	1070	1280	1490	1710	1920	2130
750 mm	920	1160	1390	1620	1850	2080	2310
800 mm	1000	1250	1500	1740	1990	2240	2490
850 mm	1070	1340	1600	1870	2140	2410	2670
900 mm	1140	1430	1710	2000	2280	2570	2850
950 mm	1210	1520	1820	2120	2430	2730	3030
1000 mm	1290	1610	1930	2250	2570	2890	3220
1100 mm	1430	1790	2150	2500	2860	3220	3580
1200 mm	1580	1970	2360	2760	3150	3540	3940
1300 mm	1720	2150	2580	3010	3440	3870	4300
1400 mm	1860	2330	2800	3260	3730	4190	4660
1500 mm	2010	2510	3010	3520	4020	4520	5020

Potência em Watts

7.2. Cargas indutivas

Cargas indutivas são todas as cargas que possuem condutores elétricos, especialmente se esses condutores estiverem enrolados sobre núcleos, tais como: motores elétricos, transformadores, reatores, etc (na verdade um simples condutor elétrico já possui o efeito indutivo).

A rigor, não existem cargas indutivas puras pelo fato de que qualquer condutor elétrico possui uma certa resistência de modo que o efeito indutivo se soma ao efeito resistivo, formando uma carga conhecida como RL (Resistiva-Indutiva).

Para iniciar, supõe-se que a carga seja, de fato indutiva pura. Nesta situação, se traçarmos os gráficos de tensão, corrente e potência sobre a carga, tem-se a seguinte situação:

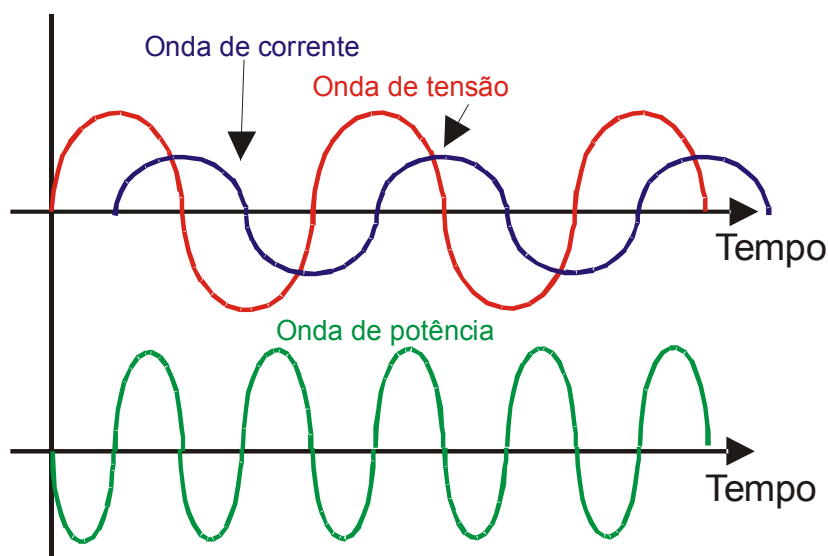
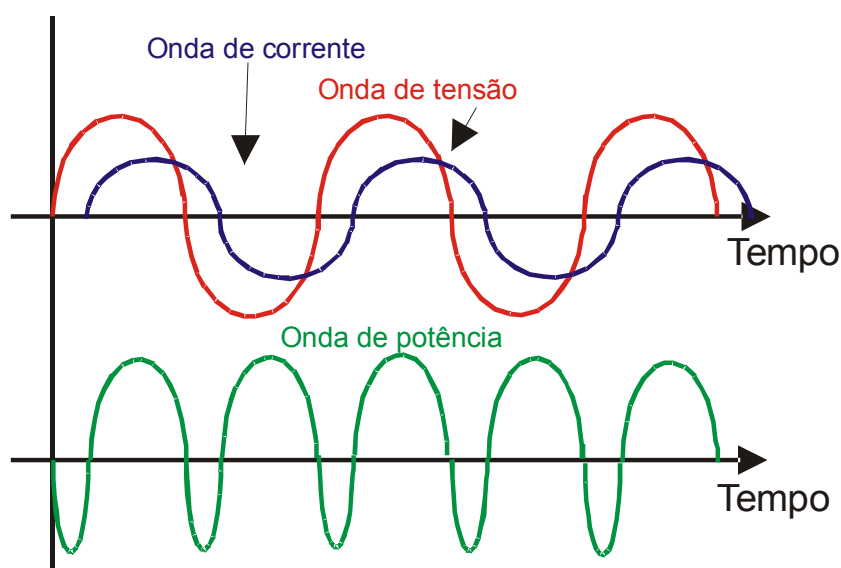


Figura 7.5: Onda de corrente e de tensão em cargas indutivas

Notar que a potência média dissipada no indutor é zero, visto que em cada meio ciclo há uma inversão do sentido da potência. Potência positiva significa potência vinda da fonte em direção a carga e potência negativa significa potência devolvida pela carga à fonte. Porém essa potência devolvida à fonte, que a primeira vista poderia ser considerada benéfica, é altamente prejudicial, sobrecarregando os circuitos elétricos das concessionárias.

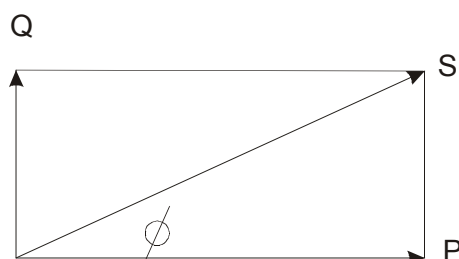
Outra característica importante das cargas indutivas é o fato de que a corrente elétrica está sempre atrasada em relação à tensão elétrica.

Na prática, como não existem cargas puramente indutivas a configuração do gráfico acima se apresenta da seguinte maneira:



Observar que a onda de corrente está sempre entre 0° e 90° defasada em relação a onda de tensão. Cargas em que a defasagem é de 0 são cargas totalmente resistivas. Carga em que a defasagem é de 90° são cargas totalmente indutivas. Cargas RL apresentam uma defasagem intermediária entre 0° e 90° . Nesta última situação a onda de potência apresenta picos positivos e negativos.

Em termos vetoriais poder-se-ia traçar o seguinte gráfico:



Onde: S = Potência aparente (VA – Volt-Ampere)
P = Potência real (W – Watt)
Q = Potência reativa (Var – Volt-Ampere Reativo)

Figura 7.6: Diagrama de potências em cargas indutivas

O ângulo \varnothing tem um significado muito especial: trata-se do FATOR DE POTÊNCIA. O fator de potência é um gerador de pesadas contas nas faturas de energia elétrica, pois, de acordo com a legislação brasileira a energia reativa máxima permitida é de 8%. Acima disso inicia-se o faturamento de multas.

7.3. Cargas capacitivas

As cargas capacitivas, como o próprio nome diz, tem sua origem em um componente elétrico chamado CAPACITOR. O capacitor é um dispositivo que armazena energia através da polarização de duas placas próximas. Ele produz um efeito reativo, invertido em relação ao efeito reativo indutivo.

As curvas abaixo mostram como é a onda de tensão, corrente e potência para uma carga capacitiva pura.

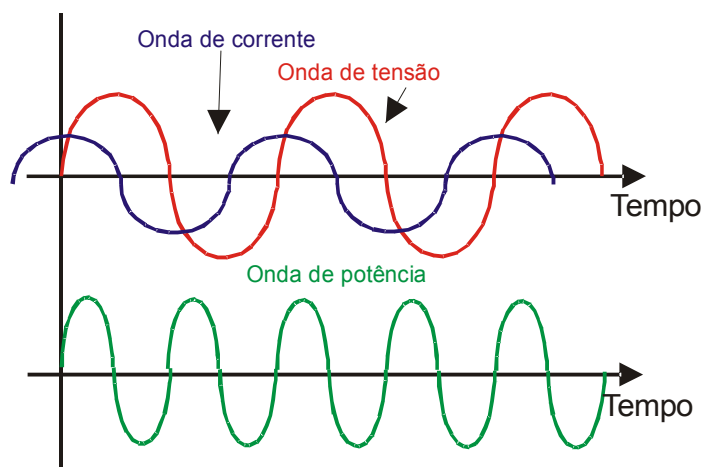


Figura 7.7: Onda de corrente e de tensão em cargas capacitivas

Notar que agora a onda de corrente está adiantada em relação a onda de tensão. A potência média dissipada também é zero, ou seja, com cargas capacitivas puras não há dissipação de potência, porque a cada meio ciclo o sentido da potência se inverte.

Na prática as cargas capacitivas também não são totalmente capacitivas, ou seja, tem-se sempre cargas RC (Resistivas-Capacitivas), com isso o efeito capacitivo pode ser descrito por um gráfico vetorial como mostrado abaixo.

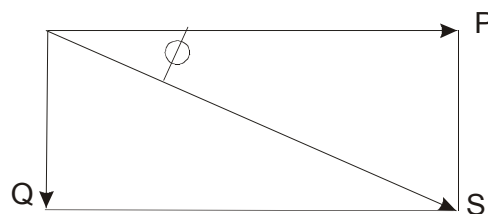


Figura 7.8: Diagrama de potências em cargas capacitivas

Notar que o efeito capacitivo é exatamente o oposto do efeito indutivo, logo, um sempre anula o outro e a resultante final fica com o tipo de carga predominante.

Comercialmente tem-se vários tipos de capacitores. A figura abaixo mostra alguns desses tipos:



Capacitor para correção de fator de potência em redes elétricas



Capacitores para uso em eletrônica

Figura 7.9: Formato de capacitores

8. Fator de potência

A potência elétrica para circuitos puramente resistivos é dada por:

$$P = V \times I$$

Se formos fazer um gráfico de potência, tensão e corrente na situação de circuitos totalmente resistivos teríamos a seguinte situação:

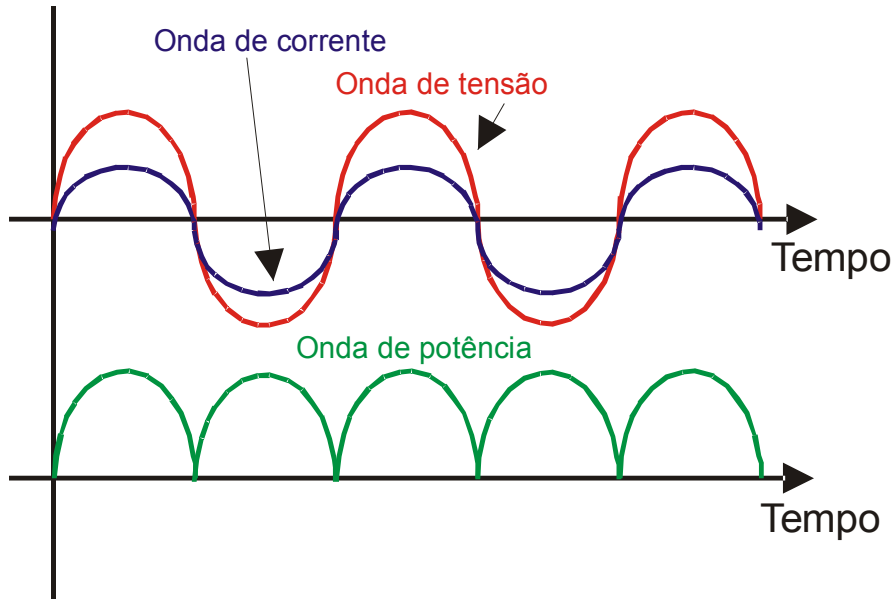


Figura 8.1: Onda de corrente e de tensão em cargas resistivas

Observe que a tensão e a corrente estão sempre com o mesmo sinal (em fase). Isso produz sempre uma potência positiva, visto que quando dois números de mesmo sinal são multiplicados o resultado é um número positivo.

Esta situação ocorre somente em circuitos resistivos puros. Quando são introduzidos elementos reativos (indutores ou capacitores) a equação da potência fica assim:

$$P = V \times I \times \cos \Phi$$

Surgiu um termo novo chamado de Φ (fi), que entra na fórmula como sendo um cosseno, logo Φ deve ser um ângulo. Sendo um ângulo de 0° a 360° e o seu cosseno deve variar de -1 a +1. Portanto, analisando a equação percebe-se que a potência deve variar de $V \times I$ até $-V \times I$, ou seja, agora tem-se potências positivas e negativas. Mas qual o significado físico deste fenômeno? Fisicamente significa que tem-se a onda de tensão defasada em relação a onda de corrente.

Para melhor compreender esta questão divide-se os circuitos com elementos reativos em duas situações, que são:

8.1.Circuitos com predominância de elementos indutivos

As indutâncias presentes nos circuitos (motores, transformadores, reatores, fornos indutivos e outros elementos com enrolamentos) produzem a seguinte forma de onda:

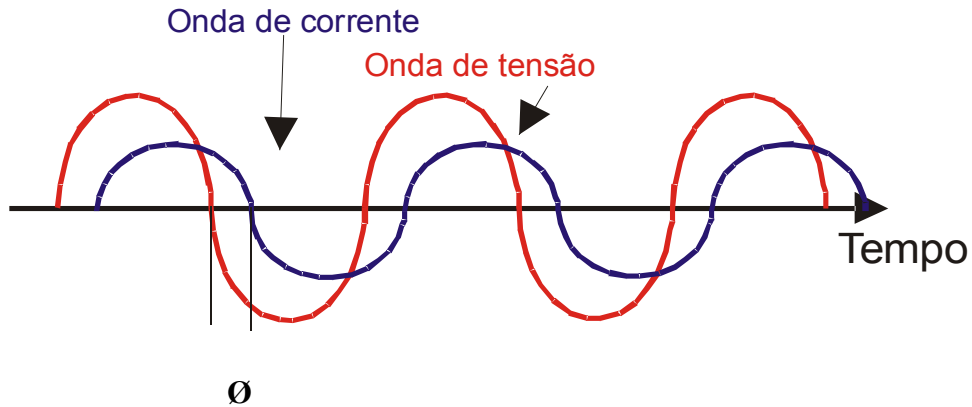


Figura 8.2: Onda de corrente e de tensão em cargas indutivas

Observem o que aconteceu com a onda de corrente: ela se atrasou em relação a onda de tensão. Esta defasagem é produzida pelo ângulo Φ . Logo, o significado físico do ângulo Φ é uma defasagem entre as ondas de tensão e de corrente. Quando o circuito é predominantemente indutivo a onda de corrente se atrasa em relação a onda de tensão.

Agora será introduzida a onda de potência na mesma figura mostrada acima:

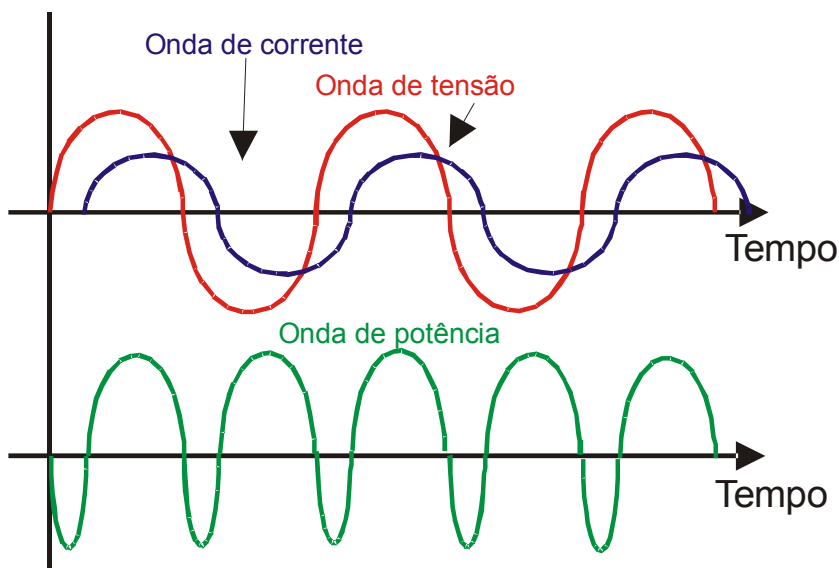


Figura 8.3: Onda de corrente, tensão e potência em cargas indutivas

Note que, nos instantes de tempo onde a corrente e a tensão possuem sentidos diferentes (uma positiva e outra negativa) a potência fica com sinal negativo.

Considera-se sempre, potência positiva aquela potência que flui da fonte de energia para a carga consumidora. Essa potência é chamada de potência ativa. Então o que representa a potência com sinal negativo surgida no gráfico acima? A potência com sinal negativo representa uma potência que flui da carga consumidora em direção à rede fornecedora de potência. Essa potência é chamada de potência reativa e é produzida nas cargas reativas (indutivas ou capacitivas). Após ser gerada essa potência é devolvida à rede de alimentação. O problema técnico deste tipo de energia é que ele é maléfico, ou seja, ele prejudica a rede como um todo, produzindo sobrecorrentes inúteis que produzem um sobre aquecimento nos condutores e, em consequência, aumento de perdas por aquecimento.

Antes de passar a uma análise mais profunda deste fenômeno, apresenta-se abaixo a forma de onda de potência para cargas reativas com predominância capacitiva.

8.2. Circuitos com predominância de elementos capacitivos

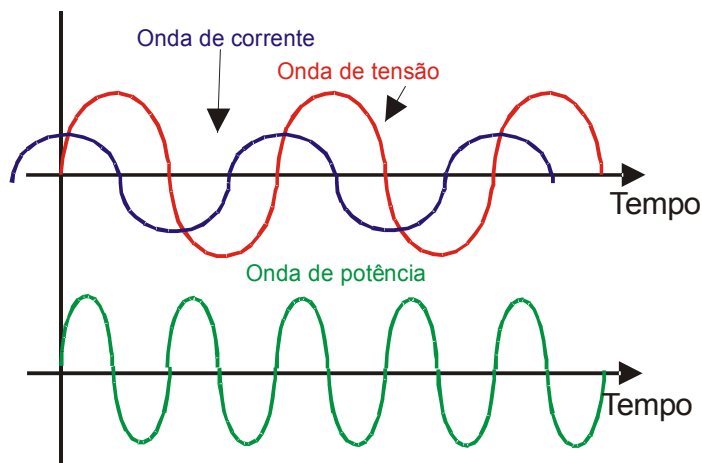


Figura 8.4: Onda de corrente e de tensão em cargas capacitivas

Observar que o fenômeno é o mesmo, porém agora, a corrente se adianta em relação à tensão.

Graficamente, as potências se apresentam da seguinte maneira:

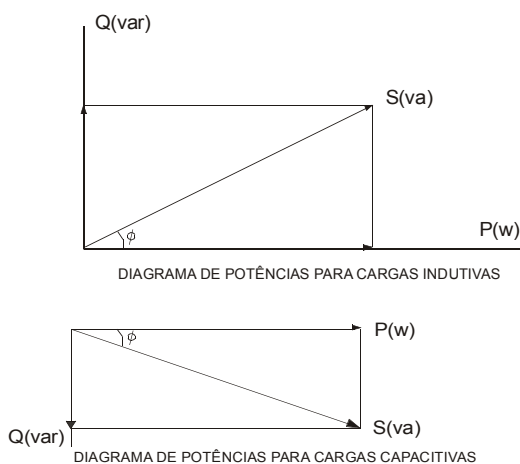


Figura 8.5: Diagrama de potências em cargas capacitivas

Existem três tipos de potência mostrados nos diagramas acima:

- S = Potência aparente (VA);
- P = Potência real (W)
- Q = Potência reativa (Var)

Note o seguinte:

$$P = S \cdot \cos\theta \quad \text{e} \quad Q = S \cdot \sin\theta$$

Notar que S sempre será igual ou maior do que P e Q, pois o cosseno de um ângulo nunca é maior do que 1. Observar também que a corrente elétrica que circula por um condutor é dada por:

$$I = S/V \text{ ou } I=P/V.\cos\varnothing \text{ ou ainda } I = Q/V.\text{sen}\varnothing$$

Em termos de trabalho realizado pela eletricidade, o que importa é a potência ativa, ou potência real. A potência reativa não tem nenhum resultado prático e a potência aparente é, na verdade uma composição entre as potências ativa e reativa.

O ângulo \varnothing representa a defasagem entre a tensão e a corrente elétrica e, essa defasagem, é chamada de fator de potência.

A principal consideração a ser feita, com base nas curvas de forma de onda e nos diagramas é que o efeito indutivo é exatamente o oposto do efeito capacitivo. Enquanto um adianta a corrente o outro a atrasa, assim sendo, pode-se concluir que um correto balanço entre os dois efeitos reativos pode levar a tensão e a corrente a entrarem em fase e, com isso, desaparece a parte negativa da potência. Esta dedução é correta e o balanço entre o reativo indutivo e o reativo capacitivo é chamado de correção de fator de potência.

Também pode-se avaliar os limites das equações acima. O ângulo pode variar desde 90° até -90° . O cosseno de 90° e o de -90° é 0. O maior cosseno obtido é 1 e ocorre quando o ângulo está em 0° , ou seja é o momento em que a tensão e a corrente estão em fase.

Se em uma determinada rede tivermos um FP (fator de potência) de 0,7, significa que o ângulo $\varnothing = 50,6^\circ$. Se tivermos um FP de -0,5 significa que o ângulo $\varnothing = -43,3^\circ$.

Se agora se tiver um FP=0,8, isto é, a rede está indutiva e forem acrescentados capacitores suficientes para produzir um FP=-0,8 então, tem-se uma rede em fase. Corrigir o FP é exatamente determinar quantos capacitores são necessários para fazer com que a rede fique com uma fase dentro dos parâmetros legais estabelecidos pela legislação brasileira.

Frequentemente o FP é expresso em termos percentuais, por exemplo, 0,8 é 80%. A legislação brasileira admite o FP entre 92% até -92%, ou seja, o ângulo máximo de defasagem admitido é de $25,6^\circ$ no lado positivo ou no lado negativo.

O fator de potência baixo produz pesadas multas na fatura de energia elétrica, por isso, é conveniente, todos os meses, analisar a fatura para verificar se há alguma multa relacionada a este item. Na fatura as multas relativas ao fator de potência aparecem da seguinte maneira:

- Fatur. Reativo Exced. (Faturamento Reativo Excedente) – Para contas classe B
- Fatur. Reativo – UFER (Unidade de Faturamento de Energia Reativa) – Para contas classe A
- Fatur. Reativo – UFDR (Unidade de Faturamento de Demanda Reativa) – Para contas classe A

8.3. Medição da energia reativa

A medição da energia reativa é feita de maneira um pouco diferente da energia ativa. Para melhor compreender como essa medição é feita é necessário separar os consumidores em várias classes. Começa-se pelos consumidores classe B (baixa Tensão).

Os consumidores em classe B podem ter sua energia reativa medida de duas maneiras:

- Permanente: para aqueles que possuem medidor eletrônico;
- Amostragem: para aqueles que possuem medidor mecânico.

A amostragem é feita através da instalação de um medidor apropriado durante alguns dias na unidade de consumo. Após é feito o cálculo do FP medido. Se o FP ficou abaixo de 92% o consumidor recebe uma correspondência da concessionária informando da necessidade de efetuar a devida correção de fator de potência. Neste caso o cliente recebe um prazo de 90 dias para efetuar a correção, após, caso não tenha sido feita, é iniciada a cobrança da multa na fatura de energia elétrica. Esta multa somente será retirada da fatura quando a correção for feita.

No caso de medição eletrônica a energia reativa é medida durante todo o mês, da mesma forma que é feita a medição da energia ativa. Para ambas as situações o Fp é calculado como mostrado em seguida:

8.4. Cálculo do fator de potência

O fator de potência é calculado pela concessionária da seguinte maneira:

Suponha um consumo ativo de 2000kWh e um reativo de 800 kVAr. Observe na figura abaixo onde estão essas duas grandezas medidas:

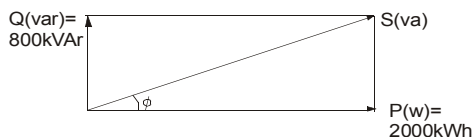


Figura 8.6: O fator de potência

Note que: $\text{ArcTg } \phi = Q/P = 800/2000 = 24,2^\circ$

Agora basta calcular o cosseno deste ângulo:

Cosseno $24,2^\circ = 0,928$, ou seja, o FP = 92,8%, portanto dentro da faixa permitida pela legislação brasileira.

Para as consumidores em classe A (alta tensão), o faturamento do reativo excedente depende do tipo de contrato de fornecimento de energia que o cliente possui (Convencional, Horo-sazonal azul, horo-sazonal verde)

No caso dos clientes que possuem contrato convencional a medição do reativo segue o mesmo sistema utilizado para os clientes em classe B com medidor eletrônico. Ou seja: mede-se o consumo ativo e reativo durante todo o mês e, em seguida, calcula-se o fator de potência como explanado para os consumidores classe B.

No caso de consumidores com contratos horo-sazonais esta medição é bastante complexa e muito delicada. O cálculo do reativo excedente é feito a cada hora, ou seja, a cada hora são medidos os consumos ativos e reativos e é calculado o fator de potência. Cada vez que o FP fica abaixo de 92% é tarifada uma multa irreversível. Por isso esses consumidores precisam de sistemas de controle de FP muito sofisticados, feitos com bancos de capacitores com controle automático.

8.5. Efeitos transitórios provocados por elementos LC nos circuitos

Os circuitos elétricos, quando possuem elementos LC (motores elétricos, capacitores, etc) produzem os efeitos transitórios quando ligados ou quando desligados. Suponhamos um circuito RL, ou seja, um circuito que possui um motor elétrico como mostrado na figura abaixo:

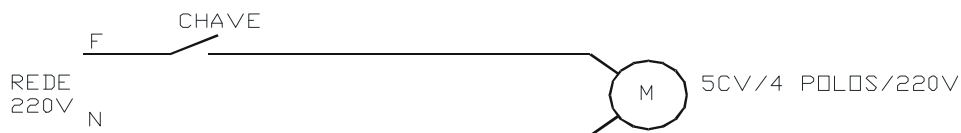


Figura 8.6: Circuito de um motor elétrico

No momento da ligação do circuito, o indutor (enrolamentos do motor) está totalmente descarregado, de forma que no início a corrente elétrica absorvida serve apenas para carregar esse indutor. Ocorre que, no início, é necessária uma corrente elétrica muito elevada até que o indutor esteja totalmente carregado. Desta maneira poderíamos elaborar um gráfico da corrente elétrica em função do tempo:

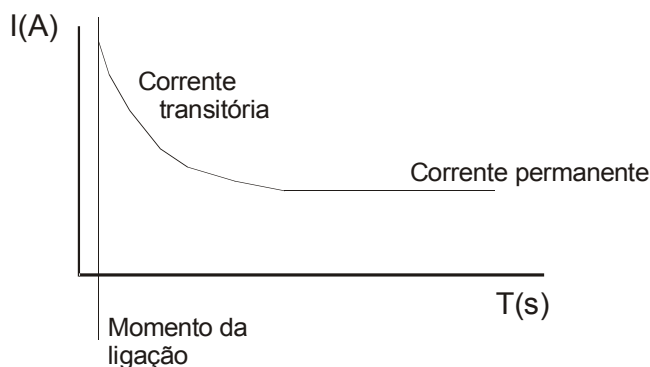


Figura 8.7: Efeito transitório das cargas indutivas

Note que a corrente elétrica inicia com um valor elevado e termina em um ponto conhecido como corrente permanente. É importante observar que a chave deve ser dimensionada para a corrente transitória e os cabos devem também suportar a corrente transitória.

Uma outra situação é quando o circuito é um RC, ou seja, um circuito com capacitores.

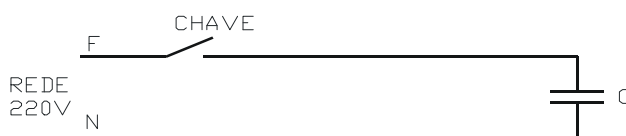


Figura 8.8: Circuito capacitivo

Agora, no momento, em que a chave é fechada a tensão sobre o capacitor cresce conforme a figura abaixo:

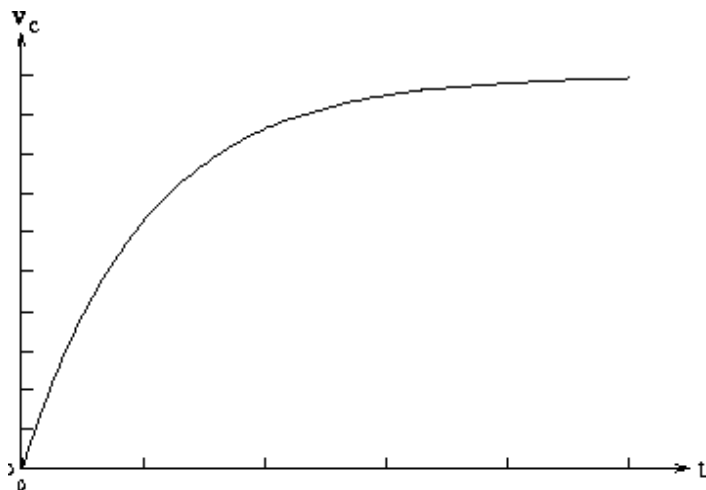


Figura 8.9: Efeito transitório das cargas capacitivas

A diferença básica entre os circuitos RL e RC é que o transitório RL é de corrente, enquanto que o transitório RC é de tensão.

Existe também a possibilidade de termos circuitos contendo elementos R, L e C. Esses circuitos são chamados de RLC, como mostrado abaixo:

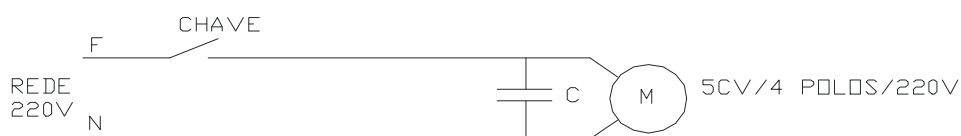


Figura 8.10: Circuito indutivo e capacitivo

Esta é uma situação muito interessante e, de certa forma, delicada, pois os elementos L e C produzem um efeito chamado de “Ressonância”, que pode produzir tensões e/ou correntes muito elevadas. No entanto essa é uma configuração típica para correção de fator de potência que será visto a seguir.

9. Principais máquinas elétricas utilizadas na indústria

9.1. Transformador



Figura 9.1: Transformador de potência

O transformador é um componente de extrema importância em redes de energia elétrica pelo fato de poder adaptar tensões de acordo com as necessidades. Basicamente o transformador é um componente que possui dois enrolamentos separados, como mostrado abaixo:

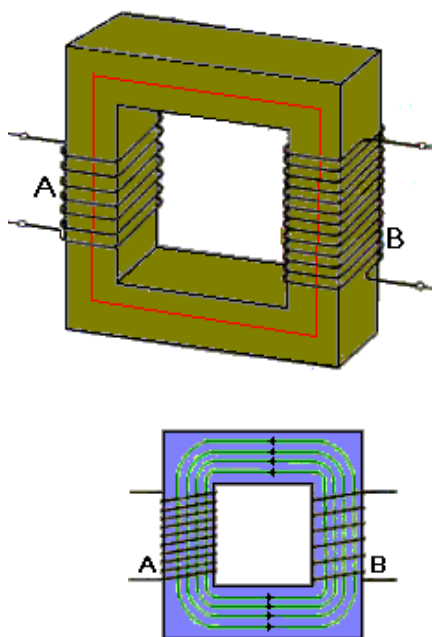


Figura 9.2: Funcionamento do transformador

O princípio de funcionamento do transformador é relativamente simples. Aplica-se uma tensão alternada V_1 ao enrolamento A, esta tensão V_1 produz uma indução no enrolamento B, que produz uma tensão nos terminais deste enrolamento. Logo: uma tensão aplicada no enrolamento A produz uma tensão no enrolamento B.

A relação entre essas tensões é a seguinte:

$$\frac{V_a}{N_a} = \frac{V_b}{N_b}$$

Onde V_a = Tensão aplicada no enrolamento 'a'
 N_a = Número de espiras do enrolamento 'a'
 V_b = Tensão recolhida no enrolamento 'b'
 N_b = Número de espiras do enrolamento 'b'

Observe que a tensão em 'a' e 'b' tem uma relação direta com o número de espiras dos enrolamentos. Com isso as tensões podem ser adaptadas em valores adequados a cada local.

9.1.1. A questão da voltagem para transmissão da energia elétrica

A questão toda que envolve a necessidade de tensões elevadas para a transmissão da energia elétrica está ligada a potência que é necessário transmitir. Note que:

$$P = V \times I$$

Fica evidente que, mantida a potência contante, se V aumenta I diminui e vice-versa. Do ponto de vista dos condutores elétricos, a voltagem tem a ver com a isolação necessária e a corrente com a bitola do condutor. A questão da isolação foi resolvida ao longo do tempo com o desenvolvimento de isoladores de porcelana, vidros ou poliméricos que, quando dispostos em fila podem suportar tensões da ordem de mega volts, de modo que não seriam os isoladores que iriam impedir a elevação da tensão de uma linha de transmissão. A corrente elétrica tem uma relação direta com a bitola do condutor, ou seja, quanto maior a corrente elétrica maior deve ser a bitola do condutor. Aumentando-se a bitola do condutor tem-se vários problemas relacionados à construção física da linha: condutores com maior bitola são mais pesados o que torna necessário estruturas mais resistentes. Além de pesados condutores com maior bitola são mais caros, o que encarece o custo total da linha.

Do ponto de vista dos geradores, por motivos técnico-econômicos e por maiores que os geradores sejam, eles são projetados para gerar tensões de até no máximo 50 kV.

Assim ficamos com o seguinte problema: se transmitirmos a energia elétrica com a tensão gerada, a corrente elétrica será muito elevada, implicando na utilização de condutores e estruturas mais caras. Se aumentarmos a tensão diminuimos a corrente elétrica, portanto barateamos o custo dos condutores e das estruturas, mas aumentamos o custo dos isoladores e introduzimos um novo custo que são os transformadores. No balanço final, o barateamento do custo dos condutores e das estruturas é muito maior do que o aumento de custo produzido pelos isoladores e transformadores, de modo que, a opção por tensão elevada foi a adotada para transmissão de energia elétrica entre pontos distantes.

A utilização da tensão elevada para conduzir a energia elétrica entre pontos distantes tem também a vantagem de, com correntes elétricas menores, as perdas ôhmicas (perdas por aquecimento) diminuem, visto que:

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

Se I diminui, então as perdas totais (P) diminuem na relação quadrática. Isso aumenta o rendimento da transmissão de energia, pois reduzindo as perdas tem-se um aproveitamento maior da energia transmitida.

Os problemas seguintes exemplificam a questão do uso dos transformadores para conduzir a energia elétrica de um ponto a outro:

Problema n.º 1:

Como transmitir a potência de 50 MW com fator de potência de 0,85, por meio de uma linha de transmissão trifásica com condutores de alumínio, desde a usina hidroelétrica, cuja tensão nominal do gerador é 13,8 kV, até o centro consumidor situado a 100 km? Admitindo-se uma perda por efeito Joule de 2,5 % na linha, determine o diâmetro do cabo, para:

- a. transmissão em 13,8 kV
- b. transmissão em 138 kV

Considerando a transmissão em 13,8 kV:

A corrente de linha é calculada pela fórmula $I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \varphi}$.

Substituindo os valores de P, V e cos φ resulta uma corrente de 2.461,0 A.

A perda de 2,5% significa uma potência dissipada de 1.250 kW. Tendo-se a corrente e a potência dissipada podemos determinar a resistência do condutor pela fórmula $R = \frac{P_r}{I^2}$, obtendo-se o valor de 0,2064 Ω.

Tendo-se a resistência, a resistividade do alumínio (0,02688 $\frac{\Omega \cdot m}{m}$) e o comprimento, podemos determinar a seção reta do condutor pela fórmula $S = \rho \frac{l}{R}$, obtendo-se 13.028,0 m^2 . Esta seção corresponde a um cabo cujo diâmetro é de **130,0 mm**.

Considerando a transmissão em 138 kV:

Seguindo-se os mesmos passos obtém-se um cabo com diâmetro de **13,0 mm**.

A Figura 7.2 (a) e (b) mostra as dimensões dos cabos, **em tamanho real**, para os dois casos.

Por este exemplo simples podemos notar que é impraticável transmitir energia elétrica a longa distância com a tensão de geração.

Assim sendo, após a geração é necessário que a tensão seja elevada para a transmissão (no nosso exemplo de 13,8 kV para 138 kV).

A elevação da tensão é feita por um equipamento denominado **TRANSFORMADOR**. A Figura 7.3 mostra um diagrama unifilar simplificado dos sistemas de geração e transmissão.

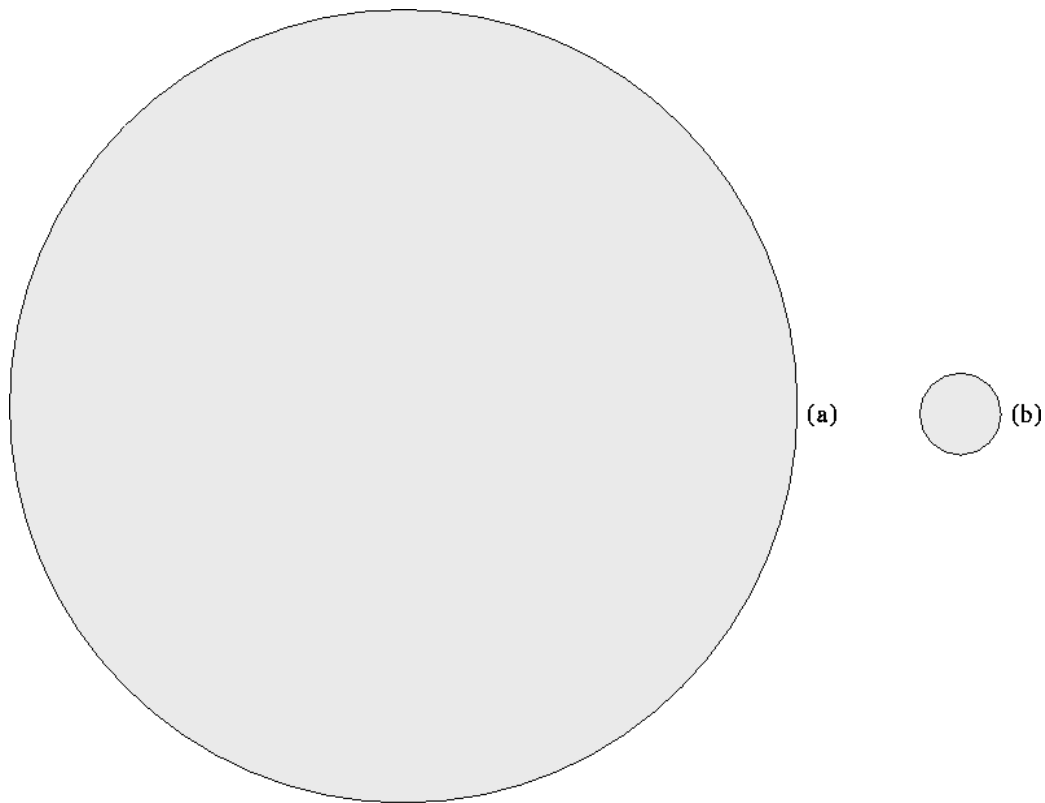


Figura 9.3: Dimensões dos condutores para 13,8kV e para 138 kV

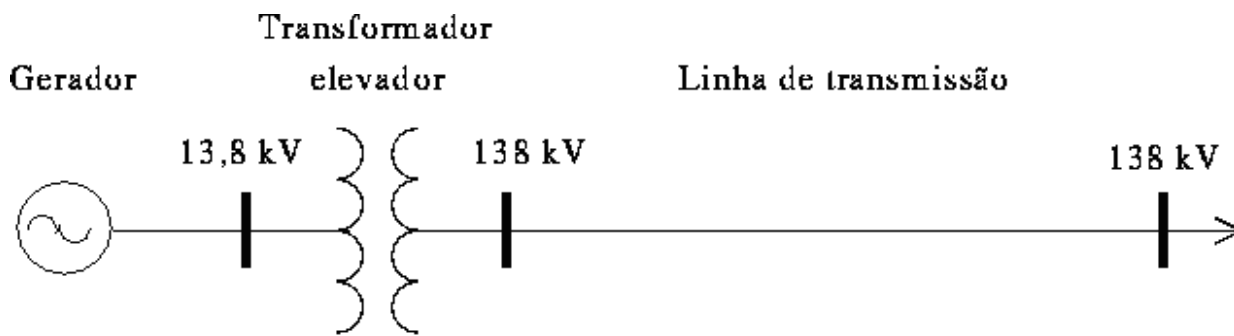


Figura 9.4: Transformador elevador de tensão e transmissão

Problema n .2:

Como distribuir a energia elétrica que chega das usinas através das linhas de transmissão, para os centros consumidores?

Como já vimos, a transmissão da energia elétrica é feita em alta tensão. Para distribuir esta energia é necessário reduzir a tensão para um valor compatível, por exemplo: 13,8 kV ou 11,95 kV. Esta redução é feita pelo TRANSFORMADOR instalado na subestação abaixadora, geralmente localizada na periferia dos

centros urbanos. Após a redução a energia elétrica é transmitida através das linhas de distribuição, que formam a rede primária, conforme mostrado na Figura 7.4.

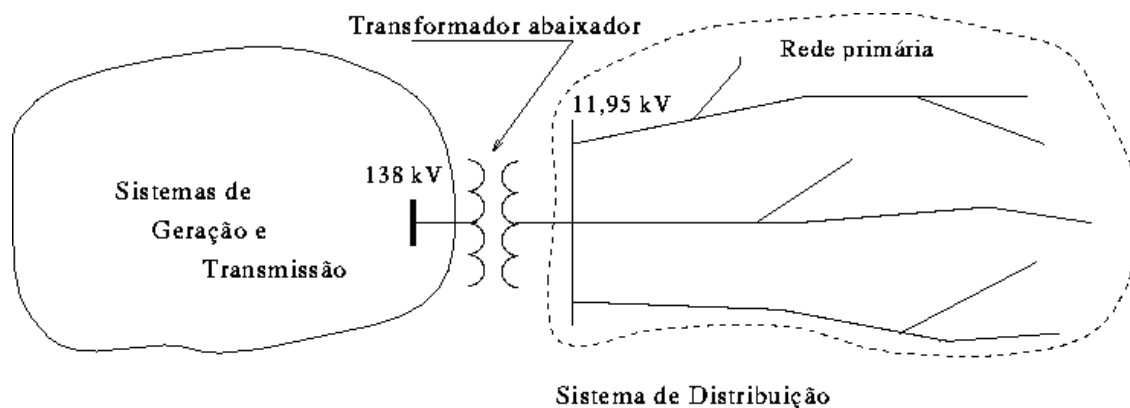


Figura 9.5: Transformador abaixador de tensão e rede primária

Problema n.º 3:

Como distribuir a energia elétrica, que chega pela rede primária, para os consumidores finais (casas, apartamentos, casas comerciais e pequenas indústrias)?

A distribuição da energia elétrica para estes consumidores é feita pela rede secundária (por exemplo: 220 V e/ou 127 V). A redução de tensão da rede primária para a tensão da rede secundária é feita pelo TRANSFORMADOR de distribuição (instalado no poste). A Figura 7.5 mostra este sistema.

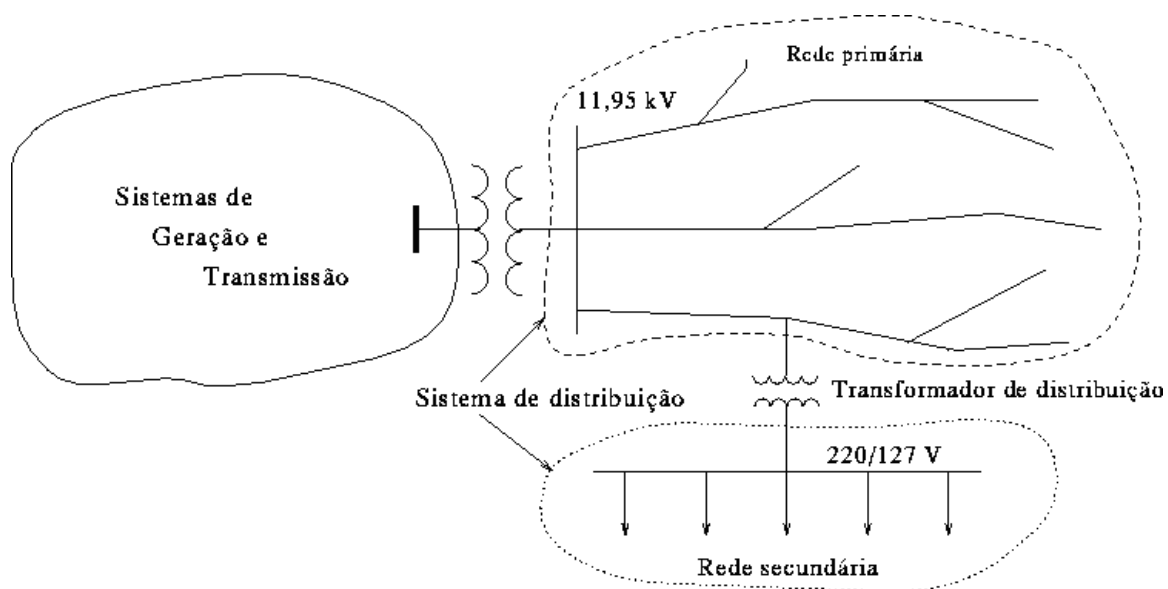


Figura 9.6: Transformador de distribuição e rede secundária

9.1.2. Transformadores em sistema trifásico

No sistema elétrico de potência os transformadores, por motivos óbvios, devem ser ligados para operar no sistema trifásico.

Há duas maneiras de se obter a ligação trifásica:

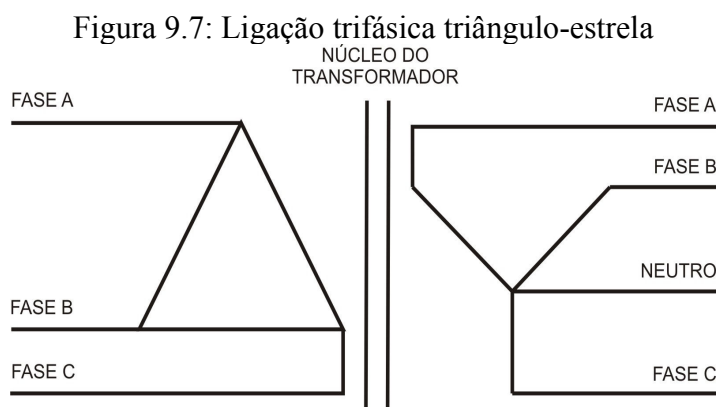
- transformador trifásico, construído para esta finalidade;
- banco trifásico de transformadores (três transformadores monofásicos convenientemente ligados para permitir a transformação trifásica).

As ligações dos enrolamentos do primário e do secundário de um transformador trifásico ou banco trifásico podem ser em estrela ou em triângulo. Assim, na prática podemos ter quatro tipos de ligações:

- Triângulo / Estrela (D/y)
- Estrela / Triângulo (Y/d)
- Triângulo / Triângulo (D/d)
- Estrela / Estrela (Y/y)

As ligações trifásicas e as respectivas grandezas nos lados primário e secundário são mostradas nas figuras seguintes:

a) Ligação Triângulo/Estrela:



Note que no lado em que as fases são ligadas na modalidade triângulo não há o condutor neutro. O condutor neutro aparece somente na ligação estrela, como sendo o centro de ligação das 3 fases.

b) Ligação Estrela/Triângulo:

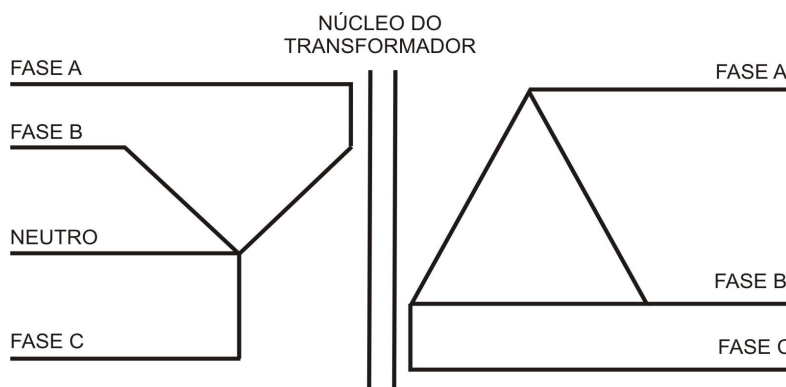
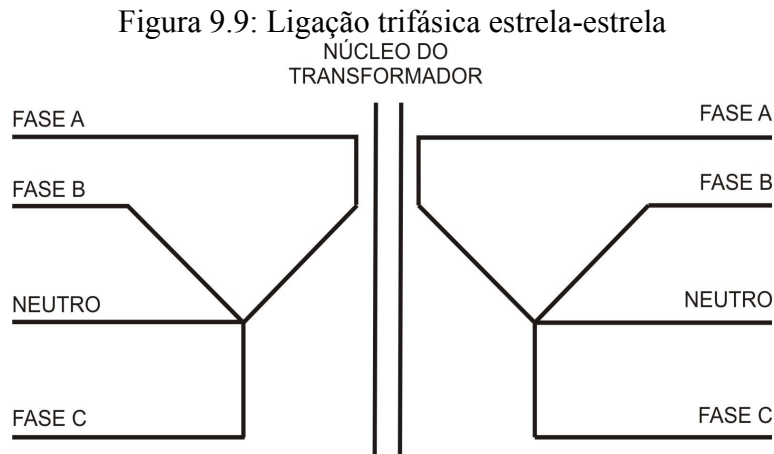


Figura 9.8: Ligação trifásica estrela-triângulo

c) Ligação Estrela/Estrela:



c) Ligação Triângulo/Triângulo

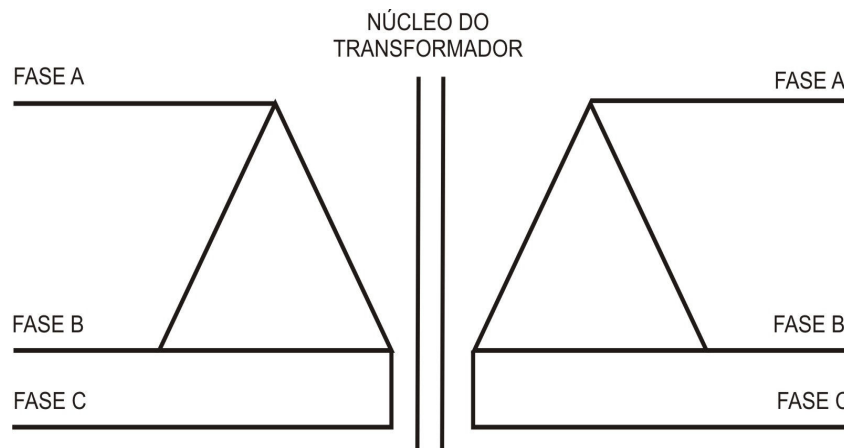


Figura 9.10: Ligação trifásica triângulo-triângulo

Uma rápida análise das formas como os transformadores são ligados mostra que é possível transmitir energia elétrica trifásica sem o uso do neutro. O esquema abaixo mostra uma transmissão sem neutro:

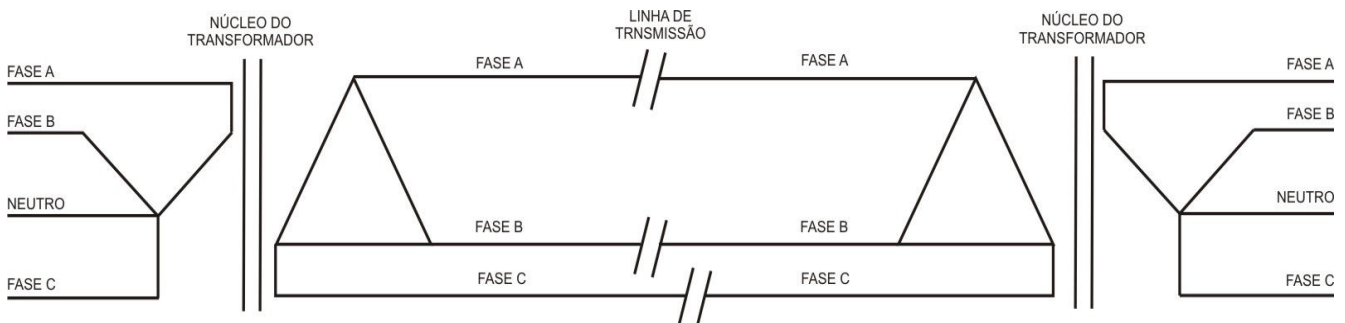


Figura 9.11: Linha de transmissão sem o neutro

Praticamente todas as linhas de transmissão são feitas sem a utilização do neutro. Isso barateia a linha como um todo; custo do condutor e custo da estrutura.

Note que o neutro aparece sempre que é feita a ligação estrela, então, o neutro pode ser gerado em qualquer local onde ele for necessário com a introdução de um transformador ligado em estrela.

9.2. Motores elétricos

9.2.1. Introdução

Os seguintes fenômenos são facilmente observáveis:

- a) Dois ímãs permanentes tendem a se alinhar com os polos opostos se defrontando.
- b) Dois reatores de formas convenientes (eletroímãs), quando excitados, tendem a alinhar-se de modo que os eixos longitudinais tomem a direção do campo, com os polos opostos se defrontando.

Nestes dois sistemas notaremos que toda vez que houver um desalinhamento dos campos desenvolver-se-á uma força que tenderá a restabelecer o alinhamento. Lembremos que o eletroímã produz os mesmos efeitos magnéticos de um ímã permanente, apresentando igualmente um polo norte e um polo sul.

Quando se processam tais realinhamentos de elementos excitados, o sistema produz um trabalho mecânico e a energia necessária é fornecida pela fonte elétrica que mantém o campo magnético. Se impusermos o desalinhamento aos elementos excitados, então estaremos fornecendo trabalho mecânico ao sistema, que devolve a energia correspondente em forma de energia elétrica. Em ambos os casos o dispositivo se torna um transdutor - isto é, converte uma forma de energia em outra. Construindo-se convenientemente este transdutor temos, então, as máquinas elétricas. Este é o princípio básico de funcionamento de qualquer modelo de motor elétrico. A interação entre campo magnético e campo elétrico produz forças mecânicas que, quando convenientemente aproveitadas, produz movimentos rotativos. É interessante notar que o inverso também é válido: se uma força mecânica tende a desalinhar o equilíbrio dos campos elétricos e magnéticos surge a eletricidade, ou seja, na teoria, o motor elétrico pode também funcionar como gerador, bastando para isso aplicar uma força mecânica de rotação no eixo. O gerador também pode funcionar como motor. Na prática um gerador feito a partir de um motor ou um motor feito a partir de um gerador não teria um bom rendimento porque o motor é projetado para otimizar a conversão de energia elétrica em mecânica e o gerador é o contrário do motor.

A figura seguinte mostra a interação entre campos elétricos e magnéticos que produzem movimento rotacional.

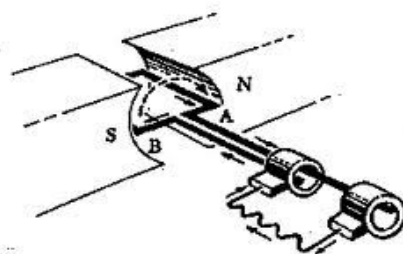


Figura 9.12: Motor elétrico elementar

9.2.2. Classificação dos motores elétricos

Tomando como critério de classificação o princípio de funcionamento, os motores elétricos se classificam em:

- Motores de coletor
 - a) Motores de corrente contínua
 - i) geradores (dínamos)
 - ii) motores de corrente contínua
 - b) Motores de corrente alternada
 - i) motor série
 - ii) motor de repulsão

- Motores assíncronos (motores de indução)
 - a) trifásicos
 - b) monofásicos

- Motores síncronos
 - a) motores síncronos
 - b) geradores (alternadores)

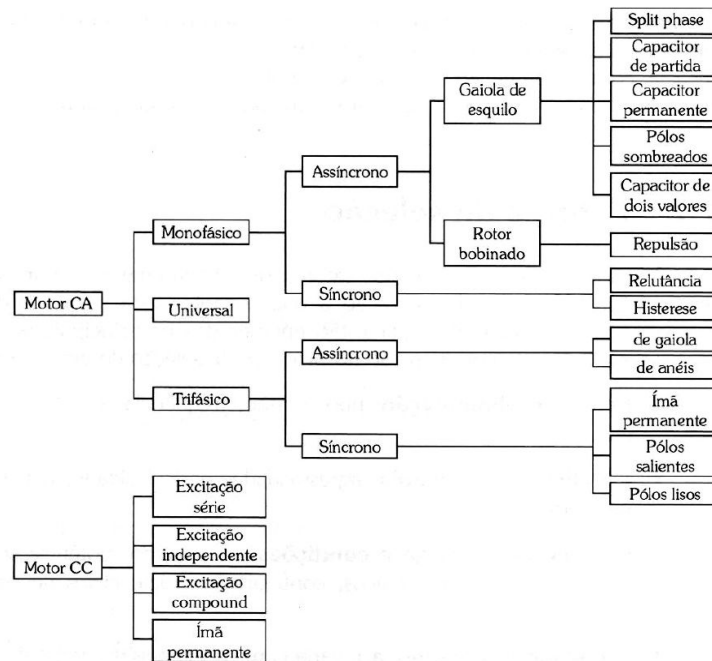


Figura 9.13: Classificação dos motores elétricos

Neste tópico abordaremos: motores de corrente contínua, motor de indução trifásico e motores síncronos trifásicos.

Nos motores elétricos podemos distinguir duas partes principais: o estator (parte fixa) e o rotor (a parte girante).

Nos motores de indução e síncrono trifásicos o estator tem a mesma forma construtiva. Os enrolamentos do estator são alojados em sulcos existentes na periferia do núcleo de ferro laminado e é alimentado por uma fonte trifásica, que forma o **campo girante**. Entretanto, os rotores são bem diferentes. No motor de indução temos dois tipo de rotor: rotor em curto-circuito, ou gaiola de esquilo (ou simplesmente gaiola) e

rotor bobinado, e em ambos os tipos os núcleos magnéticos são laminados. No motor síncrono o rotor é constituído por bobinas enrolados convenientemente nos núcleos magnéticos (denominados de polos) e alimentados por uma fonte de corrente contínua.

9.2.3. Motor de indução

Na máquina elementar da Figura 9.12, se o enrolamento do estator for alimentado com corrente alternada teremos então um campo pulsante, isto é, um campo que muda de polaridade mantendo fixo o eixo de simetria. Se imerso neste campo tivermos o rotor com seu enrolamento em curto-circuito, teremos o princípio de um motor de indução monofásico.

Os motores elétricos são os mais usados de todos os tipos de motores, pois combinam as vantagens da utilização da energia elétrica com uma construção relativamente simples, custo reduzido e grande adaptabilidade às mais diversas cargas.

A potência de saída é a potência mecânica no eixo do motor, que é a *potência nominal*, geralmente expressa em CV ou kW (eventualmente em HP); a potência de entrada é a potência nominal dividida pelo rendimento. A potência de entrada (elétrica), P_E , pode ser dada (em kW) pelas seguintes expressões, em função da potência nominal, P_N , (em CV, kW ou HP) e do rendimento η :

$$P_E(\text{kW}) = \frac{P_N(\text{kW})}{\eta} \quad (7.1)$$

$$P_E(\text{kW}) = \frac{P_N(\text{cv})0,736}{\eta} \quad (7.2)$$

$$P_E(\text{kW}) = \frac{P_N(\text{HP})0,746}{\eta} \quad (7.3)$$

A *corrente nominal* ou *corrente de plena carga* de um motor, I_N , é a corrente consumida pelo motor quando ele fornece a potência nominal a uma carga.

Para os motores de corrente alternada as correntes podem ser determinadas pelas seguintes expressões:

- Monofásico

$$I_N = \frac{P_N}{V_N \cos \varphi \eta} = \frac{P_E}{V_N \cos \varphi} \quad (7.4)$$

- Trifásico

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} V_N \cos \varphi \eta} = \frac{P_E}{\sqrt{3} V_N \cos \varphi} \quad (7.5)$$

sendo V_N a tensão nominal (de linha) e $\cos \Phi$ o fator de potência nominal.

A corrente consumida por um motor varia bastante com as circunstâncias. Na maioria dos motores, a corrente é muito alta na partida, caindo gradativamente (em alguns segundos) com o aumento da velocidade. Atingidas as condições de regime, isto é, motor com velocidade nominal, fornecendo a potência nominal a uma carga, ela atinge o seu valor nominal - aumentando, porém, se ocorrer alguma sobrecarga.

Em princípio, nenhum motor deve ser instalado para fornecer uma potência superior à nominal. No entanto, sob determinadas condições, isso pode vir a ocorrer, acarretando um aumento de corrente e de temperatura,

que dependendo da duração e da intensidade da sobrecarga, pode levar à redução da vida útil do motor ou até mesmo a sua queima. Define-se o *fator de serviço* de um motor como sendo o fator que aplicado à potência nominal, indica a sobrecarga admissível que pode ser utilizada continuamente. Assim, por exemplo, um motor de 50 CV e fator de serviço 1,1 pode fornecer continuamente a uma carga a potência de 55 CV.

Na partida um motor solicita da rede elétrica uma corrente muitas vezes superior à nominal; a relação entre a *corrente de partida*, I_p , e a *corrente nominal*, I_n , varia com o tipo e o tamanho do motor, podendo atingir valores superior a 8. Esta relação depende também do tipo de carga acionada pelo motor. Os motores de corrente alternada de "filosofia" norte-americana e potência igual ou superior a 0,5 HP levam a indicação de uma *letra-código*, que fornece a relação aproximada dos kVA consumidos por HP com *rotor bloqueado*; evidentemente, o motor nunca funciona nessas condições (rotor bloqueado), porém, no instante da partida ele não está girando e, portanto, essa situação é válida até que ele comece a girar. A Tabela 8.1 fornece a relação kVA/HP para as diversas letras-código. Seja por exemplo, um motor de indução trifásico de 3 HP, 220 V, fator de potência 0,83, rendimento 78% e letra-código J. Pelas expressões (7.3) e (7.5) determina-se *corrente nominal* de 9 A. Da Tabela 1 determina-se a relação kVA/HP, que fica na faixa de 7,10 a 7,99. Tomando-se o valor médio, 7,55, determina-se a *corrente de partida* de 59,6 A. Assim, a relação de correntes será 6,62.

Os tipos de motores mais utilizados são os de indução. No Brasil, conforme relatórios estatísticos da ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, no período de 1981 a 1990, foram vendidos mais de 2000 motores por dia, os quais estão distribuídos, percentualmente, nas seguintes faixas conforme Tabela 9.1:

Tabela 9.1: Utilização de motores de indução por faixa de potência.

Faixa de potência	Percentual
até 1 cv	32 a 36%
de 1 a 10 cv	54 a 59%
de 10 a 40 cv	6 a 8%
de 40 a 100 cv	0,5 a 1%
de 100 a 300 cv	0,4 a 0,5%
acima de 300 cv	menos de 0,4%

9.2.4. Princípio de funcionamento

Basicamente os motores de indução são compostos de uma parte fixa (estator) e uma parte rotativa (rotor). A Figura 9.14 mostra alguns aspectos do estator da construção de um motor de indução.

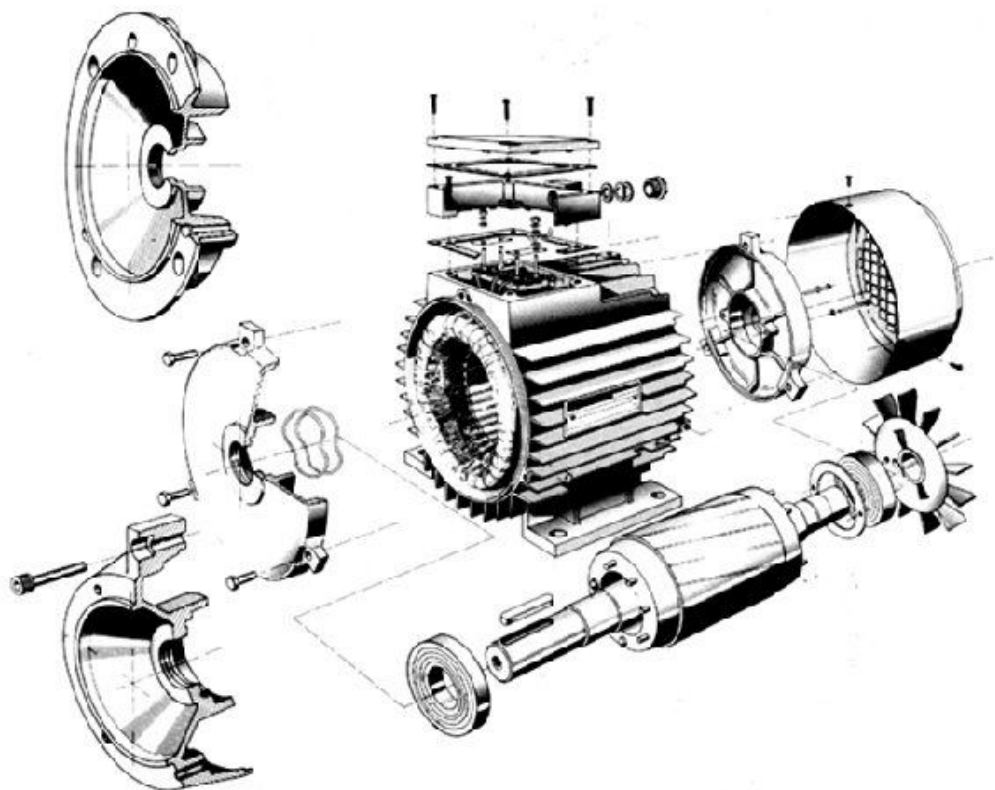


Figura 9.14: Aspectos construtivos de um motor de indução

a) Campo pulsante

Consideremos um enrolamento distribuído no estator de um motor de indução monofásico. A corrente monofásica que percorre o enrolamento gera um campo magnético que acompanha a variação senoidal da corrente, formando sempre um par de polos N-S, cuja posição depende o sentido da corrente. Diz-se que o campo é pulsante, isto é, o campo muda de polaridade, mantendo fixo o eixo de simetria.

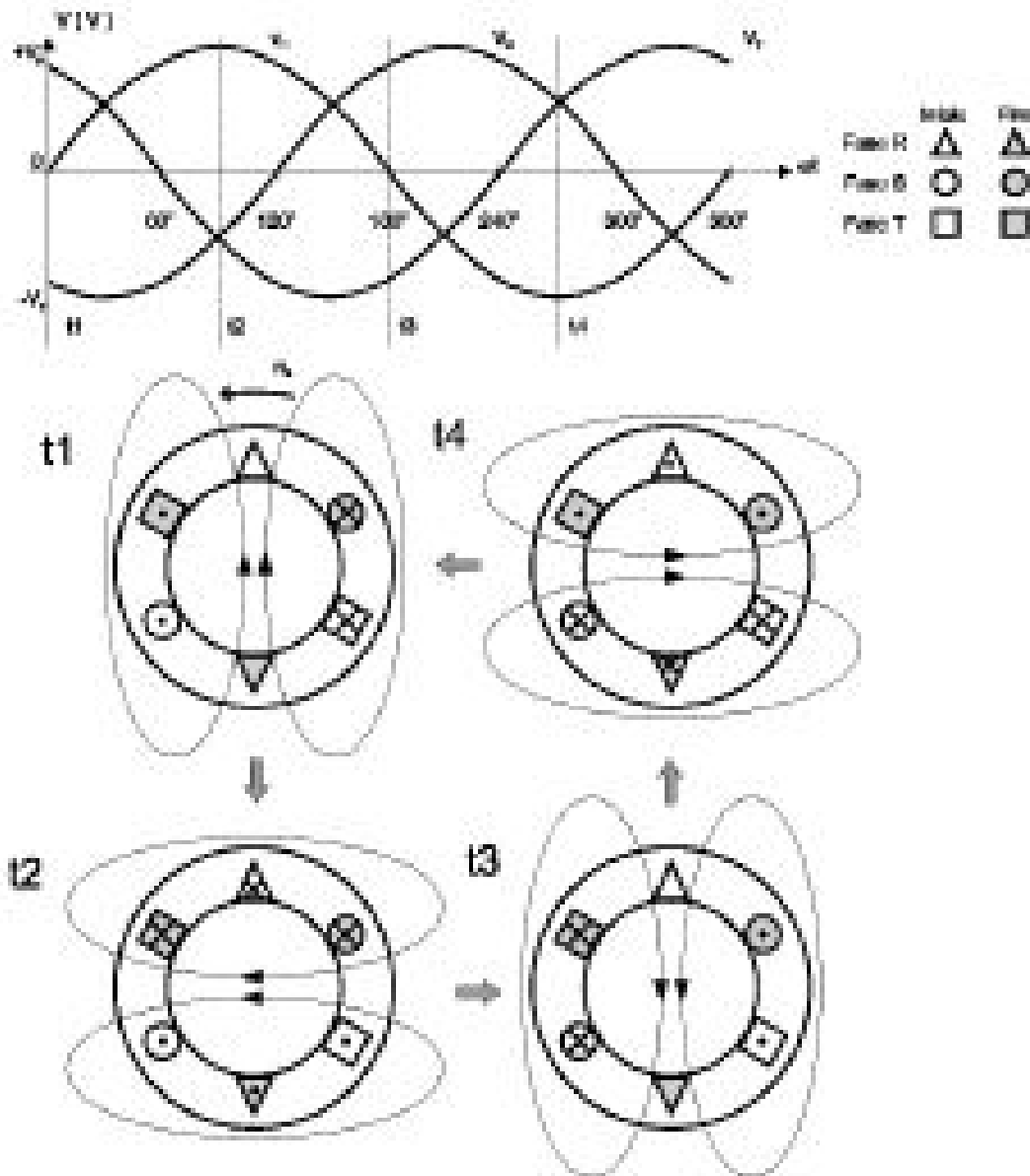


Figura 9.15: Campo pulsante e girante

b) Campo girante

Se em vez de um motor monofásico, considerarmos um trifásico, as correntes trifásicas que percorrem os enrolamentos (fases) do estator vão gerar, em cada fase, campos pulsantes, defasados de um ângulo igual ao da defasagem entre as tensões aplicadas, cujos eixos de simetria são fixos no espaço, mas cuja resultante é um campo que gira num determinado sentido, denominado campo girante.

Consideremos o estator de um motor de indução trifásico (Figura 9.15). As três fases (R), (S) e (T), alojadas nas ranhuras do estator, são deslocadas uma da outra de 120° , e ligadas, (em estrela ou em triângulo), a uma fonte de alimentação trifásica. Os enrolamentos iniciam em P1, P2 e P3 e terminam em P2, P4 e P6, respectivamente. As tensões aplicadas de acham defasadas de 120° graus elétricos, e nas três fases resultam correntes iguais, defasadas entre si de 120° elétricos, as quais geram campos magnéticos pulsantes, que se

combinam dando um campo resultante de valor constante; este campo gira com uma velocidade constante que depende da frequência da fonte e o número de polos para os quais o estator foi enrolado.

A velocidade de rotação do campo é a velocidade síncrona, cuja expressão é:

$$n = \frac{60 f}{p} \quad (7.6)$$

sendo

n - velocidade em rpm

f - frequência da rede

p - número de pares de polos

O sentido de rotação do campo, que determina o sentido de rotação do motor, depende da sequência das tensões e das ligações das três fases, que na prática poderá ser invertido invertendo as ligações de duas fases quaisquer do estator com a linha de alimentação.

Note-se que as três fases do estator podem atuar como o primário de um transformador trifásico quando se introduz um segundo grupo de enrolamentos (rotor), acoplados indutivamente com os enrolamentos do estator.

O motor de indução trifásico é o motor de corrente alternada mais comum e de mais simples e robusta construção. Seu nome deriva do fato de que a corrente no rotor não provém diretamente de uma fonte de alimentação, mas é induzida nele pelo movimento relativo dos condutores do rotor e do campo girante produzido pelas correntes no estator.

O motor de indução consiste de duas partes principais:

1. O estator, a parte fixa, que consiste de enrolamentos alojados nas ranhuras existentes na periferia interna de um núcleo de ferro laminado (carcaça). Os enrolamentos do estator são alimentados com tensão trifásica, que produz um campo magnético que gira com velocidade síncrona.
2. O rotor, que é construído em dois tipos: (a) rotor bobinado; e (b) rotor em curto-circuito, ou gaiola de esquilo (ou simplesmente gaiola). Os núcleos magnéticos de ambos os tipos são de ferro laminado.

O rotor bobinado consta de um núcleo em tambor, provido de ranhuras onde são alojados enrolamentos semelhantes ao do estator, e produzindo o mesmo número de polos. No motor trifásico estes enrolamentos são geralmente ligados em estrela, e as três extremidades livres dos enrolamentos são ligadas a três anéis coletores montados no eixo, permitindo a inserção de resistor variável em série em cada fase.

O rotor tipo gaiola consta de um núcleo em tambor, providos de ranhuras, nas quais são alojados fios ou barras de cobre curto-circuitados nos extremos por anéis.

O princípio de funcionamento do motor de indução é o seguinte: o rotor se acha imerso no campo girante produzido pelas correntes no estator. Nos condutores do rotor, cortados pelo fluxo do campo girante, são induzidas f.e.m. que dão origem a correntes de valor igual ao quociente da f.e.m. pela respectiva impedância. Estas correntes reagem sobre o campo girante produzindo um conjugado motor que faz o rotor girar no mesmo sentido do campo.

A velocidade do rotor nunca pode atingir a velocidade do campo girante, isto é, a velocidade síncrona. Se esta velocidade fosse atingida, os condutores do rotor não seriam cortados pelas linhas de força do campo girante, não se produzindo, portanto, correntes induzidas, sendo então nulo o conjugado motor. Por isso, estes motores são também chamados assíncronos.

Quando o motor funciona sem carga, o rotor gira com velocidade quase igual à síncrona; com carga o rotor se atrasa mais em relação ao campo girante, e correntes maiores são induzidas para desenvolver o conjugado necessário.

Chama-se escorregamento, a seguinte relação:

$$s = \frac{n - n_r}{n} \quad (7.7)$$

sendo

s - escorregamento

n - velocidade síncrona

n_r - velocidade do rotor

O escorregamento é geralmente expresso em porcentagem, variando em plena carga, conforme o tamanho e o tipo do motor, de 1 a 5%.

A frequência da corrente no rotor, é o produto do escorregamento pela frequência da corrente no estator, isto é:

$$f_r = sf \quad 7.8$$

9.2.5. Conjugado

O enrolamento do rotor do motor trifásico é distribuído por todo o seu perímetro. Cada condutor atravessado por corrente, deste enrolamento, está sujeito a uma força de repulsão do campo magnético. Todas as forças são aplicadas perimetralmente e em direção tangencial. Produzirão, portanto, um momento tangencial, conforme mostrado na Figura 6. O momento devido aos pares de forças com linha de ação paralelas, de mesma intensidade e sentido opostos é chamado de binário ou conjugado (de torção)

As correntes no rotor defasam de um ângulo Θ_r , em atraso, sobre as f.e.m. induzidas no rotor (E_r), em virtude da impedância dos enrolamentos ou barras do rotor.

O conjugado desenvolvido no rotor é proporcional ao produto do fluxo, pela corrente e pelo cosseno do ângulo de defasagem:

$$C = K\Phi I_r \cos\theta_r \quad (7.9)$$

sendo

K - constante

Φ - fluxo no entreferro

No instante da partida forma-se no rotor, em virtude do escorregamento 100%, a f.e.m. mais elevada possível, e com isso, uma corrente I_r muito elevada e um campo intenso. O motor de indução nesta situação, equivale a um transformador com secundário curto-circuitado; a corrente de partida é, por isso, igual a corrente de curto-circuito e resulta assim de 3 a 8 vezes a corrente nominal. Simultaneamente porém, o enrolamento do rotor possui alta reatância no momento da partida, pois, a frequência da f.e.m. induzida no rotor é igual à da rede. Como consequência, no momento da partida, a corrente do rotor está atrasada da f.e.m. induzida de quase 90°. Nestas condições o motor de indução tipo gaiola apresenta baixo torque de partida.

9.2.6. Identificação dos motores

Os motores elétricos possuem uma placa identificadora, colocada pelo fabricante, na qual pelas normas, deve ser fixada em local bem visível.

Para instalar adequadamente um motor, é imprescindível que o instalador saiba interpretar os dados de placa. Estes dados são:

- nome e dados do fabricante
- modelo (MOD)
- potência (cv, HP, kW)
- número de fases (por exemplo, TRIFÁSICO ou 3FAS)
- tensões nominais (V)
- frequência nominal (Hz)
- categoria (CAT)
- correntes nominais (A)
- velocidade nominal (RPM)
- fator de serviço (FS)
- classe de isolamento (ISOL. CL.)
- letra-código (COD)
- regime (REG)
- grau de proteção (PROTEÇÃO IP)
- ligações

As Figuras 7a e 7b mostram exemplos de placas de identificação.

a) Categoria

Conforme as suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas em norma, e são as seguintes:

Categoria A -

Conjugado de partida normal; corrente de partida alta; baixo escorregamento (cerca de 5%). Motores usados onde não há problemas de partidas nem limitações de corrente.

Categoria B -

Conjugado de partida normal; corrente de partida normal; baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes, etc.

Categoria C -

Conjugado de partida alto; corrente de partida normal; baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado na partida, como peneiras, transportadores carregados, cargas de alta inércia, etc.

Categoria D -

Conjugado de partida alto; corrente de partida normal; alto escorregamento (mais de 5%). Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos. Usados também em elevadores e cargas que necessitam de conjugados muito altos e corrente de partida limitada.

Categoria F -

Conjugado de partida baixo; corrente de partida baixo; baixo escorregamento. Pouco usados, destinam-se a cargas com partidas frequentes, porém sem necessidade de altos conjugados e onde é importante limitar a corrente de partida.

b) Fator de serviço

O fator de serviço, é um fator que aplicado à potência nominal, indica a carga permissível que pode ser aplicada ao motor. Esse fator refere-se a uma capacidade de sobrecarga contínua, ou seja, uma reserva de potência que dá ao motor uma capacidade de suportar melhor o funcionamento em condições desfavoráveis.

c) Classe de isolamento

A classe de isolamento, indicada por uma letra normalizada, identifica o tipo de materiais isolantes empregados no isolamento do motor. As classes de isolamento são definidas pelo respectivo limite de temperatura; são as seguintes, de acordo com a ABNT:

Classe A = 105°C

Classe E = 120°C

Classe B = 130°C

Classe F = 155°C

Classe H = 180°C

d) Letra-código

A letra-código (código de partida) indica a corrente de rotor bloqueado, sob tensão nominal (Tabela 1)

e) Regime

O regime é o grau de regularidade da carga a que o motor é submetido. Os motores normais são projetados para regime contínuo, isto é, um funcionamento com carga constante, por tempo indefinido, desenvolvendo potência nominal. São previstos, por norma, vários tipos de regimes de funcionamento.

f) Grau de proteção

O grau de proteção é um código padronizado, formados pelas letras IP seguidas de um número de dois algarismos, que define o tipo de proteção do motor contra a entrada de água ou de objetos estranhos, conforme mostrado no Quadro "Os graus de proteção".

g) Ligações

A placa de identificação do motor contém um diagrama de ligações, a fim de permitir a ligação correta do motor ao sistema.

9.2.7. Partida de motores

Quando possível, a partida de um motor trifásico tipo gaiola deve ser direta (a plena tensão), por meio de um dispositivo de controle, geralmente um contator, entretanto, este método, como já vimos, exige da rede elétrica uma corrente muito elevada.

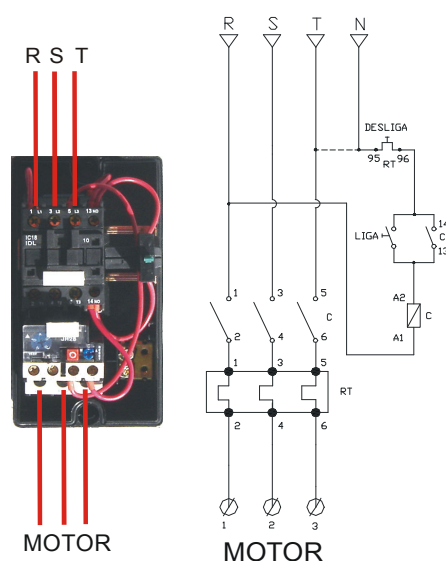


Figura 9.16: Partida direta de um motor de indução trifásico

O grande problema da partida de motores elétricos, principalmente de grande porte, é a questão da corrente de partida que é muito elevada. Essa corrente elevada pode desarmar disjuntores, danificar circuitos ou provocar oscilações de tensão na rede que pode queimar outros aparelhos ligados. Assim, a partida direta somente é viável para pequenos motores, poderíamos dizer até 5HP de potência. Acima disso é necessário utilizar algum artifício para reduzir o pico de corrente.

Basicamente existem 3 métodos que podem ser utilizados para partir grandes motores: chaves estrela triângulo, chaves compensadoras ou partida com soft starter.

a) Partida com chave estrela-triângulo

A utilização deste método, que pode ser manual ou automática, pressupõe que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, por exemplo, 127/220 V, 220/380 V, 380/660 V ou 440/760 V; os motores deverão ter no mínimo seis bornes de ligação. A figura 9.17 mostra esquematicamente o funcionamento de uma chave estrela-triângulo.

A finalidade da chave estrela triângulo é reduzir a corrente de partida do motor.

A chave funciona da seguinte maneira:

Suponha um motor para tensão nominal de 380V em ligação triângulo (a ligação triângulo é sempre aquela em que o motor fornece a potência nominal). Neste caso cada bobina interna foi projetada para desenvolver o campo magnético nominal quando for aplicada a ela uma tensão de 380V. No final o motor ficará ligado assim:

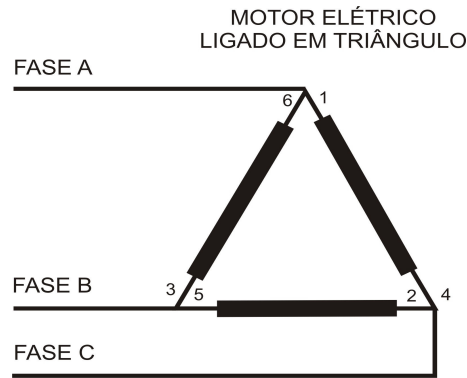


Figura 9.17: Ligação das bobinas internas de um motor de indução trifásico ligado em triângulo

Veja que há 3 bobinas dentro do motor: bobina 1-4, bobina 2-5 e bobina 3-6. Cada bobina foi dimensionada para 380V, portanto se forem ligadas as 3 fases de um sistema 220/380V como na figura acima, então o motor estará operando em potência nominal.

Agora suponha que o mesmo motor seja ligado em estrela, como mostrado na figura seguinte:

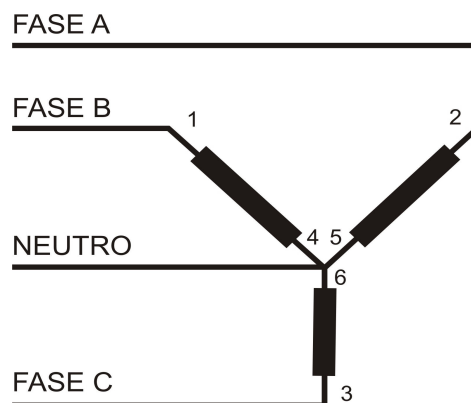


Figura 9.18: Ligação das bobinas internas de um motor de indução trifásico ligado em estrela

Note que agora a tensão de 380V não é mais aplicada sobre uma única bobina, mas sim sobre uma composição de duas bobinas. Veja que a tensão entre a fase A e a Fase B (380V) é aplicada sobre as bobinas 2-5 e 1-4, portanto não temos mais a tensão total sobre uma única bobina. Pode-se demonstrar que a tensão sobre cada bobina será de $380/\sqrt{3} = 220V$. Assim, a bobina projetada para 380V agora está recebendo 220V, ou seja, ela não está operando na tensão nominal, logo, a potência do motor nesta condição será menor, consequentemente a corrente também será menor. Seria o mesmo caso de ligar uma lâmpada projetada para 220V em uma rede de 127V; a lâmpada não iria fornecer a luminosidade para a qual ela foi projetada.

Visto isso pode-se apresentar o funcionamento de uma chave estrela triângulo:

- Toma-se um motor cuja potência nominal é conseguida com a ligação final em triângulo;
- Durante a partida liga-se esse motor em estrela. Assim ele fornece menos potência e consome menos corrente;
- Quando o motor atinge uma rotação adequada, muda-se a conexão para triângulo. Agora o motor está em regime nominal.

A figura seguinte mostra um esquema típico de força e de comando de uma chave estrela-triângulo.

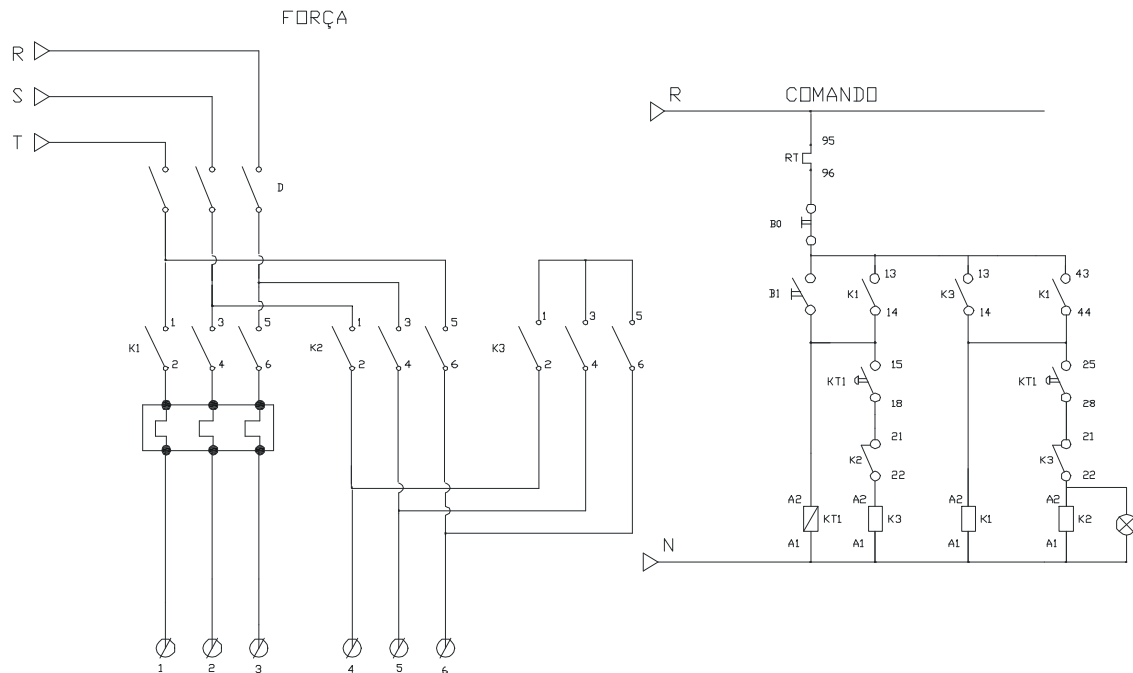


Figura 9.19: Esquema de força e de comando de uma chave estrela-triângulo

b) Partida com chave compensadora

Neste método a tensão é reduzida através de um autotransformador, que possui normalmente derivações de 50, 65 e 80% da tensão nominal.

Este modo de partida se aplica igualmente aos motores de forte potência, aos quais ele permite dar a partida com características mais favoráveis que obtidas com partida por resistência, isto devido ao fato de proporcionar um conjugado de partida mais elevado, com um pico de corrente mais fraco (reduzido).

A partida se efetua geralmente em dois tempos:

1º tempo: Alimentação do motor sob tensão reduzida, por intermédio de um autotransformador.

Desprezando-se o valor da corrente magnetizante, o pico e o conjugado na partida são reduzidos, ambos proporcionalmente ao quadrado da relação de transformação (enquanto que, na partida por resistências, o pico de corrente só é reduzido na simples relação de redução da tensão). As chaves compensadoras (partida por auto - transformadores) são previstas para um pico de corrente e um conjugado na partida, representando 0,42 ou 0,64 dos valores em partida direta, conforme o tap de ligação do auto - transformador dor 65% ou 80%, respectivamente. O conjugado motor permite atingir assim um regime elevado.

2º tempo: Abertura do ponto neutro do auto - transformador e conexão do motor sob plena tensão o qual retoma suas características naturais. Curvas características velocidade - conjugado e velocidade - corrente (valores indicado em múltiplos valores nominais).

Corrente de Partida:

Se, por exemplo, um motor na partida direta consome 100A , com o auto - transformador ligado no tap de 60% (0,6), a tensão aplicada nos bornes do motor é 60% da tensão da rede.

Com a tensão reduzida a 60%, a corrente nominal (I_N) nos bornes do motor, também é apenas 60%, ou seja, $0,60 \times 100 = 60A$.

A corrente de linha (I_L) , (antes do auto - transformador) é dada por :

U - tensão da linha (rede)

I_L - corrente da linha

$0,6xU$ - tensão no tap do auto - transformador

I_N - corrente reduzida nos bornes do motor

As Figuras 9.20 e 9.21 mostram os diagramas funcionais de partida com chave compensadora.

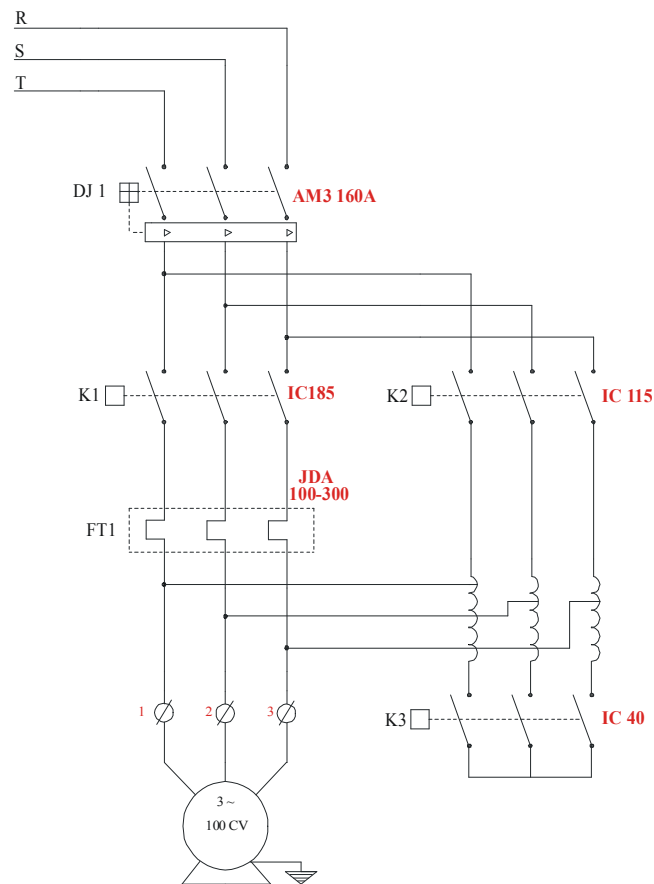


Figura 9.20: Esquema de força para partida com chave compensadora

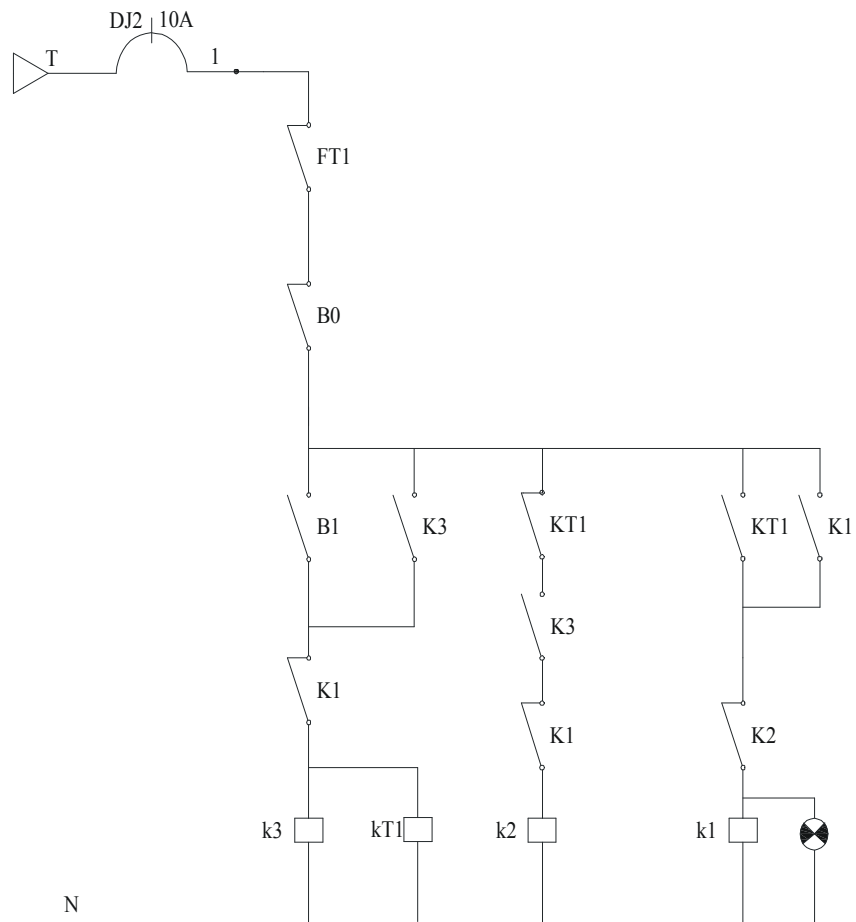


Figura 9.21: Esquema de comando para partida com chave compensadora

c) Partida com chave soft starter

Soft starter é um dispositivo de partida eletrônico que simula os auto transformadores utilizados nas partidas com chaves compensadoras. As vantagens das chaves soft starter em relação aos auto transformadores são óbvias pois estas conseguem controlar todos os parâmetros envolvidos na partida do motor (tensão, corrente, torque, potência, etc). A Figura 9.22 mostra uma típica chave soft starter.



Figura 9.22: Aspecto físico de uma chave soft-starter

Vantagens e Características

Os Soft-Starters são chaves de partida eletrônicas tiristorizadas, para partida suave de motores de indução trifásicos. Em geral, possuem:

- proteções e programação de limitação de corrente de partida e parada;
- rampa de partida ajustável, iniciando a transferência gradual de energia para o motor até atingir a corrente de partida programada, mantendo esta corrente até a partida completa do motor, eliminando os trancos nos componentes mecânicos e sobrecarga na rede elétrica durante a partida.
- funções que sob condições de baixa carga, reduzem a tensão após a partida, reduzindo deste modo as correntes de magnetização e aumentando o fator de potência em condições de baixa carga para o motor. Isto equivale a reduzir a potência nominal do motor após a partida, liberando a mesma automaticamente em caso de necessidade;

O método utilizado para a partida é o de aumento gradual da corrente (e do torque), até vencer o conjugado da carga, sendo que em seguida é limitada a corrente de partida para o valor ideal. O Soft-Starter foi concebido para ser simples de se utilizar. No modo mais simples, basta ligar a força, o motor, um botão “Liga” e um botão “Desliga”. É mais leve, mais barato e menor que uma chave compensadora correspondente.

O Soft-Start apresenta inúmeras vantagens em relação aos métodos estrela-triângulo, compensadora e partida direta:

- Dimensões reduzidas.
- Reduz a corrente de partida.
- Reduz os trancos e golpes no sistema mecânico.
- Possibilita partida de motores com qualquer tipo de carga (incluindo cargas pesadas).
- Não tem partes móveis, o que reduz a manutenção.
- Aumenta a vida útil do motor.
- Possui várias proteções e sinalizações incorporadas.
- Desligamento automático no caso de sobrecarga aplicada ao eixo do motor.
- Possui ajustes que possibilitam adequar perfeitamente o módulo às condições da carga.
- Não necessita uso de motor especial.
- Alto número de manobras = 20/hora para tipos normais, 10/hora para tipos Bypass
- Possibilidade de Soft Stop (Parada Suave).
- Possibilidade de uso de Energy Saver (Economiza energia e melhora o fator de potência).
- Possibilidade de detecção de cavitação em bombas.
- Indicações de “Pronto para partida”, “Rampa” e “Fim de partida”.

9.3. Alteração da rotação em motores de assíncronos

Conforme já visto anteriormente, os motores de indução tem uma estreita relação de velocidade com seu tipo construtivo (número de polos) e com a frequência da rede elétrica. A única alteração na rotação obtida sem o auxílio de algum dispositivo próprio é produzida pelo escorregamento porém esta não tem controle. A fórmula básica para a rotação do motor é a seguinte:

$$n_s = \frac{f}{p} (rps) \text{ ou } n_s = 60 \frac{f}{p} (rpm)$$

Onde: n_s = rotação em RPM

f = frequência da rede

P = número de polos do enrolamento

Pode-se observar que as únicas maneiras de alterar a rotação são através da alteração do número de polos, que é impossível após o motor haver sido construído, ou através da alteração da frequência da rede elétrica.

No passado existiam vários sistemas mecânicos, do tipo caixa de câmbio, que possibilitava alteração na rotação do motor, porém, mesmo assim as rotações obtidas eram sempre de acordo com a relação de engrenagens da caixa.

Atualmente a alteração na rotação do motor é obtida através de um dispositivo eletrônico chamado de *conversor de frequência* ou, impropriamente chamado por alguns de *inversor de frequência*. O nome *inversor de frequência* vem da tradução direta do inglês *frequency inverter*, que não possui o mesmo sentido em português.

Baseada na performance dos acionamentos de corrente contínua, a tecnologia de conversores de corrente alternada evoluiu proporcionando características de controle de velocidade e de torque aos motores assíncronos trifásicos, usufruindo dos benefícios de custo e manutenção desses motores. Além disso, os motores assíncronos trifásicos possuem vantagens de tamanho em relação aos motores de corrente contínua (tanto no seu diâmetro quanto no seu comprimento) que, por consequência, proporciona uma vantagem em relação a diminuição de seu peso total, além de ter um grau de proteção maior (que garante uma maior proteção ao motor).

O primeiro passo dessa evolução foram os Conversores de Frequência com controle ESCALAR (ou V/f) e chaveamento PWM (Pulse Width Modulation).

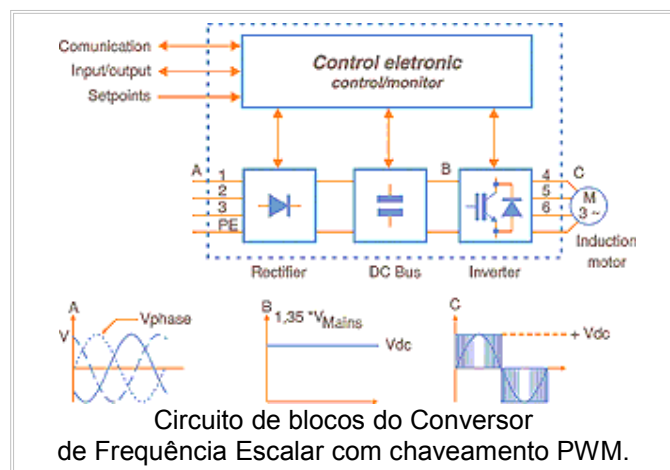


Figura 9.23: Diagrama de blocos de um conversor de frequência escalar com PWM

A tecnologia do modo de controle de velocidade escalar se baseia na utilização das variáveis de controle: Tensão [V] e Frequência [f].

Alimenta-se o Conversor de Frequência com tensão trifásica senoidal e frequência de rede (60 Hz). Esta tensão de entrada é retificada no primeiro bloco do conversor, o bloco Retificador (composto por um retificador trifásico), transformando a tensão alternada trifásica senoidal de entrada em tensão contínua com intensidade igual a $1,35 \times V$ entrada.

Essa tensão de corrente contínua alimenta diretamente o Circuito Intermediário do conversor, que é constituído pelo barramento de corrente contínua, pelo banco de capacitores e pelo Circuito Chopper de Frenagem, além do Circuito Intermediário. O Retificador também fornece tensão de alimentação para o Circuito de Controle do Conversor de Frequência, circuito este que é o responsável pelo controle de

velocidade propriamente dito e pelo monitoramento das entradas e saídas do equipamento (analógicas e digitais).

O Circuito Intermediário alimenta o terceiro bloco do Conversor de Frequência, o bloco Inversor. Isso mesmo, este é o bloco responsável pela inversão do sinal retificado de corrente contínua em sinal alternado.

Composto por circuitos IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor – Transistor bipolar de base isolada), é o bloco Inversor o responsável direto pelo fornecimento da forma de onda PWM de saída do Conversor de Frequência. Veja as figuras abaixo.



Figura 9.24: Aspecto dos módulos IGBT

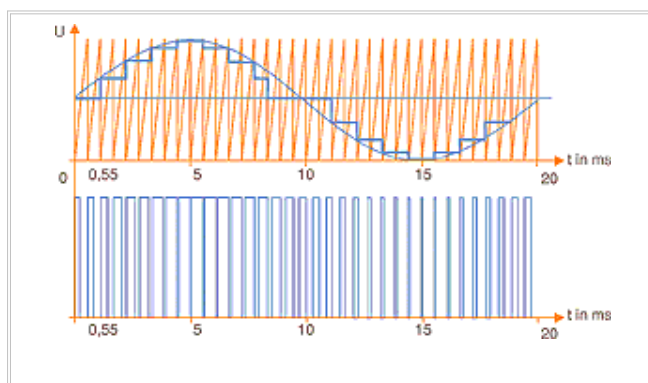


Figura 9.25: Descrição do processo PWM Senoidal

A forma de onda PWM é gerada através do chaveamento sincronizado dos circuitos IGBT, os quais são compostos por transistores montados no mesmo sentido de condução que, através de um sinal de gatilho, entram em condução. Esta condução é controlada através deste gatilho e este controlado pelo Circuito de Controle do conversor.

O sincronismo dos disparos nos gatilhos dos IGBTs, também é comandado através do Circuito de Controle do conversor de frequência. Sua intensidade e frequência de chaveamento determinam a característica e a qualidade da forma de onda de saída fornecida ao motor.

No modo de controle Escalar (também conhecido por V/f) são utilizadas, como variáveis, a Tensão e a Frequência, as quais são aplicadas diretamente à bobinagem do estator do motor assíncrono trifásico fornecendo ao motor uma relação V/f correspondente.

Esta relação de V/f, ou seja, tensão por frequência, é fornecida de forma proporcional, limitados até a frequência de inflexão (frequência da rede) e tensão de alimentação do conversor (também tensão da rede).

Após a frequência de inflexão (no caso do Brasil, igual a 60 Hz), os conversores de frequência têm a capacidade de elevar a frequência de saída, porém a limitação fica por conta da tensão (limitada à da rede).

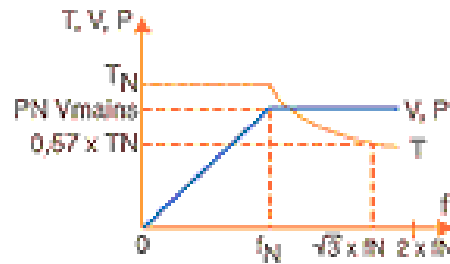


Figura 9.26: Relação V x f para conversor escalar

Curva V/f ,onde: T_N = Torque Nominal, V_{nom} = Tensão Nominal, f_N = Frequência Nominal.

Como visto na figura acima, até a frequência f_N (frequência nominal de rede = 60 Hz) também chamada de frequência de inflexão e tensão nominal (V_N), o torque (T_N) é constante e, acima do valor de rede, ocorre a redução do torque do motor de forma exponencial.

A queda do torque do motor assíncrono trifásico ocorre devido às características físicas do motor e não do conversor, mas como através do modo de controle Escalar não é possível efetuar o controle de torque, não há a possibilidade de corrigir esse efeito no motor.

Algo similar ao torque ocorre à potência do motor (PN): com o aumento da relação tensão e frequência , a potência aumenta proporcionalmente até a frequência f_N (Frequência Nominal = 60 Hz) chegando, nesse instante, à potência nominal do motor e a partir daí, mesmo que se aumente a frequência (desde que não se aumente a tensão de rede - alimentação do conversor) a potência do motor permanece a mesma.

Há a possibilidade de ajustes de otimização da curva através de parâmetros. Os parâmetros Boost, I_xR e Escorregamento (compensação), são alguns destes parâmetros de otimização. Esta otimização tem por objetivo garantir alto torque em baixas frequências de saída. São responsáveis respectivamente por:

Boost

Aumento da tensão de saída na faixa de frequência abaixo da frequência de inflexão para aumentar o torque de partida.

I_xR

Alteração da curva característica V/f em função da carga.

Escorregamento

O ajuste do escorregamento do motor é feito de acordo com a rotação nominal do motor utilizado e sua compensação é inserida em rotações por minuto ou num comparativo em frequência

A maioria dos conversores de frequência são pré-ajustados de fábrica, normalmente são ajustes com valores médios para atender a uma gama de motores. Há também a possibilidade de se otimizar alguns ajustes e estes podem ser alterados através de software de comunicação PC-Conversor ou por meio de um controle manual acoplado ao conversor de frequência

Estes ajustes visam ajustar da melhor maneira possível, as características do motor e sua aplicação ao Conversor de Frequência

Supor, agora, uma situação hipotética onde haja um transportador simples cuja característica é de conjugado exigido constante em toda a faixa de rotação e acima da frequência de inflexão, lembrando que ainda não conhecemos o modo de controle Vetorial. Por outro lado, a faixa de rotação exigida no eixo do motor é de 400 a 2000 rpm e o conjugado exigido nessa faixa é de 14 Nm.

1) Calcular a potência exigida.

$$P = M(\text{Nm}) \times n(\text{rpm}) / 9550$$

$$P = 14 \times 2000 / 9550$$

$$P = 2,93 \text{ kW}$$

2) Selecionar o motor e o conversor de frequência

Motor

Potência (próxima à exigida, calculada anteriormente) 3,00[kW], número de polos 4, rotação 1720 [rpm] e tensão de alimentação 380[V]

Conversor de Frequência Escalar

Potência do conversor compatível com a selecionada para o motor 3,00[kW], tensão de alimentação de acordo com a rede de alimentação 380[V].

3) Escolher a curva de funcionamento do conversor de frequência

4) Determinar a faixa de frequência de trabalho do motor.

Para 400 rpm:

$$(400 / 1720) \times 60 = 13,9 \text{ Hz}$$

Para 2000 rpm:

$$(2000 / 1720) \times 60 = 69,8 \text{ Hz}$$

Logo, a faixa de trabalho do motor será de 13,9 Hz a 69,8 Hz.

5) Determinar o conjugado fornecido pelo motor na faixa de 13,9 Hz a 69,8 Hz:

$$C_n = 9550 \times P_n / n_m$$

$$C_n / C_{\text{max}} = 3$$

$$C_{\text{max}} = 50 \text{ Nm}$$

$$C_n = 3 \times 9550 / 1720$$

$$C_n = 16,7 \text{ Nm}$$

Portanto, na faixa de 400 a 1720 rpm, o motor pode fornecer $C_n = 16,7 \text{ Nm}$ e $C_{\text{max}} = 50 \text{ Nm}$, satisfazendo a aplicação.

Para 60Hz:

$$C_n = 16,7 \text{ Nm e } C_{\text{max}} = 50 \text{ Nm}$$

Para 69,8Hz:

$$C_n = C_n(60\text{Hz}) \times 60 / 69,8 \text{ e } C_{\text{max}} = C_{\text{max}}(60\text{Hz}) \times (60 / 69,8)^2$$

$$C_n = 16,7 \times 0,86 \text{ e } C_{\text{max}} = 50 \times 0,7389$$

$$C_n = 14,4 \text{ Nm}$$

$C_{max} = 36,9 \text{ Nm}$

Por conseguinte, o conversor pode fornecer, na faixa de trabalho de 13,9 Hz a 60 Hz e de 60 a 69,8Hz, o conjugado exigido pela carga que é de 14 Nm.

O MODO DE CONTROLE VETORIAL

No funcionamento dos Conversores de Frequência Escalares (V/f) utiliza-se basicamente da tensão de saída (V) e da frequência de saída (f) para controle e variação de velocidade.

Apesar de eficiente, o modo de controle Escalar (V/f) possui algumas limitações :

- Não usa a orientação do campo magnético.
- Ignora as características técnicas do motor.
- Não possui controle de torque.
- Possui baixa dinâmica .

Visando melhorar a performance e as condições de funcionamento dos Conversores de Frequência Escalares foi desenvolvido um novo modo de controle, o VFC - Voltage Flux Control, ou seja, um modo de controle que, diferentemente do modo Escalar, efetua a leitura da corrente do estator e do modelo matemático do motor e assim define o escorregamento, que é corrigido através do controle da tensão do estator, por meio de funções específicas já gravadas internamente no microprocessador MC do conversor de frequência Observe a figura abaixo.

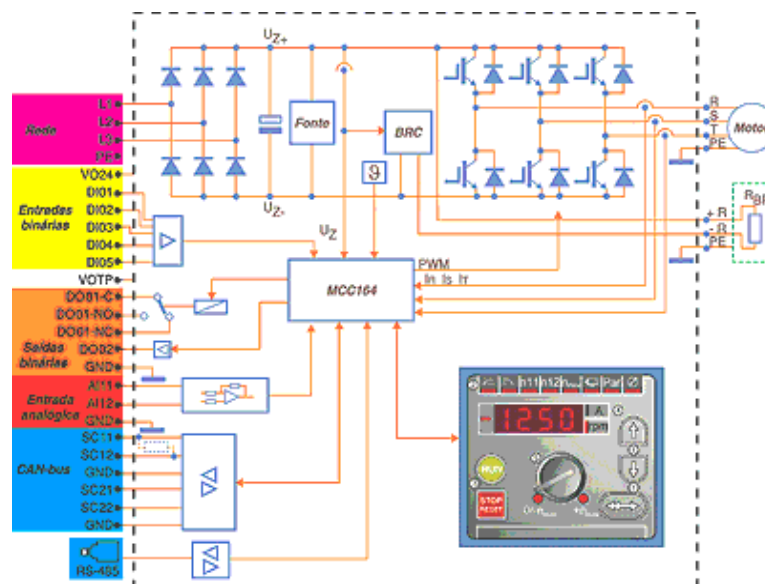


Figura 9.27: Diagrama de blocos para conversor de frequência vetorial

Com o modo de controle por corrente (CFC), tanto sua dinâmica quanto sua performance (motor assíncrono trifásico), com realimentação por encoder, ficam similares às de servomotores síncronos.

Em um comparativo entre os dois modos de controle (Voltage Flux Control & Current Flux Control), ambos vetoriais, em malha fechada (com realimentação através de encoder), pode-se notar claramente a evolução em dinâmica proporcionada pelo modo de controle por corrente.

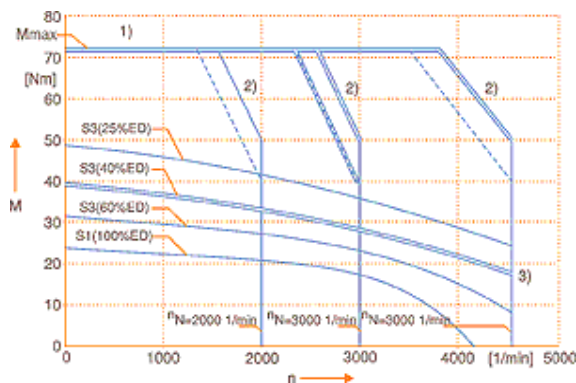


Figura 9.28: Controle vetorial

Outro aspecto importantíssimo da nova geração de conversores de frequência consiste em sua metodologia de Colocação em Operação, bem simples e rápida, baseando-se na utilização de softwares de parametrização que, além de possibilitarem a comunicação com qualquer PC de modo elementar viabilizando a otimização perfeita das características do motor de acordo com as reais necessidades da carga, proporcionam ao motor dinâmica, estabilidade e precisão.

Nesses softwares já estão incluídos os modelos matemáticos dos motores assíncronos trifásicos, não sendo necessário incluir nenhum dado, apenas selecionar seu modelo e sua tensão de alimentação de acordo com os dados contidos na plaqueta do próprio motor.

A dinâmica oferecida a esses motores é em função do seu modo de controle vetorial, que é o responsável direto pelo modelamento do fluxo magnético do motor (F).

No ambiente de parametrização, são selecionados os motores utilizados, o modo de operação desejado e são introduzidas as informações básicas como o tipo do motor, tensão, frequência e corrente. A partir desse ponto, são fornecidos ao sistema os dados do modelamento matemático do motor e são calculados os parâmetros usuais e de controle, resultando numa otimização da performance do motor.

Alguns softwares possibilitam efetuar a programação e controle de movimentos sequenciais através de programação em Assembler, Ladder, C++, entre outras, comuns às utilizadas nos Controladores Lógicos Programáveis, **inclusive com funções e blocos lógicos.**

9.4. Potência necessária de um motor

A escolha de um motor para uma determinada aplicação é uma tarefa que exige o conhecimento de inúmeros dados relativos à operação que se tem em vista. Assim, por exemplo, podemos necessitar de uma operação contínua com carga variável (casos de bomba d' água) ou operação contínua com carga variável (casos de compressores de ar); também podemos ter operações descontínuas, com variação e inversão de rotação; em suma, é um problema que deve ser estudado em detalhe pelo instalador.

Para exemplificar, calculemos a potência necessária para motor de guincho, de acordo com os dados do esquema da Figura 9.

Dados:

- Relação de engrenagens = $1/10 = 0,1$;
- Rendimento de transmissão mecânica: 45%;
- Carga = 800 kg (incluindo o peso do cabo e roldana);
- Velocidade do cabo = 45 metros por minuto (a da carga será a metade);
- Diâmetro do tambor: 0,40 m;
- Diâmetro do volante: 0,60 m;
- Diâmetro da polia do motor: 0,15 m.

Aplicando os dados na equação (7.11) temos:

$$F' = 800/2 = 400 \text{ kg}$$

$$F = 400/0,45 = 890 \text{ kg}$$

$$P = (890 \times 45) / (75 \times 60) = 8,9 \text{ cv}$$

Cálculo da rotação necessária do motor:

- Rotação do tambor:

$$n_1 = 45 / (3,14 \times 0,40) = 36 \text{ rpm}$$

- Rotação do volante:

$$n_2 = 36 / 0,1 = 360 \text{ rpm}$$

- Rotação do motor:

$$n = 360 \times 0,60 / 0,15 = 1440 \text{ rpm}$$

Motor escolhido: 10 HP - 1440 rpm - 4 polos de indução

9.5. Regras práticas para escolha de um motor

Embora o assunto mereça um estudo mais profundo, em especial para grandes potências, podemos sugerir a seguinte sequência, para a escolha de um motor:

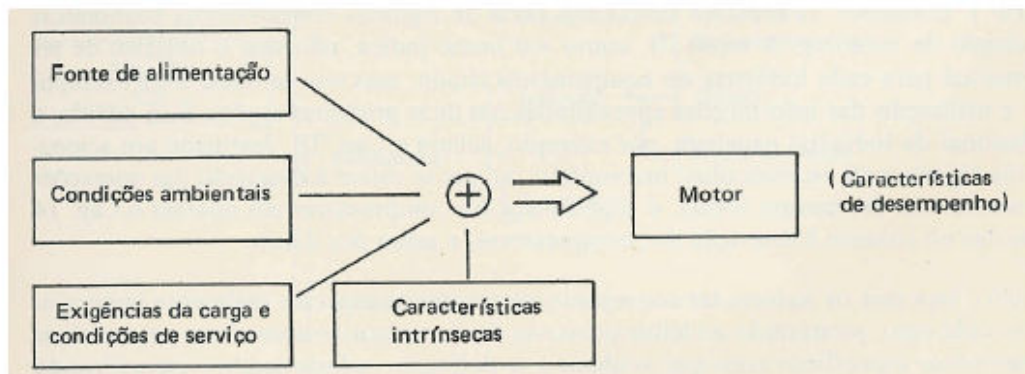


Figura 9.29: Escolha do motor elétrico de acordo com as condições de trabalho

- Dados sobre a fonte de energia: contínua ou alternada, monofásica ou trifásica, frequência
- Potência necessária: deverá ser a mais próxima possível da exigência da carga .

Fórmulas:

$$P = \frac{FV}{75} = \frac{CN}{716} \quad (7.10)$$

sendo

- potência em CV

- força em kg

v - velocidade em m/s
 c - conjugado em kgm
 n - rotação em rpm

$$P = \frac{TN}{5250} \quad (7.11)$$

sendo

P - potência em HP

T - conjugado ou torque em lb-ft

n - rotação em rpm

c. Elevação de temperatura: na placa do motor, obtém-se dados sobre a elevação de temperatura permissível, em geral 40°C. Caso não haja indicação, não permite elevação. Os motores a prova de pingos permitem sobretemperatura de 40°C e os à prova de explosão, 55°C. Um aumento de 10°C acima do permitido diminui 50% da vida do isolamento.

d. Fator de serviço: tendo em vista a economia, pode-se escolher um motor com potência um pouco inferior à máquina operatriz, sem o mesmo risco, desde que a tensão, número de fases e a frequência sejam nominais.

e. Velocidade do motor: precisa-se saber se o acoplamento do motor à máquina acionada é direto ou indireto (engrenagens, caixas redutoras, polias com correias ou cabos). Os dados de placa do motor referem-se à rpm em plena carga; em vazio, a rotação dos motores de indução é ligeiramente superior. A maioria dos motores, emprega-se a rotação constante. (Ex. bombas, compressores, ventiladores, tornos, etc.) Quando há necessidade de variar a rotação pode-se usar: para pequenas potências (fração de HP), reostato divisor de tensão, e para potências maiores, motores de corrente contínua ou de indução com rotor bobinado. Se o motor aciona a máquina operatriz por meio de correia, deve-se manter a correia razoavelmente frouxa, pois correias muito apertadas se estragam, além de danificar os mancais e o motor; elas aumentam a potência necessária à máquina. A Tabela 2 ajudará na escolha das polias para diferentes velocidade na máquina operatriz. Esta Tabela é para um motor de

f. Torque ou conjugado: precisa-se saber se o motor parte em vazio ou em carga, para escolhermos um motor de baixo ou alto conjugado de partida. Segundo a ABNT os motores de baixo conjugado de partida são da categoria B e os de alto conjugado de partida, categoria C (vide item Categoria). Deve-se escolher sempre um motor com um conjugado máximo pelo menos 30% maior que os picos de carga. A Tabela 3 fornece os conjugados máximos dos motores de 60 Hz, com uma velocidade.

É evidente que, para escolha mais criteriosa do motor necessita-se conhecer o comportamento da carga; durante a fase de partida, isto é, desde o repouso até a velocidade nominal, o motor deverá desenvolver um conjugado, que deverá ser a soma do conjugado da carga e do conjugado de aceleração.

$$C_M = C_c + C_a \quad (7.12)$$

sendo

C_c - conjugado motor

C_c - conjugado da carga

C_c - conjugado da aceleração

Na rotação nominal $C_a = 0$ e na desaceleração C_a é negativo.

g. Tipo de carcaça: conforme o ambiente em que vai ser usado, o motor deve ser especificado com as seguintes características:

- à prova de explosão: destina-se a trabalhar em ambiente contendo vapores etílicos de petróleo, gases naturais, poeira metálica, explosivos, etc.
- totalmente fechados: em ambientes contendo muita poeira, corrosivos e expostos ao tempo.
- à prova de pingos: para ambientes normais de trabalho razoavelmente limpos, tais como residências, edifícios, indústrias, etc.

	Corrente alternada	Corrente contínua	
Velocidade aproximadamente constante, desde a carga zero até a plena carga.	Motor de Indução síncrono	Motor Shunt	
Velocidade semi-constante da carga zero até a plena carga	Motor de indução com elevada resistência do rotor	Motor Compound	
Velocidade decrescente com o aumento de carga	Motor de indução com a resistência do rotor ajustável	Motor Série	
Tipo	Velocidade	Conjugado de Partida	Emprego
Motor de Indução de Gaiola, Trifásico	Aproximadamente constante	Conjugado baixo, corrente elevada	Bombas, ventiladores, máquinas e ferramentas
Motor de Indução de Gaiola com elevado Deslizamento	Decresce rapidamente com a carga	Conjugado maior do que o do caso anterior	Pequenos guinchos, pontes rolantes, serras etc.
Motor Rotor Bobinado	Com a resistência de partida desligada, semelhante ao primeiro caso. Com a resistência inserida, a velocidade pode ser ajustada a qualquer valor, embora com sacrifício do rendimento.	Conjugado maior do que os dos casos anteriores	Compressores de ar, guinchos, pontes rolantes, elevadores etc.

9.6. Máquina síncrona

A máquina síncrona é um dispositivo essencialmente reversível, isto é, sem nenhuma modificação, tanto pode operar como motor ou como gerador.

9.6.1. Motor síncrono

Como os motores de indução, os motores síncronos possuem enrolamentos no estator que produzem o campo magnético girante, mas, o circuito do rotor de um motor síncrono é excitado por uma fonte de corrente contínua proveniente de uma excitatriz, que é um pequeno gerador de corrente contínua. A Figura 9.30 mostra o desenho da estrutura básica de um motor síncrono.

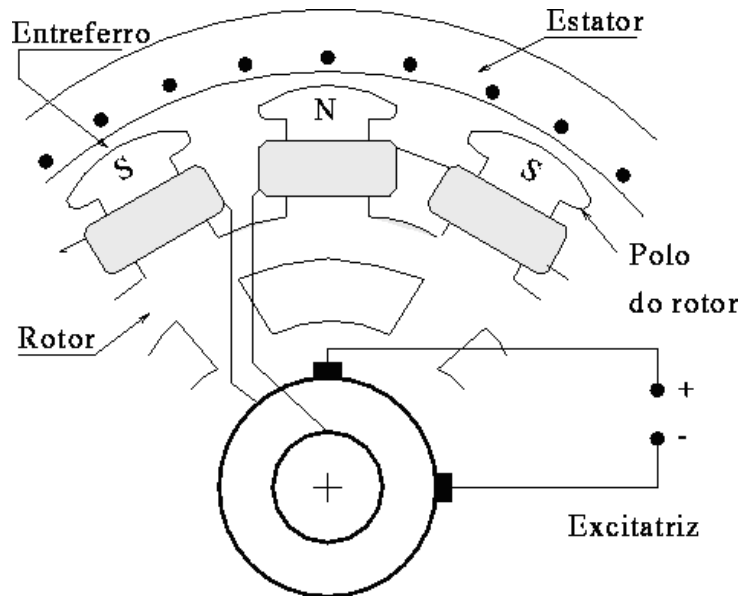


Figura 9.30: Componentes de um motor síncrono

O motor síncrono não tem partida própria, necessitando, portanto, que o rotor seja arrastado até a velocidade síncrona por um meio auxiliar. Existem motores em que a partida é dada por condutores em gaiola embutidos na face dos polos do rotor. Inicia-se a partida como motor de indução e no momento certo excita-se os polos do rotor e o motor entra em sincronismo. A velocidade final do motor é dada por:

$$n_s = \frac{f}{p} (rps) \text{ ou } n_s = 60 \frac{f}{p} (rpm)$$

Onde: n_s = rotação do motor em RPM
 f = frequência da rede elétrica
 p = número de polos do enrolamento

9.6.2. Efeito da carga e da corrente de excitação

a) Motor síncrono sem carga

No motor síncrono o rotor engata-se magneticamente para acompanhar o campo girante, criado no estator, e deve continuar a girar em sincronismo qualquer que seja a carga. A Figura 9.31 mostra a posição do rotor sem carga

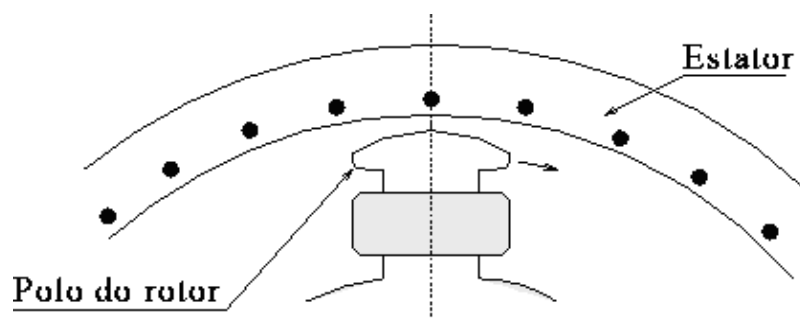


Figura 9.31: Motor síncrono sem carga

Consideremos um motor sem carga com velocidade síncrona. A corrente de excitação poderá ser ajustada para que a *fem induzida* (*fcem*) seja praticamente igual à tensão aplicada ($E = V$). Neste caso nenhuma corrente é absorvida da rede. A Figura 9.32 mostra os fasores das tensões.

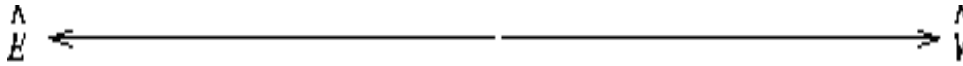


Figura 9.32: Fasores do motor síncrono sem carga

A variação da corrente de excitação dá ao motor síncrono a capacidade de poder funcionar com fator de potência unitário, ou em avanço ou em atraso, sendo esta propriedade uma das notáveis vantagens que este motor apresenta, permitindo que ele funcione no sistema comportando-se como um reator ou um capacitor.

Se a corrente de excitação for insuficiente para gerar um fluxo capaz de produzir nos condutores do estator uma *fem* igual e oposta à tensão aplicada, uma corrente *irá* circular nos condutores do estator tal que o campo por ela produzido combinado com o campo produzido pela corrente de excitação possam gerar nos condutores do estator uma *fem* igual e oposta à tensão aplicada. A Figura 9.33 mostra os fasores para esta situação.

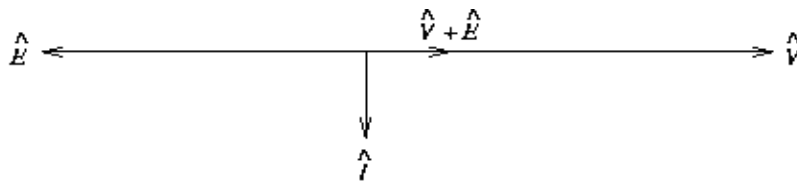


Figura 9.33: Fasores do motor síncrono sem carga e subexcitado

A corrente I fica defasada de 90° (em atraso) da tensão $V+E$, pois o circuito é indutivo. Em relação a tensão aplicada V esta corrente também fica atrasada de 90° . Assim, podemos dizer que um motor síncrono subexcitado se comporta como um indutor.

Se, agora, considerarmos o motor síncrono sobre-excitado a *fem* induzida E se tornará maior do que a tensão aplicada V ; e, nesta hipótese, $V+E$ inverte o seu sentido, como mostra a Figura 9.34.

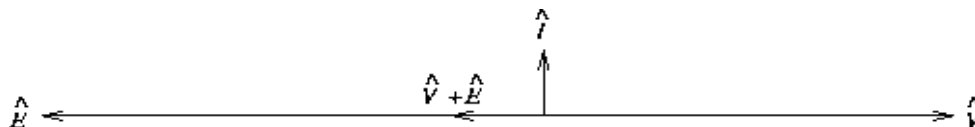


Figura 9.34: Fasores do motor síncrono sem carga e sobre excitado

Em relação a tensão aplicada V a corrente I fica adiantada de 90° , e nesta situação o motor síncrono se comporta como um capacitor.

Vê-se, portanto, que o campo produzido pela corrente no estator ou ajuda ou se opõe ao campo criado pela corrente de excitação de modo a manter constante o fluxo no entreferro.

Devida a esta versatilidade o motor síncrono é utilizado em sistema de potência para controle da tensão.

b) Motor síncrono com carga

A velocidade do motor síncrono não diminui quando funciona com carga, pois sua velocidade é essencialmente constante e igual a velocidade síncrona.

Considerando $V = E$ e colocando carga no motor síncrono, a sua velocidade tende a diminuir momentaneamente e ocorrerá um deslocamento angular entre os polos do rotor e o estator de um ângulo α (chamado de ângulo de torque), como mostra a Figura 9.35.

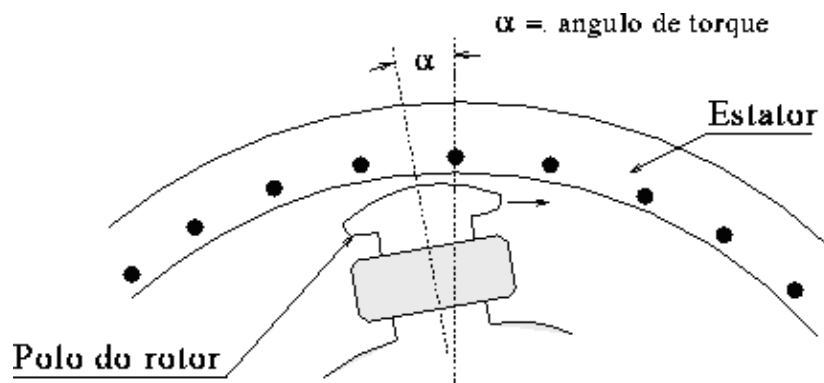


Figura 9.35: Motor síncrono com carga

As tensões V e E não mais estarão em sentidos opostos. A tensão resultante $V+E$ fará com que uma corrente I flua no enrolamento do estator e estará defasada de aproximadamente 90° , devido a alta indutância dos enrolamentos do estator. A Figura 9.36 mostra os fasores nesta situação.

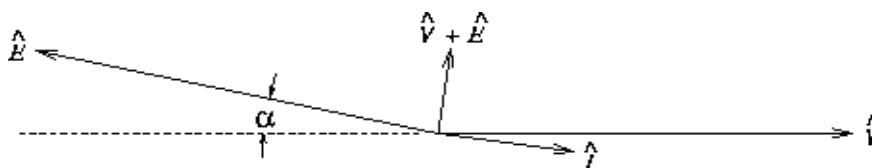


Figura 9.36: Fasores do motor síncrono com carga

Um aumento da carga resulta num grande ângulo de torque, que produz um aumento de $V+E$ e I . O rotor perde o sincronismo caso uma carga excessiva seja imposta ao eixo do motor, causando a sua parada.

O maior conjugado que o motor pode fornecer está limitado pela máxima potência que pode ser cedida antes da perda de sincronismo do rotor;

O valor máximo de potência eletromagnética, é função da corrente de excitação;

A excitação determina também as percentagens de potência ativa e reativa que o motor retira da rede.

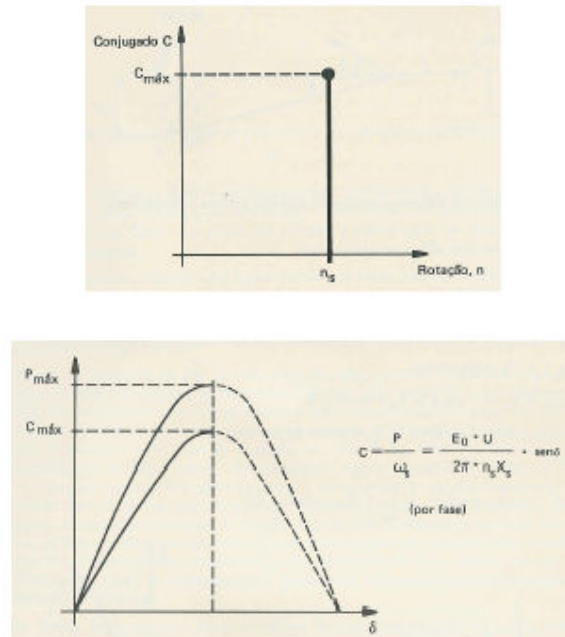


Figura 9.37: Variação da potência ativa e conjugado com ângulo de potência.

c) Vantagens do motor síncrono.

1. O rendimento do motor síncrono é maior que o do motor de indução equivalente, particularmente em baixas rotações;
2. Motores síncronos podem operar com fator de potência capacitivo ou unitário;
3. A rotação é rigorosamente constante com a frequência de alimentação.

d) Partida de motores síncronos.

1. Motor auxiliar - geralmente motor de indução de anéis; este método é empregado para partida de grandes motores síncronos;
2. Conversor de frequência – neste método o motor parte sincronicamente a uma frequência variável e crescente, provida por um conversor eletrônico;
3. Partida assíncrona através da gaiola de amortecimento, construída em ranhuras das sapatas polares. Este é o método mais comum.

9.7. Gerador síncrono (alternador)

O gerador síncrono tem os mesmos componentes do motor síncrono. A diferença é que impõe-se uma rotação constante no seu eixo. O campo produzido nos polos do rotor corta os condutores dos enrolamentos dos estatores, gerando neles as tensões induzidas.

Este tipo de máquina tem uma importância fundamental na geração da energia elétrica, sejam em usinas hidroelétricas ou em termoelétricas com qualquer capacidade.

9.8. Motor de corrente contínua

a) Princípios de operação e características

Motores de velocidade ajustável;

Varia-se a velocidade variando a tensão de armadura e/ou variando o fluxo de entreferro excitação);

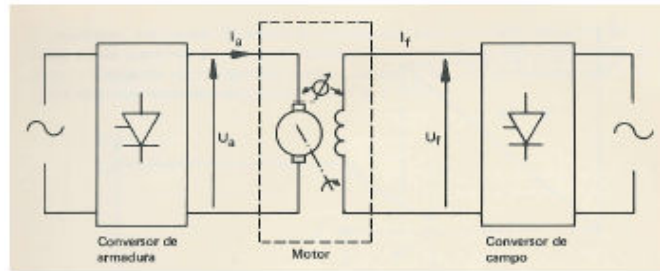


Figura 9.38: Esquema básico de ligação do motor CC.

A velocidade é diretamente proporcional à tensão de armadura, até a velocidade nominal, para fluxo de entreferro constante.

$$n = K_1 \left[\frac{U_a - R I_a}{\phi} \right] \cong K_1 \frac{U_a}{\phi}$$

Onde:

R – Resistência da armadura;

K1 – Constante;

Ua – Tensão de armadura;

Φ – Fluxo

Também para o fluxo no entreferro constante, o conjugado eletromagnético é diretamente proporcional à corrente de armadura.

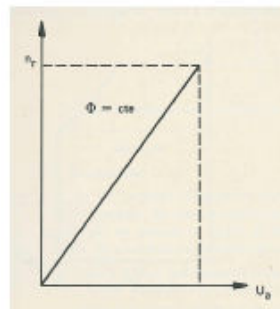


Figura 9.39: Curva da velocidade em função da tensão de armadura para fluxo constante.

Também para o fluxo no entreferro constante, o conjugado eletromagnético é diretamente proporcional à corrente de armadura.

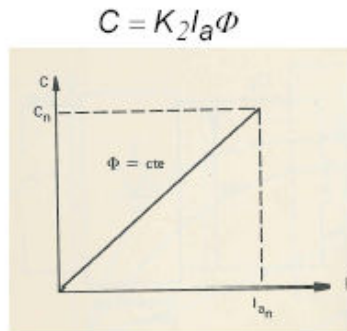


Figura 9.40: Variação do conjugado com a corrente de armadura para fluxo constante.

O fluxo é, em princípio, proporcional à corrente de campo (corrente de excitação Figura 7.25); A velocidade do motor é inversamente proporcional ao fluxo do entreferro (tensão de armadura constante Figura 9.41)

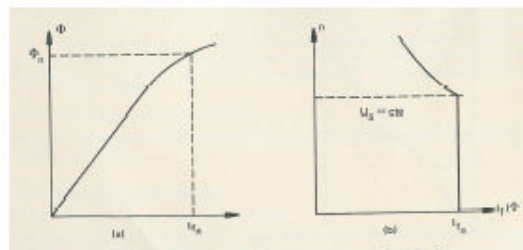


Figura 9.41: Curva do fluxo (a) e rotação (b), em função da corrente de excitação.

A utilização do motor de corrente contínua acima da nominal é feita mantendo-se a corrente nominal. Nessas condições, com a diminuição do fluxo, o conjugado eletromagnético também diminui, enquanto que a potência eletromagnética permanece constante.

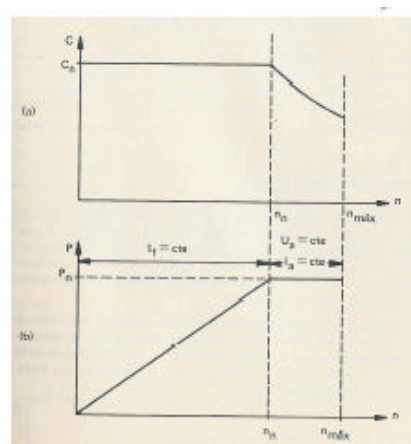


Figura 9.42: Variação do conjugado (a) e potência (b) com a rotação.

b) Tipos de excitação

Características de funcionamento profundamente afetadas pelo tipo de excitação prevista;

c) Motor série

As bobinas de campo ficam em série com o enrolamento de armadura, assim, só haverá fluxo no entreferro da máquina quando a corrente de armadura for diferente de zero (máquina carregada); Sendo o fluxo praticamente proporcional à corrente de armadura, o conjugado será uma função quadrática da corrente.

Tem elevado conjugado em baixas rotações e velocidade elevada com o motor a vazio

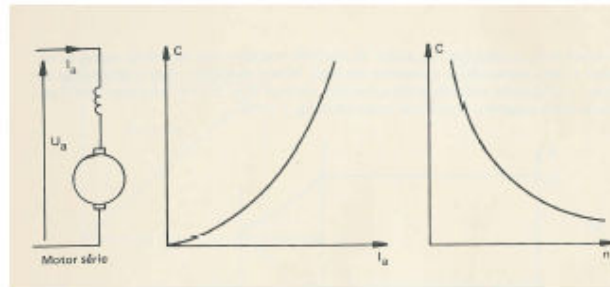


Figura 9.43: Diagrama elétrico e curvas características do motor série.

d) Motor excitação composta

Os riscos de elevadas rotações com baixas correntes de carga, podem ser eliminados se o motor série é provido de um enrolamento de campo independente que assegure um certo fluxo mínimo, mesmo com o motor a vazio; Esta máquina tem características intermediárias entre o motor série e o motor excitação independente.

e) Vantagens e desvantagens dos motores de corrente contínua.

Vantagens

- Flexibilidade;
- Simplicidade;
- Altos conjugados;
- Ampla faixa de velocidades.

Desvantagens

- Maior relação volume x potência;
- Necessidade constante de manutenção;
- Comutador mecânico.

10. SISTEMAS UPS (Uninterruptible Power Supply) – No-breaks

10.1. Introdução

De uma forma geral, os sistemas ininterruptos de energia, conhecidos popularmente no Brasil como Nobreaks, possuem como função principal fornecer à carga crítica energia condicionada (estabilizada e filtrada) e sem interrupção, mesmo durante uma falha da rede comercial.

Ao receber a energia elétrica da concessionária, o Nobreak transforma esta energia não condicionada, isto é; abundante em flutuações, transitórios de tensão e de frequência, em energia condicionada, onde as características de tensão e frequência são rigorosamente controladas. Desta forma oferece parâmetros ideais, o que é fundamental para o bom desempenho das cargas críticas (sensíveis).

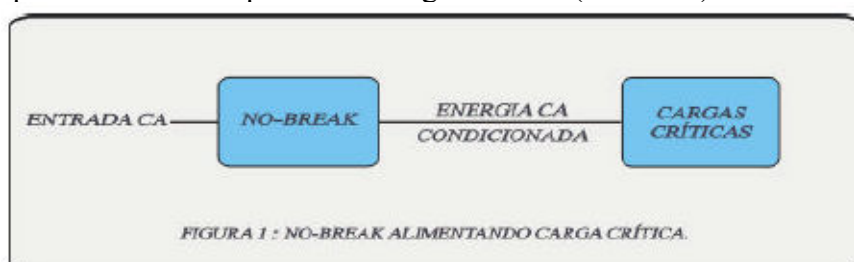


Figura 10.1: Alimentação com no-break

Transitórios e deformações da forma de onda de tensão, variações de frequência e mini interrupções (duração de até 0,1 segundo) dependem de uma série de fatores, tais como: proximidades de cargas reativas ou não lineares (retificadores controlados), comutação de cargas na rede, descargas atmosféricas, ruídos, sobrecargas, curtos-circuitos, etc.

Estes fenômenos perturbam a operação e comprometem a confiabilidade dos sistemas computacionais. De acordo com sua magnitude podem afetar até o hardware pela danificação de semicondutores, discos rígidos, cabeças de gravação, entre outros.

10.2. Composição do Sistema

Um sistema de alimentação de potência ininterrupta (No Break) é normalmente composto por circuito retificador/carregador de baterias, banco de baterias, circuito inversor de tensão e chave estática ou bypass automático.

9.2.1. Circuito Retificador/Carregador: converte tensão alternada em contínua, para alimentação do inversor e carga do banco de baterias. Em algumas topologias, os circuitos retificador e carregador são independentes, o que normalmente traz benefícios ao banco de baterias;

9.2.2. Banco de Baterias: responsável pelo armazenamento de energia, para que seja possível alimentar a carga durante falhas da rede elétrica;

9.2.3. Circuito Inversor: converte tensão contínua (proveniente do retificador ou do banco de baterias) em tensão alternada para alimentar a carga;

9.2.4. Chave Estática: transfere a carga para a rede em caso de falha no sistema.

10.3. Topologias Principais:

Em função da disposição dos circuitos, são geradas diferentes arquiteturas (topologias) com características bem distintas. De acordo com a NBR 15014, de Dezembro / 2003, os Nobreaks são classificados em On-Line, Interativo e Stand-by.

10.3.1- No-Break Stand-by

Na figura 8.2 é mostrado o diagrama em blocos desta topologia. Existem duas condições de operação, definidas pela situação da rede de alimentação:

a) Rede Presente: a chave CH é mantida fechada. A carga é alimentada pela rede elétrica, onde a tensão e frequência de saída são portanto totalmente dependentes da tensão e frequência de entrada;

b) Falha na Rede: a chave CH é aberta e é dada a partida no inversor. A carga passa a ser alimentada pelo conjunto inversor / banco de baterias.

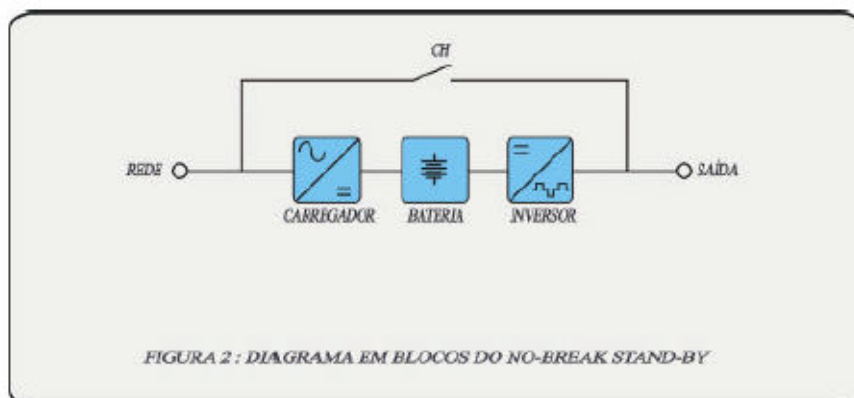


Figura 10.2: Diagrama em blocos do no-break stand-by

Portanto, existem dois modos de operação, os quais são definidos pela condição da rede. Na ocorrência de falta ou retorno da energia, a carga é transferida da rede para o inversor, e vice-versa. Em ambos os casos, durante a transferência, existe interrupção do fornecimento de energia à carga crítica.

O carregador nesta topologia, possui pequena capacidade de corrente de carga e, portanto, não são recomendados para as aplicações que necessitam de longo tempo de autonomia (acima de uma hora).

O inversor é dimensionado para operação eventual somente, e por pouco tempo (alguns poucos minutos!!). Em praticamente 100% dos casos a forma de onda de saída do inversor é “quadrada”, sendo denominada como semi-senoidal por alguns fabricantes, com elevado conteúdo harmônico.

10.3.2. Nobreak Interativo

Na figura 8.3 é mostrado o diagrama em blocos desta topologia, muito similar ao nobreak do tipo Standby, exceto pela existência de estabilizador de tensão na saída. Em função da tensão da rede de alimentação, existem duas condições de operação:

a) Rede Presente: a chave CH é mantida fechada. Através do estabilizador, a carga é alimentada pela rede elétrica, onde a tensão é estabilizada, porém a frequência de saída é totalmente dependente da entrada (frequência de saída = frequência de entrada!!);

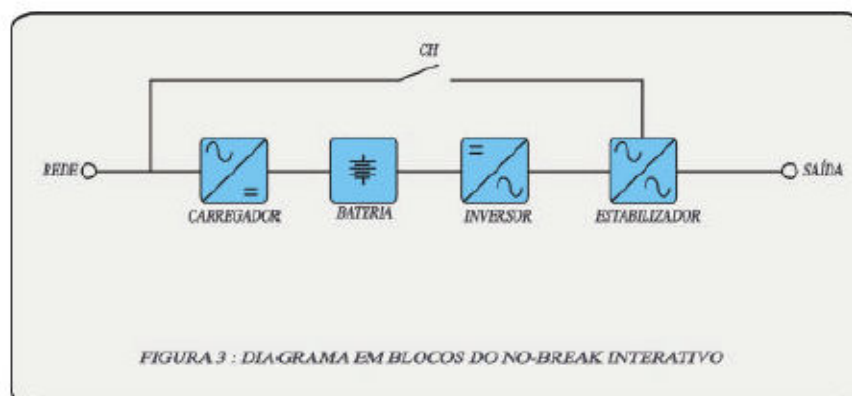


Figura 10.3: Diagrama em blocos do no-break interativo

b) Falha na Rede: a chave CH é aberta e a carga passa a ser alimentada pelo conjunto inversor / banco de baterias.

De modo similar ao Stand-by, na ocorrência de falta e retorno da rede de alimentação, normalmente irá ocorrer interrupção durante a transferência da carga da rede/estabilizador => inversor e vice-versa. De acordo com a NBR 15014, a topologia dita como “convencional”, apresentada na figura 8.3, pode ter algumas variações, onde as principais são apresentadas a seguir:

c) Interativo Ferromressonante: Esta configuração tem o mesmo descritivo funcional apresentado no item anterior, porém é caracterizada pelo emprego de um transformador do tipo ferromressonante como estabilizador. Em função disto, são relativamente pesados, a regulação estática de saída é ruim, e existe normalmente elevada distorção harmônica na tensão de saída (em alguns casos é necessário o uso de filtros para harmônicos de terceira e quinta ordem em paralelo com a saída deste trafo). Ao longo do tempo, normalmente passam a apresentar elevado ruído sonoro, pois devido ao seu projeto / função, próximos à região de saturação do núcleo, operam com temperatura elevada.

d) Interativo de Simples Conversão: Nesta configuração um único conversor desempenha as funções de carregador de baterias, condicionador de tensão e inversor (figura 8.4). Por esta razão, são também denominados como Bidirecionais ou Tri-Port. Enquanto a rede de alimentação está presente, esta é condicionada pelo conversor, que também mantém as baterias carregadas. A frequência de entrada e saída são iguais.

Durante uma falta de rede, a chave CH é aberta, este conversor inverte o sentido de potência, e passa operar como inversor, alimentando a carga com a energia das baterias.

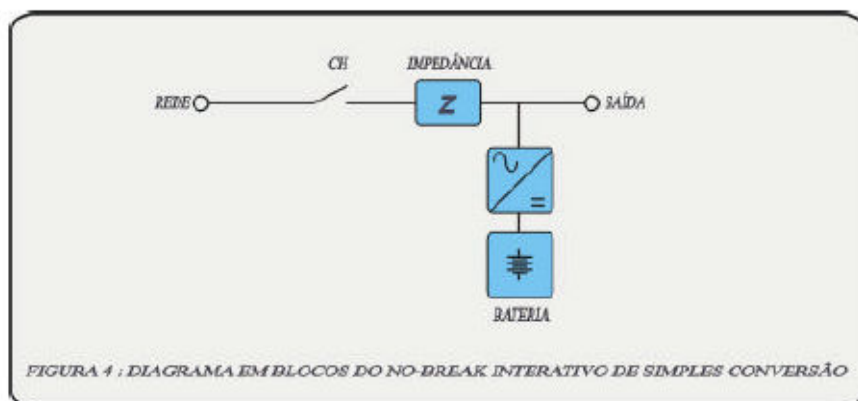


Figura 10.4: Diagrama em blocos do no-break interativo de simples conversão

10.3.3. No-Break On-Line

O diagrama em blocos desta configuração é apresentado na figura 8.5. Nos equipamentos desta topologia sempre existe dupla conversão de energia: no primeiro estágio o retificador opera como conversor de tensão alternada (rede) em contínua e no segundo estágio o inversor converte tensão contínua em alternada (saída), deste modo gerando tensão de saída com amplitude/frequência/forma totalmente independentes da entrada.

Atualmente, na maior parte dos casos, existe circuito independente para a carga do banco de baterias (carregador de baterias), o qual propicia gerenciamento totalmente voltado para as necessidades desta, bem como redundância neste ponto (aumento da confiabilidade do sistema).

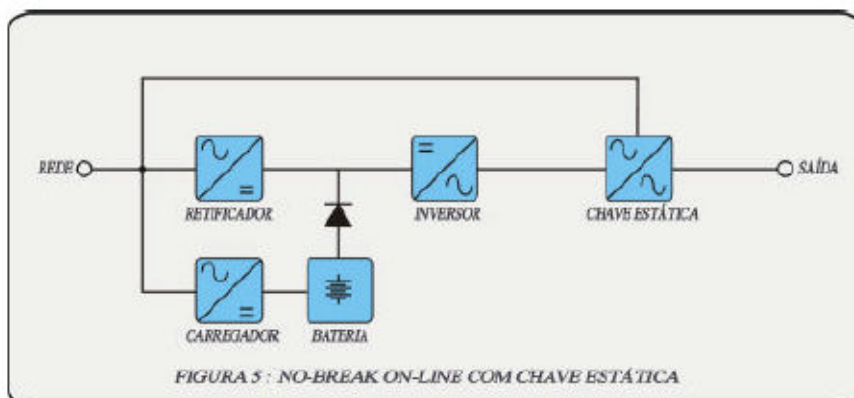


Figura 10.5: No-break on line com chave estática

Esta configuração apresenta extrema confiabilidade, operando normalmente pelo inversor e em caso de sobrecarga (ou até mesmo curto-circuito na saída), sobretemperatura, falha interna, ou outro fator que prejudique o fornecimento, a chave estática transfere a carga para a rede. Após a normalização da situação, a chave estática retorna a carga para o inversor, sem interrupção.

Na figura é mostrado o fluxo de potência com rede presente. O circuito retificador alimenta inversor, enquanto o banco de baterias é mantido carregado pelo circuito carregador de baterias. A carga é continuamente alimentada pelo inversor. Deste modo, a saída tem frequência e tensão controladas, e independentes da entrada. O banco de baterias é isolado do barramento CC através de um diodo, o qual não é polarizado com rede presente. Também pode ser empregado tiristor nesta função, permitindo maior gerenciamento deste ponto.

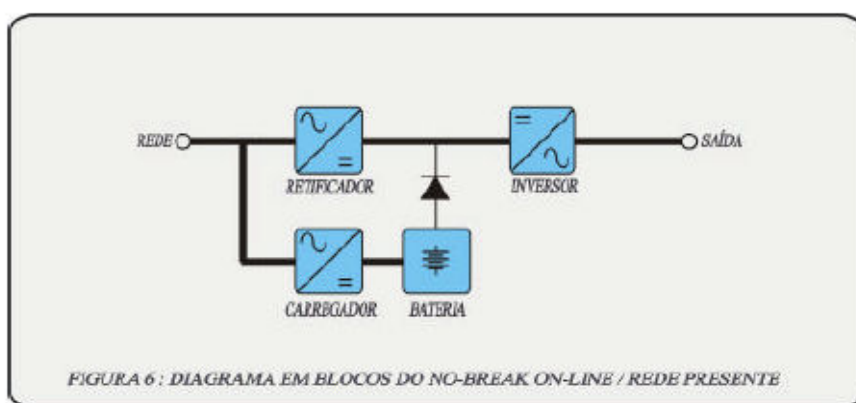


Figura 10.6: Diagrama em blocos do no-brearl on line/rede presente

Durante uma falha na rede comercial, a energia armazenada no banco de baterias é utilizada pelo inversor para alimentar a carga, sem interrupção ou transferência, sendo representado na figura .

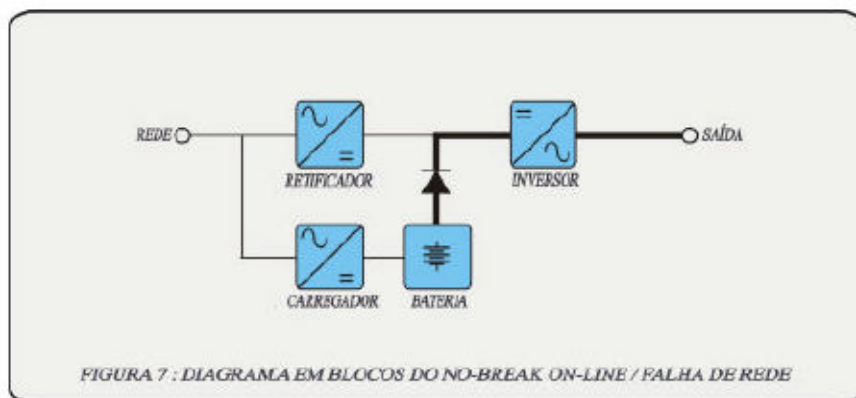


Figura 10.7: Diagrama em blocos do no-break on line/falha na rede

A forma de onda da tensão de saída permanece inalterada. Os sistemas On-Line operam normalmente com tensão mais elevada no barramento de tensão contínua (utilizam maior número de baterias). Este fator faz com que o rendimento do circuito inversor seja normalmente superior nos sistemas On-Line.

O inversor é projetado para operação contínua, sendo neste caso totalmente compatível para aplicação em autonomias elevadas, de várias horas se for o caso, bastando apenas o uso / dimensionamento do banco de baterias conforme a necessidade. Neste sentido, é também importante que o nobreak permita ampliação da capacidade do carregador de baterias (normalmente associação em paralelo de mais conversores), ou então o uso de retificador externo com esta finalidade.

11. Retificadores de corrente alternada

A energia elétrica, hoje disponível em grande quantidade graças às extensas redes de distribuição, apresenta-se sob a forma de Corrente Alternada Senoidal, em geral de 380V, 220V ou 127V (valores eficazes) e frequência de 50 ou 60 Hz (No Brasil, em redes públicas, sempre 60 Hz) . Esta pode ser utilizada diretamente para acionamento de motores, aquecimento resistivo e iluminação. Outras aplicações requerem corrente contínua como, por exemplo, os processos eletrolíticos industriais, o acionamento de motores de alto conjugado de partida (utilizados em tração elétrica e controles industriais), carregadores de bateria e a alimentação de praticamente todos os circuitos eletrônicos.

A obtenção de corrente contínua, a partir da corrente alternada disponível, é indispensável nos equipamentos eletrônicos. Estes, invariavelmente, possuem um ou mais circuitos chamados Fontes de Alimentação ou Fontes de Tensão, destinados a fornecer as polarizações necessárias ao funcionamento dos dispositivos eletrônicos. Aos circuitos ou sistemas destinados a transformar corrente alternada em contínua dá-se o nome genérico de Conversores C.A. - C.C. (ou em inglês, A.C. – D.C, alternate current – direct current).

Para obtenção de corrente contínua em escala industrial (acima de dezenas de quilowatts), utilizam-se conversores constituídos de grupos motor-gerador em que o motor de corrente alternada é acionado pela rede e move um gerador de corrente contínua, como mostrado na figura.

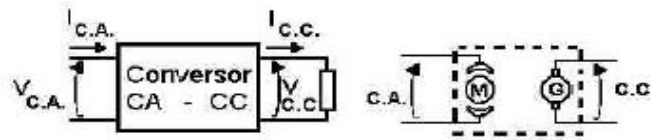


Figura 11.1: Conversores C.A. - C.C.

Para obtenção de corrente contínua em pequena escala, como na alimentação de equipamentos eletrônicos a conversão se faz por meio dos circuitos retificadores, que em muitos casos começam a substituir os conversores eletromecânicos (motor-gerador) até para elevadas potências, devido ao alto rendimento que apresentam.

Quando eletrônicos os retificadores utilizam diodos ou tiristores. Na figura abaixo aspectos típicos destes componentes.



Figura 11.2: Aspecto típico de diodos e de tiristores industriais

O funcionamento básico dos retificadores é mostrado abaixo:

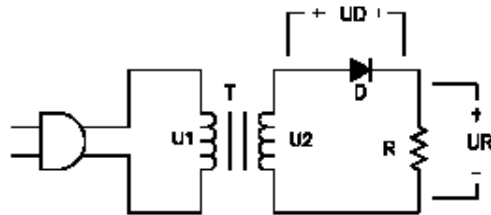


Figura 11.3: Retificador de meia onda

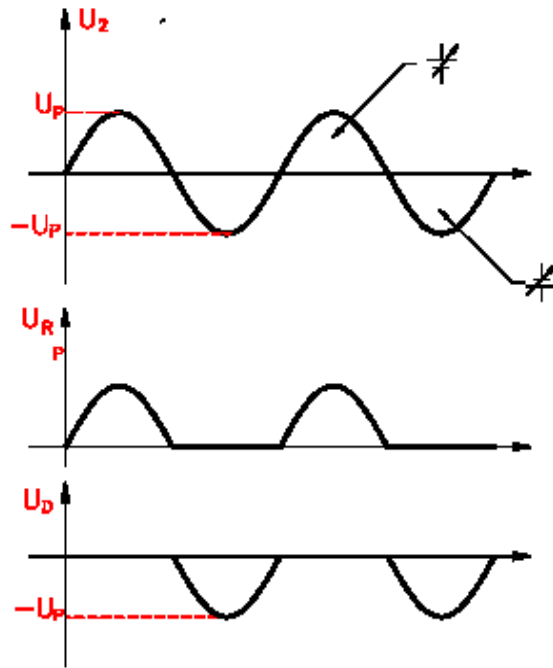


Figura 11.4: Retificador de meia-onda monofásico

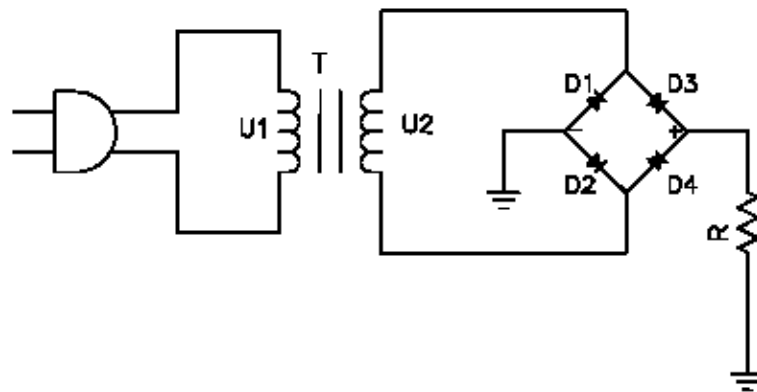


Figura 11.5: Retificador de onda completa monofásico

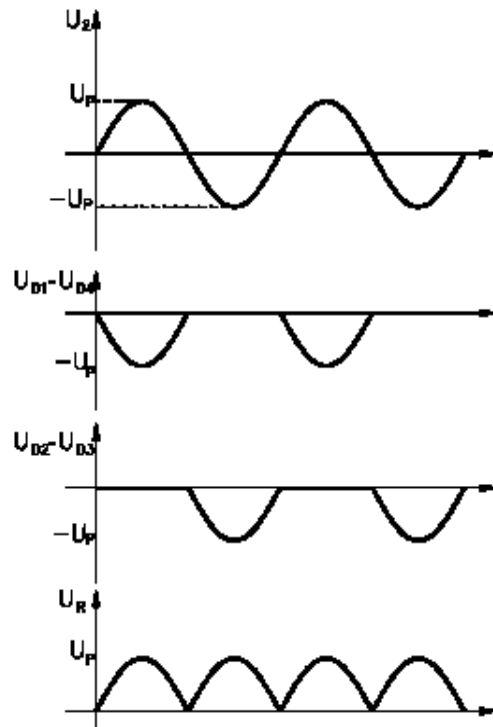
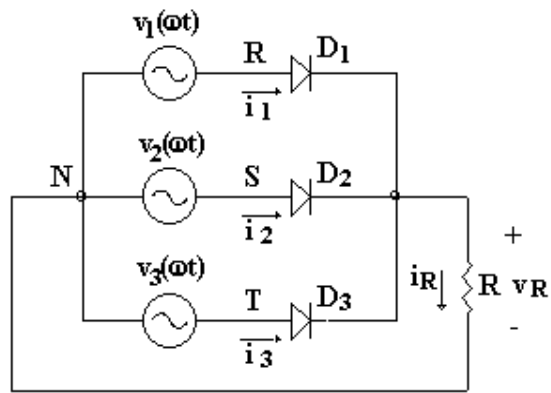


Figura 11.6: Formas de onda do retificador de onda completa monofásico



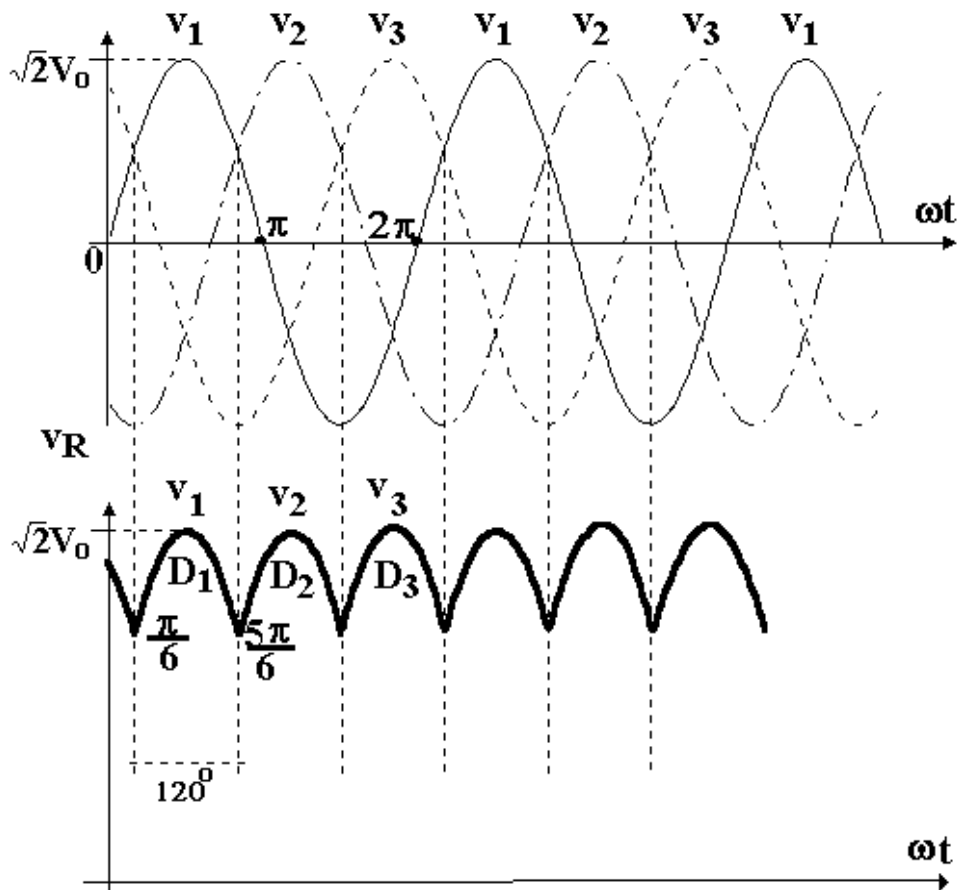
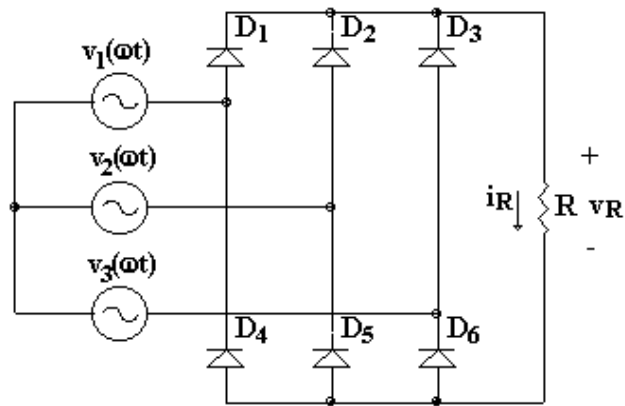


Figura 11.7: Retificador trifásico com ponto médio



12. Fornos de indução

O funcionamento dos fornos de indução baseia-se na indução eletromagnética. Faraday estudou este fenômeno e concluiu que num condutor elétrico submetido a um fluxo magnético variável, surge na f.e.m. tanto maior quanto maior for a variação $\Delta\Phi$ do fluxo.

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

(Para que a variação do fluxo no tempo seja grande é preciso que o fluxo Φ seja elevado e / ou que o tempo de variação Δt seja pequeno. Esta última condição corresponde a uma frequência elevada).

Sendo muito usado para fusão de materiais condutores, formam-se nestes materiais correntes de Foucault (correntes induzidas em massas metálicas) que produzem grande elevação de temperatura. Se os materiais forem magnéticos, haverá também o fenômeno da histerese, que contribui para o aumento de temperatura.

O forno consiste basicamente num transformador com o secundário em curto-circuito e constituído apenas por uma espira.

Um dos tipos de fornos é constituído por um transformador com núcleo de ferro e pode ser usado para a frequência da rede.

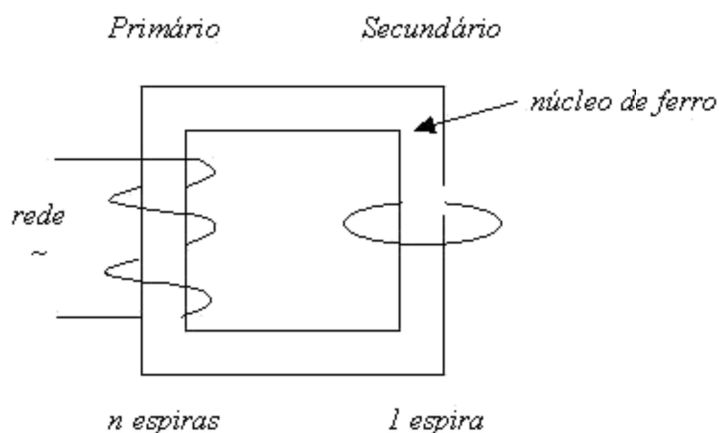


Figura 12.1: Reator indutivo

Outros tipos não utilizam núcleo de ferro e podem ser usados para frequências mais altas.

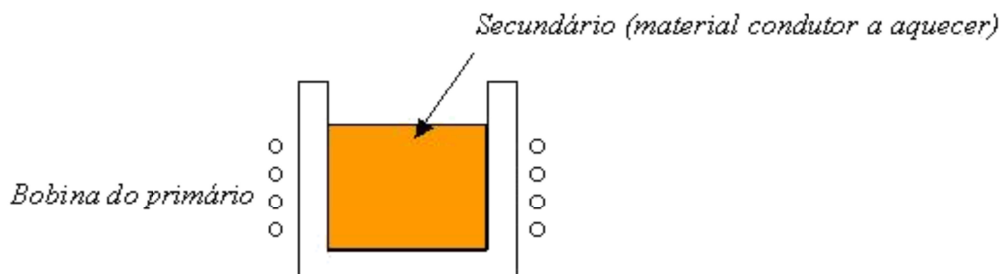


Figura 12.2: Princípio de funcionamento do forno de indução

Os fornos sem núcleo podem usar frequências desde 50 Hz a 1 kHz ou mais. Para frequências baixas usam-se transformadores para alimentar os fornos. Para frequências médias usam-se na alimentação conjuntos motor / gerador ou circuitos eletrônicos estáticos.

Na tabela seguinte alguns dados técnicos a respeito de fornos de indução

Características Técnicas						
Potência	(KVA)	120 a 180	180 a 350	300 a 600	500 a 100	
Frequência	(HZ)	50 - 60	50 - 60	50 - 60	50 - 60	
Dimensões do Forno (Larg. / Alt. / Prof.)	(MM)	1300 x 1720 x 1160	1500 x 1830 x 1145	1760 x 1980 x 1680	2300 x 2200 x 3900	
Capacidade de Fusão	Ferro	(KG/H)	250 a 350	350 a 660	600 a 1200	1000 a 2000
	Cobre	(KG/H)	270 a 380	380 a 750	670 a 1340	1190 a 2250
	Bronze	(KG/H)	300 a 430	430 a 850	770 a 1540	1250 a 2500
	Latão	(KG/H)	360 a 510	510 a 1000	900 a 1800	1500 a 3000
	Zinco	(KG/H)	780 a 1100	1100 a 2300	2000 a 4000	3700 a 7500
Carga Total	Ferro	(KG/H)	1600	2100	3400	9000
	Cobre	(KG/H)	1800	2300	3500	10000
	Bronze	(KG/H)	1800	2300	3500	10000
	Latão	(KG/H)	1800	2300	3500	10000
	Zinco	(KG/H)	1500	2000	3200	8000
Carga Total	Ferro	(KG/H)	1600	2100	3400	9000
	Cobre	(KG/H)	1800	2300	3500	10000
	Bronze	(KG/H)	1800	2300	3500	10000
	Latão	(KG/H)	1800	2300	3500	10000
	Zinco	(KG/H)	1500	2000	3200	8000
Carga Total	Ferro	(KG/H)	1600	2100	3400	9000
	Cobre	(KG/H)	1800	2300	3500	10000
	Bronze	(KG/H)	1800	2300	3500	10000
	Latão	(KG/H)	1800	2300	3500	10000
	Zinco	(KG/H)	1500	2000	3200	8000
Carga útil	Ferro	(KG/H)	1200	1650	2300	6300
	Cobre	(KG/H)	1300	1600	2600	7000
	Bronze	(KG/H)	1300	1600	2600	7000
	Latão	(KG/H)	1300	1600	2600	7000
	Zinco	(KG/H)	1050	1400	2240	5600
Consumo de energia	Ferro	(KG/H)	450	450	450	450
	Cobre	(KG/H)	400	400	400	400
	Bronze	(KG/H)	350	350	350	350
	Latão	(KG/H)	300	300	300	300
	Zinco	(KG/H)	135	135	130	120

13. Distorção harmônica

A qualidade da energia tem sido alvo de muito interesse e discussão e nos últimos anos. Cada vez mais, plantas industriais têm descoberto que tem de lidar com o problema da falta de qualidade da energia elétrica.

Distorção harmônica é um tipo de problema que surge na rede elétrica devido a vários motivos que serão vistos neste texto.

Antes de qualquer coisa é necessário saber o que são harmônicas.

13.1. O que são harmônicas?

De acordo com o matemático e físico francês Fourier, todas as formas de onda são na verdade uma composição da única forma de onda pura que existe na natureza, que é a onda senoidal. Uma onda senoidal pura não possui nenhuma harmônica. A Figura 13.1 mostra o formato da onda senoidal pura, que deveria ser o formato da onda de 60Hz da rede elétrica:

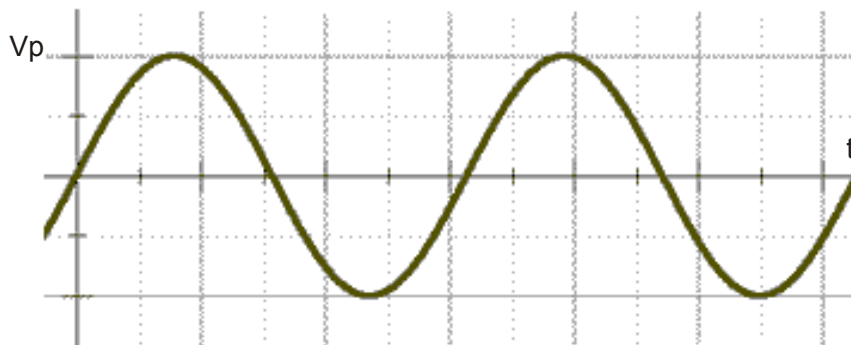


Figura 13.1

Qualquer outra forma de onda, que não seja a senoidal, pura, é, na verdade uma composição de infinitas ondas senoidais. A primeira onda senoidal é conhecida como sendo a fundamental e as outras são todas harmônicas.

Suponha que em uma determinada rede elétrica a forma de onda encontrada seja essa:

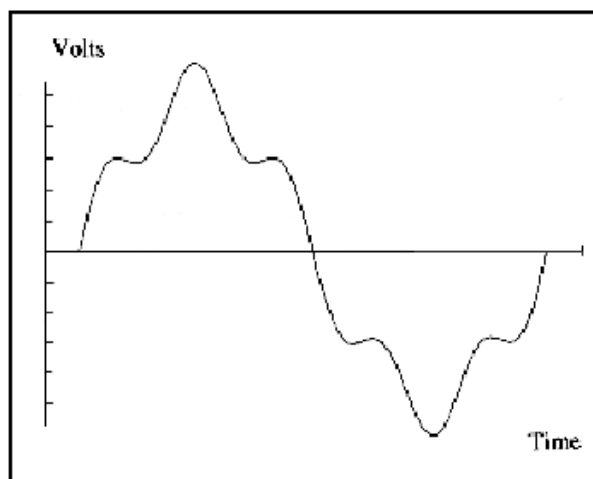


Figura 13.2: Senóide distorcida

Pode-se ver claramente que essa onda não é senoidal pura. Ela é uma onda com formato distorcido. Se fosse feita uma análise de Fourier veríamos que essa onda é, na verdade, uma composição de duas ondas senoidais puras, como mostrado na Figura 13.3 seguinte:

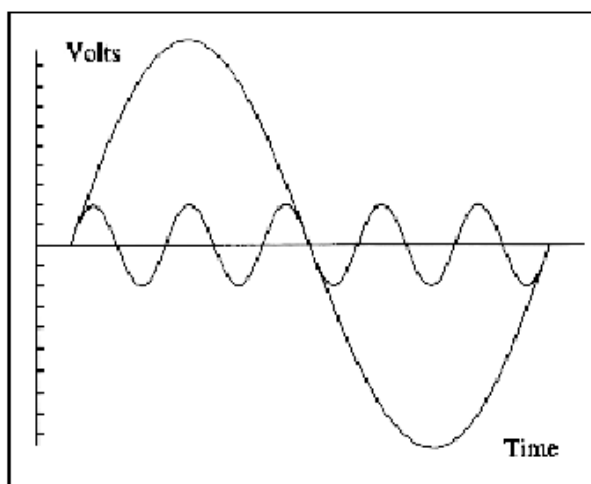


Figura 13.3: Composição de senoides em uma onda distorcida

A Figura 13.3 mostra que a onda original, mostrada na Figura 13.2, foi decomposta em duas componentes cuja soma produz novamente a imagem da Figura 13.2. A onda de amplitude maior da Figura 13.3 é chamada de fundamental e a onda de amplitude menor e frequência maior é chamada de harmônica. Portanto: Harmônicas são ondas de amplitude menor do que a fundamental e frequências múltiplas da fundamental que aparecem quando a fundamental não é senoidal pura. Veja que, se a rede elétrica tivesse uma onda senoidal pura não existiriam harmônicas.

As harmônicas sempre são múltiplos da fundamental. No caso do sistema elétrico de 60Hz teríamos a seguinte sequência de harmônicas:

Fundamental	60Hz		
Primeira harmônica	120Hz	2 x 60Hz	Harmônica ímpar
Segunda harmônica	180Hz	3 x 60Hz	Harmônica par
Quarta harmônica	240Hz	4 x 60Hz	Harmônica ímpar
Quinta harmônica	300Hz	5 x 60Hz	Harmônica par
Sexta harmônica	360Hz	6 x 60Hz	Harmônica ímpar
Etc		N x 60Hz	

Quantas harmônicas existem em uma onda distorcida? Infinitas!!! Porém, em geral, os efeitos danosos das harmônicas se limitam as primeiras, porque a amplitude vai decrescendo rapidamente de modo que as harmônicas de frequências mais elevadas possuem uma amplitude tão baixa que já não afetam mais o sistema. Note que as harmônicas são classificadas em: harmônicas pares e ímpares de acordo com o múltiplo da frequência

A Figura 13.4 mostra uma onda fundamental de frequência f com suas harmônicas de frequências múltiplas da fundamental e amplitude decrescente.

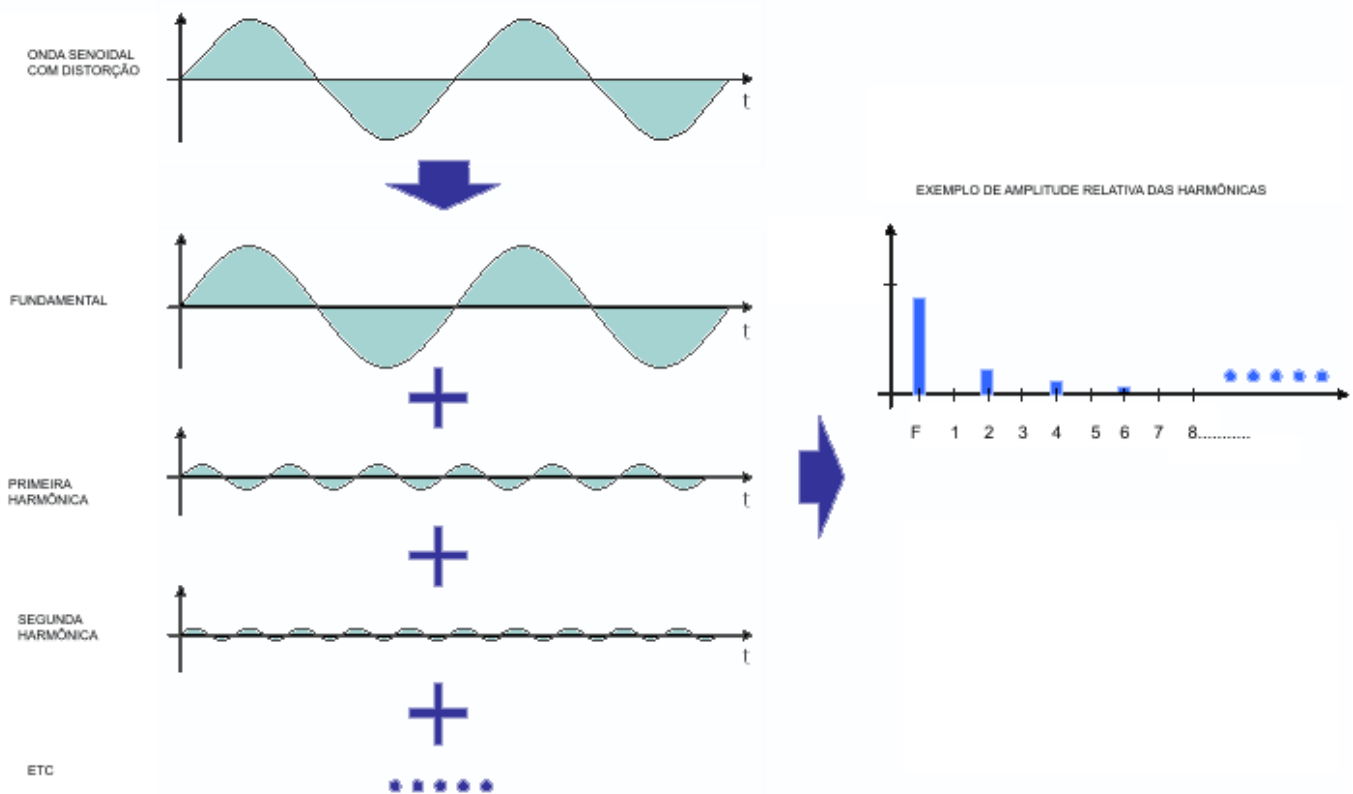


Figura 13.4

Concluindo: as harmônicas são ondas de frequências múltiplas da fundamental e amplitude decrescente produzidas por qualquer onda senoidal distorcida, logo, qualquer aparelho ligado à rede elétrica que possa distorcer a senoide estará produzindo harmônicas. Pela experiência sabe-se que as harmônicas realmente danosas nos circuitos elétricos são as primeiras e, especialmente, as de ordem ímpar. Assim deve-se tomar cuidado com as harmônicas em 120V, 180Hz, 240Hz e 300Hz.

Outro fato importante a respeito das harmônicas é que podemos ter: harmônicas de voltagem, harmônicas de corrente ou ambas juntas. A distorção tanto pode ocorrer na onda de voltagem como na onda de corrente.

13.2. Fontes geradoras de harmônicas nos sistemas elétricos

Qualquer aparelho ligado à rede elétrica que possa produzir alguma distorção na senoide é uma fonte permanente de harmônicas. Os aparelhos seguintes estão entre os que mais produzem harmônicas:

- Aparelhos eletrônicos: inversores de frequência, chaves soft starter, retificadores, no breaks, reatores eletrônicos de lâmpadas, qualquer máquina que possua partes eletrônicas;
- Motores e transformadores com baixo fator de potência: daí a importância de fazer uma correta correção de fator de potência
- Comutação de qualquer aparelho: o liga e desliga de aparelhos sempre irá produzir harmônicas, pois há cortes na senoide. Neste caso as harmônicas ocorrem apenas durante a operação de comutação.
- Fornos de arco voltaico;
- Etc

Analisando as fontes geradores de harmônicas pode-se perceber os motivos deste problema estar aumentando. Máquinas e equipamentos que possuem parte citadas na lista acima estão se tornando cada vez mais comuns dentro das empresas e mesmo nas residências.

13.3. Efeitos das harmônicas nos principais equipamentos elétricos

O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

a) Motores e geradores

O maior efeito das harmônicas em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal.

Outro fenômeno é a presença de harmônicas no fluxo magnético, produzindo alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental, como ocorre com o 5^a, 11^a, 17^a, etc. harmônicos. Isto significa que tanto o quinto componente, quanto o sétimo induzem uma sexta harmônica no rotor. O mesmo ocorre com outros pares de componentes.

O sobre-aquecimento que pode ser tolerado depende do tipo de rotor utilizado. Rotores bobinados são mais seriamente afetados do que os de gaiola. Os de gaiola profunda, por causa do efeito pelicular, que conduz a condução da corrente para a superfície do condutor em frequências elevadas, produzem maior elevação de temperatura do que os de gaiola convencional.

O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação senoidal. Este fato não se aplica a máquinas projetadas para alimentação a partir de inversores, mas apenas àquelas de uso em alimentação direta da rede.

Algumas componentes harmônicas, ou pares de componentes (por exemplo, 5^a e 7^a, produzindo uma resultante de 6^a harmônica) podem estimular oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas. Isto pode levar a problemas de industriais como, por exemplo, na produção de fios, em que a precisão no acionamento é elemento fundamental para a qualidade do produto.

b) Transformadores

Também neste caso tem-se um aumento nas perdas. Harmônicas na tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto harmônicas na corrente elevam as perdas no cobre. A elevação das perdas no cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, que implica numa redução da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.

Normalmente as componentes harmônicas possuem amplitude reduzida, o que colabora para não tornar esses aumentos de perdas excessivos. No entanto, podem surgir situações específicas (ressonâncias, por exemplo) em que surjam componentes de alta frequência e amplitude elevada.

Além disso o efeito das reatâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência

Associada à dispersão existe ainda outro fator de perdas que se refere às correntes induzidas pelo fluxo disperso. Esta corrente manifesta-se nos enrolamentos, no núcleo, e nas peças metálicas adjacentes aos enrolamentos. Estas perdas crescem proporcionalmente ao quadrado da frequência e da corrente.

Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

- **Cabos de alimentação**

Em razão do efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada, também os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmônicas de corrente. Além disso tem-se o chamado "efeito de proximidade", o qual relaciona um aumento na resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

A Figura 11.13 mostra curvas que indicam a seção transversal e o diâmetro de condutores de cobre que devem ser utilizados para que o efeito pelicular não seja significativo (aumento menor que 1% na resistência). Note que para 3kHz o máximo diâmetro aconselhável é aproximadamente 1 ordem de grandeza menor do que para 50Hz. Ou seja, para frequências acima de 3 kHz um condutor com diâmetro maior do que 2,5 mm já começa a ser significativo em termos de efeito pelicular.

Além disso, caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados tenham suas ressonâncias excitadas pelas componentes harmônicas, podem aparecer elevadas sobre-tensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo.

Capacitores

O maior problema aqui é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias (excitadas pelas harmônicas), podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a reatância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão.

As correntes de alta frequência, que encontram um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevam as suas perdas ôhmicas aumentando o seu aquecimento. O decorrente aumento no aquecimento do dispositivo encurta a vida útil do capacitor.

Equipamentos eletrônicos

Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis a distorções na forma de onda de tensão. Por exemplo, se um aparelho utiliza o cruzamento com o zero (ou outros aspectos da onda de tensão) para realizar alguma ação, distorções na forma de onda podem alterar, ou mesmo inviabilizar, seu funcionamento.

Caso as harmônicas penetrem na alimentação do equipamento por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos (que se tornam mais efetivos com a aumento da frequência), eles podem também alterar o bom funcionamento do aparelho.

- **Aparelhos de medição**

Aparelhos de medição e instrumentação em geral são afetados por harmônicas, especialmente se ocorrerem ressonâncias que afetam a grandeza medida.

Dispositivos com discos de indução, como os medidores de energia, são sensíveis a componentes harmônicas, podendo apresentar erros positivos ou negativos, dependendo do tipo de medidor e da harmônica presente. Em geral a distorção deve ser elevada (>20%) para produzir erro significativo.

- **Relés de proteção e fusíveis**

Um aumento da corrente eficaz devida a harmônicas sempre provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo ocasionar uma redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada.

Em termos dos relés de proteção não é possível definir completamente as respostas devido à variedade de distorções possíveis e aos diferentes tipos de dispositivos existentes.

A referência é um estudo no qual se afirma que os relés de proteção geralmente não respondem a qualquer parâmetro identificável, tais como valores eficazes da grandeza de interesse ou a amplitude de sua componente fundamental. O desempenho de um relé considerando uma faixa de frequências de entrada não é uma indicação de como aquele componente responderá a uma onda distorcida contendo aquelas mesmas componentes espectrais. Relés com múltiplas entradas são ainda mais imprevisíveis.

13.4. Como eliminar ou reduzir harmônicas

O controle das harmônicas é uma das partes mais complexas na análise de uma rede elétrica. Vários são os motivos para tal, porém dois são determinantes:

- A geração das harmônicas acontece simultaneamente em várias partes do sistema;
- Existem harmônicas com várias frequências

O ideal seria não produzir harmônicas, isso resolveria o problema, mas, com as atuais máquinas eletrônicas isso não é mais possível, de modo que é necessário atacá-las depois de geradas.

O primeiro procedimento é identificar os circuitos que possuem excesso de harmônicas, Aparelhos que fazem essas medições são geralmente caros e poucos os possuem, mas a nossa empresa oferece o controlador de fator de potência CFP12 que mede a quantidade de harmônicas em tensão e corrente. Esse controlador pode ser instalado em qualquer ponto do sistema e a partir daí se consegue ver a quantidade de harmônicas de tensão e de corrente presentes. A partir daí faz-se um mapa dos circuitos realmente afetados pelas harmônicas.

Para atacar as harmônicas pode-se partir dos métodos mais simples e somente se necessário partir para métodos mais sofisticados. Entre os métodos simples há os seguintes:

13.4.1. Aterramento do sistema

Convém notar que as harmônicas podem se espalhar tanto pelos fios fases como pelo fio neutro e/ou terra, especialmente se o aterramento não for bem feito. Assim, uma das primeiras providências é verificar os aterramentos de todas as máquinas e do neutro próximo aos pontos onde as harmônicas são geradas. Esse efeito do aterramento deficiente do neutro pode produzir um fenômeno em que a corrente no neutro é superior a corrente da fase.

13.4.2. Correção de fator de potência

A segunda providência básica é realizar a correção de fator de potência do modo adequado. Os capacitores têm a capacidade de filtrar harmônicas, visto que essas possuem frequência mais elevada do que a fundamental e para frequências mais elevadas a impedância capacitiva é menor, conduzindo desta maneira as harmônicas para o terra. O uso de um banco na entrada da rede não é suficiente para eliminar harmônicas geradas internamente. Uma providência que pode ser tomada é instalar capacitores diretamente nas máquinas, de modo que o capacitor ligue e desligue sempre junto com a máquina. Neste caso o próprio capacitor instalado próximo à máquina já reduz a emissão de harmônicas. Se o capacitor estiver aquecendo demais pode-se instalar capacitores com maior tensão de trabalho, porém, não esquecer as seguintes relações de kVAr e função da tensão:

Capacitores em 380V ligados em rede de 220V	Dividir kVAr em 380V por 3
Capacitores em 440V ligados em rede de 380V	Dividir kVAr em 440V por 1,33

Ex: Um capacitor de 10 kVAr/380V ligado em 220V, fornece 3,33 kVAR

Um capacitor de 10 kVAr/440V ligado em 380V, fornece 7,50 kVAR

Esses dois procedimentos relativamente simples, aterramento e correção de fator de potência, já costuma trazer bons resultados. Caso isso não seja o suficiente, é necessário partir para filtros com indutores e capacitores.

Se for necessário partir para esta modalidade de correção de harmônicas será necessária uma medição espectral para saber quais são as harmônicas que estão afetando o sistema. A partir desta medição deve-se procurar uma empresa que comercialize esses filtros para as frequências que foram detectadas como sendo as problemáticas. Este trabalho deve ser conduzido por engenheiro eletricitista especializado nesta área e não há uma linha padrão a ser seguida para a solução do problema de harmônicas através do uso de filtros seletivos, por isso essa parte não será tratada neste texto.

BIBLIOGRAFIA

ALBUQUERQUE, Rômulo Oliveira, **Circuitos em corrente alternada**, 6a. Ed., 2002. São Paulo: Editora Érica.

ALDABÓ, Ricardo, **Qualidade na energia elétrica**, 2001. São Paulo: Artliber Editora Ltda.

ARNOLD, R. e STEHR, W., **Máquinas Elétricas 1**, E.P.U. 1976, São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda.

A. R. PRASAD, P. D. ZIOGAS AND S. MANLAS: "A Novel Passive Waveshaping Method for Single-Phase Diode Rectifier". Proc. Of IECON '90, pp. 1041-1050.

COGO J. R. et. al., **Análise de desempenho dos motores trifásicos nacionais**. Eletricidade Moderna, n. 227, p. 26-39, Fev. 1993.

CREDER, Hélio, **Instalações elétricas**, 14a. Ed., 2002. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos Ltda.

- DIAS, Guilherme Alfredo Dentziem, **Harmônicas em sistemas industriais**, 2005, Porto Alegre: PUCRS.
- GANIN, Antônio, **Setor elétrico brasileiro - Aspectos regulamentares e tributários**, 2004, São Paulo: Artliber Editora Ltda.
- LEÃO, Ruth, **Geração e distribuição de energia elétrica no Brasil**, 2009, Universidade Federal do Ceará.
- MAGALDI, M., **Noções de Eletrotécnica**, 1981, Rio de Janeiro: Guanabara Dois.
- MAMEDE FILHO, João, **Instalações elétricas industriais**, 6a. Ed., 2001. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos Ltda.
- MEDEIROS FILHO, Solon de, **Medição de energia elétrica**, 4a. Ed., 1997. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos Ltda.
- NEGRISOLI, M. E. M. **Instalações Elétricas - Projetos prediais de baixa tensão**, 1981, São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda.
- POMPILIO, José Antenor. **Fator de potência e distorção harmônica total**.
- R. GOHR JR. AND A. J. PERIN: "**Three-Phase Rectifier Filters Analysis**". Proc. Of Brazilian Power Electronics Conference, COBEP'91, Florianópolis - SC, pp. 281-286.
- SATO, Fugio. **Eletrotécnica**, <http://www.dsee.fee.unicamp.br/~sato/ET515/ET515.html>
- S. B. DEWAN: "**Optimum Input and Output Filters for a Single-Phase Rectifier Power Supply**". IEEE Trans. On Industry Applications, vol. IA-17, no. 3, May/June 1981
- SIMONE, Gilio Aluisio, **Máquinas de indução trifásicas**, 2005, São Paulo: Editora Érica.