

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIENCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

O COBRE COMO MATERIAL CONDUTOR DE ENERGIA:
CALOR E ELETRICIDADE

LUCIANO TAVARES BARBOSA

CAMPINA GRANDE
JUNHO – 2003

LUCIANO TAVARES BARBOSA

O COBRE COMO MATERIAL CONDUTOR DE ENERGIA:
CALOR E ELETRICIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do
Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina
Grande, em cumprimento às
exigências para a obtenção do
grau de engenheiro eletricitista.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano

CAMPINA GRANDE

JUNHO - 2003



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Sumário

1. Introdução	1
2. Cobre	1
3. Como o homem utilizou o cobre	2
4. Principais tipos de cobre	3
4.1 Ligas de cobre.....	3
5. Obtenção do cobre na natureza.....	4
5.1 Processo Pirometalúrgico	4
5.2 Processo Hidrometalúrgico.....	5
5.4 Formas do cobre	6
5.5 Reservas minerais.....	6
6. Conceitos.....	8
6.1 Resistência e resistividade	8
6.2 Efeito pelicular	10
6.3 Corrente elétrica	10
6.4 Tensão	11
6.5 Energia.....	11
6.5.1 Formas da energia.....	11
6.5.2 Leis de conversão de energia	12
6.6 Potência.....	14
6.7 Eficiência energética.....	14
7. Utilização particular do cobre em circuitos elétricos e eletrônicos.....	15
7.1 A geração de energia elétrica	15
7.1.1 A repotenciação de geradores síncronos	15
7.2 Transformadores.....	16
7.2.4 Transferência de potência.....	19
7.2.6 Transformadores de potência	20
7.2.7 Transformadores de distribuição.....	21
7.2.8 Transformadores <i>pad-mounted</i>	21
7.2.9 Transformadores de distribuição autoprotégidos.....	21
7.2.10 Transformadores para forno	22
7.2.12 O autotransformador.....	22
7.2.13 O transformador de isolação	22
7.2.14 O transformador casador de impedância.....	23
7.2.15 Transformadores para instrumentos	23
7.3 Motores elétricos.....	24
7.3.1 Rendimento do motor elétrico.....	24
7.3.2 Motor de indução	25
7.3.3 Motor de corrente contínua	26
7.3.4 Motor trifásico de alto rendimento	27
7.4 Condutores elétricos.....	28
7.4.1 Isolamento	29
7.4.2 Blindagem	29
7.4.3 Formação de cabos.....	29
7.5 Buchas de passagem.....	30
7.6 Chaves seccionadoras	31

7.6.1	Seccionadores simples.....	32
7.8	Chave de aterramento rápido.....	32
7.9	Reguladores de tensão.....	33
7.10	Resistor de potência.....	33
7.11	Reatores eletromagnéticos.....	34
7.12	Relés de proteção.....	34
7.13	Disjuntores.....	35
7.14	Aterramento.....	36
7.15	Instrumentos de bobina móvel.....	37
7.16	Medidor de energia elétrica tipo indução.....	38
7.17	Medidores de energia elétrica ativa e reativa.....	39
7.18	Circuito impresso.....	40
7.19	Microprocessadores.....	40
8.	O cobre como material condutor de calor.....	41
8.1	Transmissão de calor.....	41
8.2	Resistência térmica.....	42
8.3	Aquecedor solar de água.....	42
8.4	Hidráulica.....	44
8.5	Radiadores.....	45
8.6	Caldeira a vapor.....	45
8.7	Refrigeração termoelétrica.....	45
8.8	Torre de resfriamento - <i>DryCooler</i>	46
9.	O cobre e a eficiência energética.....	47
9.1	Eficiência energética no Brasil.....	47
9.2	Lei da eficiência energética.....	48
9.3	Cargas lineares e não-lineares.....	48
9.4	Harmônicas.....	49
9.4.1	Harmônicas em computadores e televisores.....	50
9.4.2	Norma IEC 555-2.....	50
9.4.3	Harmônicas em sistemas trifásicos.....	51
9.4.4	Harmônicas em transformadores, motores e geradores.....	52
9.5	Eficiência no transformador.....	54
10.	Conclusão.....	55
11.	Bibliografia.....	55

1. Introdução

A utilização correta de materiais e a melhoria do aproveitamento dos recursos naturais têm sido amplamente debatida na atualidade. Desse ponto surge uma preocupação, registrada na concentração de pesquisas e trabalhos nesse assunto, sobre a descoberta de novos materiais que possuam propriedades físicas específicas.

Neste contexto, o **cobre** mostra sua predominância como um metal condutor de eletricidade e calor pelo grande número de aplicações na qual é utilizado. Tal importância é expressa a ponto de existirem organizações internacionais com o único objetivo de divulgar este metal, desde suas aplicações mais peculiares a utilidades pouco comuns como, por exemplo, na composição de alimentos.

O objetivo deste trabalho é ressaltar a importância da aplicação do **cobre** em dispositivos condutores de eletricidade e calor, a forma como os fabricantes têm aproveitado as características desse metal e de que forma a utilização do **cobre** influi na eficiência energética.

2. Cobre

O **cobre**, metal de cor avermelhada característica e de brilho metálico, é ótimo condutor de eletricidade e calor devido a sua característica atômica. É um metal dúctil e facilmente maleável.

O nome **cobre** deriva do termo “*aes cyprium*” – minério de Chipre – material que os romanos obtinham na ilha de Chipre, mais tarde conhecido apenas como “*cuprum*”, palavra latina que deu origem ao seu símbolo químico (Cu) tirado de suas primeiras letras.

Quando exposto ao ar, reveste-se lentamente de uma camada verde de carbonato hidratado, conhecido pelo nome de azinhave. Apresenta elevada resistência à tensão física, à corrosão e possui propriedade não magnética. É também facilmente ligável a outros metais formando inúmeras ligas de grande aplicabilidade industrial.

Possui as seguintes constantes físicas:

Símbolo químico.	Cu
Número atômico.	29
Peso atômico.	63,54
Peso específico.	8,9

Dureza, Mohs.	2,5 – 3
Ponto de fusão, °C.	1083
Ponto de ebulição, °C.	2595
Calor latente de fusão, cal/g.	50,6
Calor específico, cal/g/°C (20°C)	0,0912
Coefficiente de dilatação térmica linear, cm/cm/°C/s (20°C)	$16,5 \times 10^{-6}$
Condutibilidade térmica cal/cm ² /cm/°C/s (20°C)	0,941
Resistividade elétrica, ohm . cm (20°C)	$1,673 \times 10^{-6}$

3. Como o homem utilizou o cobre

O **cobre** foi um dos primeiros metais descobertos pelo homem na pré-história. Foi este metal que o homem primeiro se utilizou para melhorar suas condições de vida e subsistência. A primeira utilização do **cobre** foi registrada em aproximadamente de 8.000 a 6.000 a.c.

Para alguns historiadores, é provável que o homem tenha descoberto a fusão dos minérios e a metalurgia do **cobre** por volta de 4.000 a.c., desenvolvendo o que mais tarde seriam as primeiras indústrias metalúrgicas de **cobre**.

O uso do **cobre** se expandiu pelo mundo antigo em círculos concêntricos, tendo como centro um ponto situado em alguma parte da Ásia Ocidental, chegando a Creta e Chipre nos anos de 4.000 a 3.500 a.c. e na Europa nos anos de 3.500 a 3.000 a.c. aproximadamente.

A utilização de ligas como o latão (**cobre-zinco**) e o bronze (**cobre-estanho**), foram tão importantes na historia da nossa civilização a ponto de uma época da evolução humana ter sido marcada pelo uso desse metal - a idade do bronze.

A posse das minas de **cobre** representava na antiguidade a riqueza e o poder, pois juntamente com o bronze, o **cobre** era utilizado na fabricação de armas, de utensílios domésticos e decorativos, na fabricação de moedas, estátuas e obras de arte.

Na atualidade, o **cobre** continua sendo um dos metais não-ferrosos mais importantes para o homem, devendo continuar a ser, no futuro, graças às suas excelentes características, que lhe conferem uma grande diversidade de aplicações nos mais variados setores da indústria moderna.

4. Principais tipos de cobre

O **cobre** é o metal não-ferroso mais utilizado, depois do alumínio, por ser excelente condutor de eletricidade e calor. O seu principal uso é nas indústrias de fios e cabos elétricos, que absorvem mais de 50% desse metal, sendo o restante utilizado em ligas especiais, tubos, laminados e extrudados.

A indústria de **cobre** primário se organiza em torno de quatro tipos de produtos, originados em etapas distintas dos processos de extração, fundição e refino, os quais estão relacionados a seguir:

- **minério de cobre:** corresponde ao mineral extraído da mina, cujo conteúdo oscila entre 0,7% e 2,5% de **cobre**;
- **concentrado de cobre:** corresponde ao minério de **cobre** que, através de um processo de moagem das rochas e mistura com água e reagentes, passa a apresentar entre 30% e 38% de **cobre** fino;
- **cobre fundido:** corresponde aos concentrados que, por meio de processos pirometalúrgicos, se transformam no chamado **cobre** blíster (98,5%) e, posteriormente, no anodo de **cobre**, cujo teor é de 99,7% de **cobre**;
- **cobre refinado:** corresponde aos anodos e às soluções (no caso da lixiviação) que são refinados por processo de fundição ou eletrólise, resultando nos catodos, com pureza de 99,9% de **cobre**.

Em relação ao **cobre** secundário, podem-se citar dois tipos principais de sucata:

- **sucata para refino:** é a sucata industrial de processo, assim como a sucata comprada de terceiros no mercado, necessitando de processamento de refino;
- **sucata para uso direto:** direcionada aos transformadores e aos motores elétricos, sem necessidade de refino.

4.1 Ligas de cobre

Entre as ligas de **cobre**, encontram-se os materiais mais adequados a cada aplicação, propriedades mecânicas, propriedades físicas especiais, como altas condutibilidades elétrica e térmica, ou ainda propriedades fisico-químicas, com alta resistência à corrosão.

As principais ligas de **cobre** são:

- **Ligas cobre-zinco (latões);**
- **Ligas cobre-estanho (bronze);**
- **Ligas cobre-alumínio;**
- **Ligas cobre-níquel;**
- **Ligas cobre-silício;**
- **Ligas cobre-berílio.**

5. Obtenção do cobre na natureza

Existem dois processos básicos de produção de **cobre** primário: o processo pirometalúrgico, o processo hidrometalúrgico, e o processo SX-EW.

5.1 Processo Pirometalúrgico

A indústria de transformação do **cobre** tem início a partir do minério, cuja extração dá-se a céu aberto ou em galerias subterrâneas. Com um teor metálico que varia normalmente entre 0,7% e 2,5%, o minério é submetido a britagem, moagem, flotação e secagem, obtendo-se o concentrado cujo teor de **cobre** contido já alcança 30%.

O concentrado é então submetido a um forno *flash*, de onde sai o mate com teor de 45% a 60%, e este ao forno conversor de onde se obtêm o blíster, com 98,5% de **cobre**. Dependendo da pureza desejável para o **cobre**, tendo em vista a sua utilização final, o blíster pode ser submetido apenas ao refino a fogo, de onde se obtêm **cobre** com 99,7% (anodo) ou ser também refinado eletroliticamente, atingindo um grau de pureza de 99,9% (catodo). Os catodos são submetidos ao processo de refusão para obtenção do **cobre** no formato de tarugos ou placas.

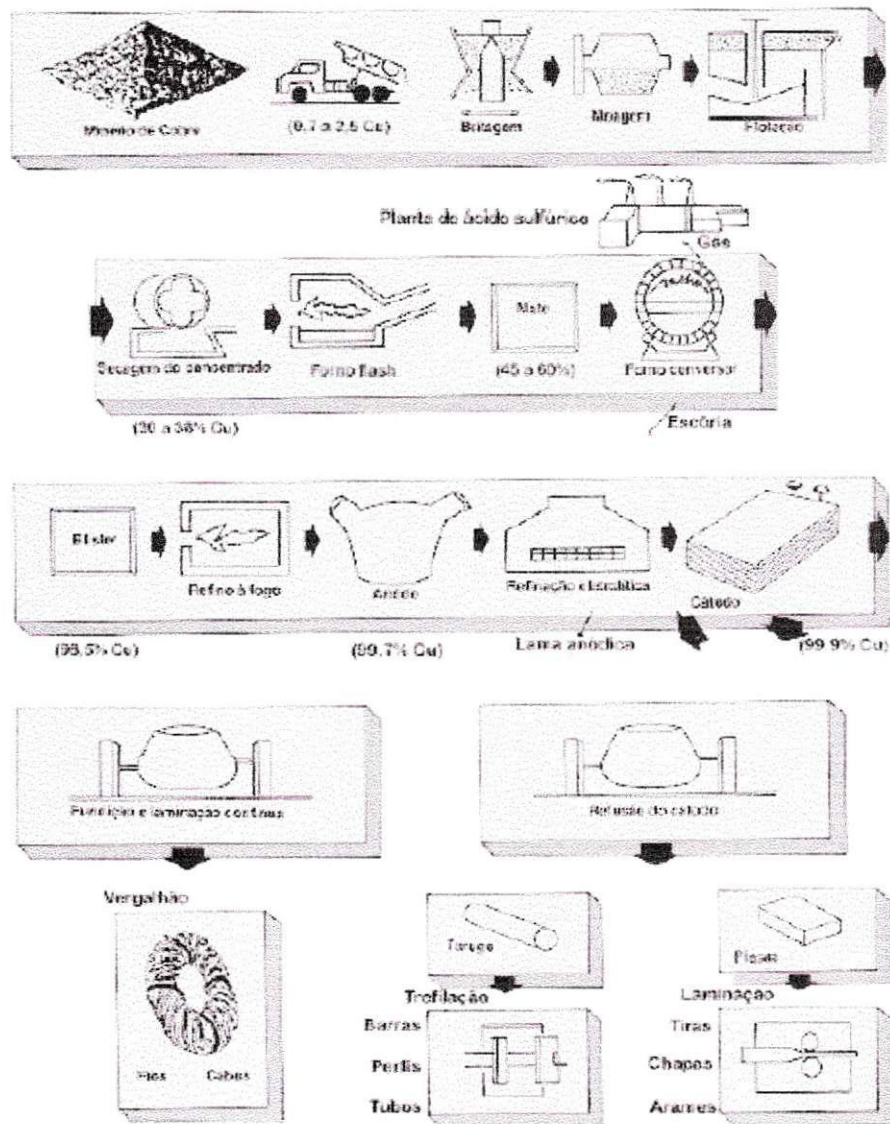


Figura 1 – Diagrama de produção do cobre (ANDRADE *et al*, 1997).

5.2 Processo Hidrometalúrgico

A hidrometalurgia é apropriada, principalmente, para a extração de **cobre** de minérios oxidados de baixo teor. A utilização deste processo para minérios sulfetados implica uma etapa anterior de beneficiamento do minério para obtenção do concentrado sulfetado, o qual deve sofrer processo de ustulação para transformação em produto intermediário oxidado.

O processo hidrometalúrgico consiste, em linhas gerais, em lixiviar o minério moído com solventes adequados, sendo o mais utilizado o ácido sulfúrico.

Seguem-se a filtração da solução e a precipitação do metal através de concentração (utilizando-se ferro), de aquecimento ou eletrólise.

No caso da eletrólise, promove-se a eletrodeposição do **cobre** sob a forma de catodos com 99,9% de pureza. Trata-se do processo *SX-EW (solvent extraction and eletrowinning)*.

O processo SX-EW, ao contrário do processo pirometalúrgico que é utilizado há bastante tempo, foi desenvolvido há apenas cerca de 25 anos. Neste período, sua utilização vem crescendo largamente devido às facilidades de aproveitamento de depósitos oxidados de baixo teor, partindo-se diretamente do minério e obtendo-se o catodo com teor 99,9% de **cobre**, sem necessitar de fundição e refinaria.

Além do menor custo de produção do **cobre** obtido pelo processo SX-EW, podem ser citadas vantagens relativas ao meio ambiente, visto que não há emissão de gases poluentes. No processo pirometalúrgico, a etapa de fundição tem como subproduto gás com enxofre, sendo por este motivo necessária a existência de planta acoplada para produção de ácido sulfúrico a partir deste gás.

5.4 Formas do cobre

O **cobre** refinado é fundido e moldado em várias formas antes de ser encaminhado aos fabricantes de ligas e de produtos comerciais. As formas utilizadas são: barras para fios (*wirebars*), placas (*cakes*), cilindros (*billets*), lingotes (*ingots*) e pó.

5.5 Reservas minerais

As reservas mundiais de **cobre** atingiam em 1997, cerca de 607 milhões de toneladas de metal contido. Considerando a demanda da época, tais reservas dariam para abastecer o mundo por um período aproximado de 50 anos.

Mais de 40% das reservas mundiais estão localizados no Chile e nos Estados Unidos, cada um destes países com 27% e 15% das reservas mundiais de **cobre**, respectivamente. Outras reservas significativas estão na Polônia (6%), Zâmbia (6%), Rússia (5%) e Peru (4%).

As reservas brasileiras medidas e indicadas atingiram em 1995, 11,6 milhões de toneladas de **cobre** contido, representando cerca de 1,9% do total mundial.

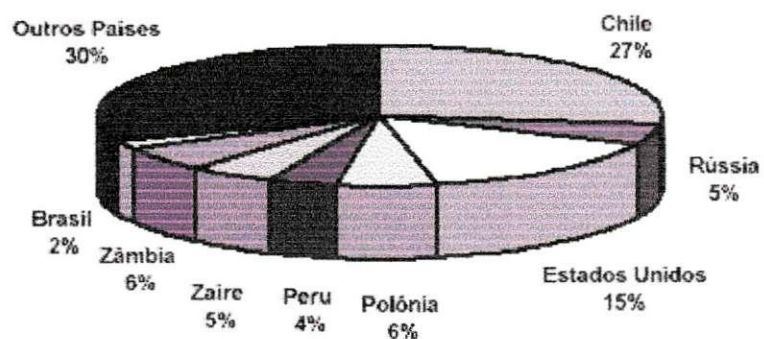


Figura 2 – Reservas mundiais de cobre (ANDRADE *et al*, 1997).

6. Conceitos

6.1 Resistência e resistividade

Em um tubo de água, o comprimento e a seção transversal do tubo determinam a resistência que o tubo fornece ao fluxo de água. Tubos longos com seções transversais pequenas oferecem grandes resistências. Efeito análogo é visto no caso elétrico. Para um grande número de materiais, a resistência de um material com comprimento L e seção transversal A é

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (1)$$

Tabela 1 – resistividade de alguns materiais a 20°C

Material	Resistividade ρ ($\Omega \cdot m$)
Condutores	
Prata	$1,59 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,72 \times 10^{-8}$
Ouro	$2,44 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,82 \times 10^{-8}$
Tungstênio	$5,6 \times 10^{-8}$
Ferro	$9,70 \times 10^{-8}$
Mercúrio	$95,8 \times 10^{-8}$
Níquel-Cromo	100×10^{-8}
Semicondutores	
Carbono	$3,5 \times 10^{-5}$
Germânio	0,5*
Silício	20-2300*
Isolantes	
Mica	$10^{11}-10^{15}$
Borracha (dura)	$10^{13}-10^{16}$
Teflon	10^{16}
Madeira	3×10^{10}

*a depender da pureza

onde ρ é uma constante de proporcionalidade conhecida como resistividade do material, cuja unidade é $\Omega \cdot m$, e pode ser vista na equação (1). Todos os condutores na tabela 1 são metais e possuem pequenas resistividades. Isolantes, como a borracha, possuem grandes

resistividades. Materiais como o germânio e silício possuem resistividades intermediárias e, por isso, são chamados de semicondutores.

Resistividade é uma propriedade inerente do material, da mesma forma que a densidade é também uma propriedade inerente do material. Resistência, por outro lado, depende tanto da resistividade quanto da geometria do material. Assim, se dois fios podem ser feitos de **cobre**, cuja resistividade é $1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, a equação (1) indica que um fio com uma área de seção transversal maior possui uma menor resistência. Cabos que conduzem elevadas correntes são mais espessos, de modo que a resistência do condutor seja mantida a menor possível.

A resistividade do material depende da temperatura. Nos metais, a resistividade aumenta com o aumento da temperatura, enquanto que nos semicondutores o inverso acontece. Para muitos materiais e faixas limitadas de temperatura, é possível expressar a dependência entre resistividade e temperatura,

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2)$$

nesta expressão ρ e ρ_0 são as resistividades a temperaturas T e T_0 , respectivamente. O termo α é chamado de coeficiente de temperatura da resistividade. Quando a resistividade cresce com o aumento da temperatura o coeficiente é positivo, este é o caso dos metais. Quando a resistividade decresce com o aumento da temperatura, o coeficiente é negativo, este é o caso do carbono, do germânio e do silício.

Tabela 2 – coeficientes de temperatura da resistividade de vários materiais a 20°C

Material	Coeficiente de temperatura α [(°C) ⁻¹]
Alumínio	0,00039
Carbono	-0,0005
Cobre	0,00393
Germânio	-0,05
Ouro	0,0034
Ferro	0,0050
Mercúrio	0,00089
Níquel-Cromo	0,0004
Silício	-0,07
Prata	0,0038
Tungstênio	0,0045

6.2 Efeito pelicular

A distribuição uniforme de corrente através da seção de um condutor existe apenas para a corrente contínua. Em corrente alternada, o aumento da frequência provoca uma distribuição não-uniforme de corrente, fenômeno este chamado de “efeito pelicular” ou “efeito *skin*”, pois em um condutor circular a densidade de corrente geralmente aumenta do interior em direção a superfície.

6.3 Corrente elétrica

O movimento ou o fluxo de elétrons através de um condutor é chamado de corrente elétrica e é representada pelo símbolo I . A unidade básica na qual a corrente é medida é o ampère (A). Um ampère de corrente é definido como o movimento de um Coulomb ($6,28 \times 10^{18}$ elétrons) por qualquer ponto de um condutor durante o tempo de um segundo.

6.4 Tensão

O termo tensão, representado pelo símbolo E , é comumente usado para indicar tanto a diferença de potencial quanto a força eletromotriz. A unidade na qual a tensão é expressa é o volt (V). Um volt é definido como a magnitude da força eletromotriz necessária à passagem, através de um condutor de resistência de um ohm, a corrente de um ampère.

6.5 Energia

A definição mais usual, encontrada na maioria dos livros, afirma que “a energia é a medida da capacidade de efetuar trabalho”. Em 1872, Maxwell propôs uma definição que pode ser considerada mais correta que a anterior: “energia é aquilo que permite a mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que se opõe a esta mudança”. Estão nesta definição duas idéias importantes: as modificações de estado implicam em vencer resistências e a energia é que permite modificações de estado.

6.5.1 Formas da energia

A energia pode se apresentar de diversas formas.

Ao nível atômico podem ser identificadas as *energias nuclear e atômica*. No interior das estrelas, a energia nuclear resulta da fusão dos núcleos de átomos leves, como do hidrogênio, a partir de uma diferença de massa que corresponde a significativas quantidades de energia liberada. Já a energia atômica esta relacionada com processos de fissão de átomos pesados, como urânio, tório e plutônio, em decorrência da instabilidade natural ou provocada de alguns isótopos destes materiais, que tendem a converter-se em outros materiais com número atômico mais baixo, com liberação de energia devida à perda de massa.

A *energia química* depende das reações químicas e da liberação da energia acumulada na forma de ligação entre átomos e moléculas. Sua aplicação típica é associada aos processos de combustão, em motores, fornos e caldeiras.

A *energia elétrica* é frequentemente associada à circulação de cargas elétricas através de um campo de potencial elétrico, sendo definida pelo produto entre a potência elétrica e o tempo durante o qual esta potência se desenvolve. Por sua vez, a potência elétrica é definida como o produto entre a corrente e a tensão medida entre os dois pontos

onde circula a corrente. No caso particular da corrente alternada trifásica, a potência é dada pela expressão,

$$P_{elétrica} = V.I.\sqrt{3} \quad (3)$$

onde V e I correspondem, respectivamente, à tensão entre as fases e à corrente em uma das fases. Outra particularidade importante da energia elétrica é a possibilidade de separar seus dois componentes básicos: a energia ativa, associada às cargas de caráter resistivo e a energia reativa, decorrente da formação periódica de campos elétricos e magnéticos no circuito.

A *energia térmica* pode apresentar-se como *irradiação térmica* ou *energia interna*, algumas vezes equivocadamente denominada de calor. Como radiação, a energia térmica não apresenta qualquer meio material de suporte, já que se trata de uma irradiação eletromagnética, com magnitude e distribuição espectral dada em função da temperatura do corpo emissor. A energia interna corresponde à capacidade de promover mudanças associadas à agitação térmica de um material, que pode ser medida por sua temperatura.

A *energia mecânica* pode ser potencial ou cinética. No primeiro caso, a energia mecânica pode ser potencial elástica, tal como se acumula em molas, ou gravitacional que depende da posição de um corpo em um campo gravitacional.

6.5.2 Leis de conversão de energia

Uma forma de energia pode, eventualmente, ser convertida em outra de modo espontâneo ou intencional, permitindo adequar-se a alguma utilização desejada.

Todos os processos de conversão de energia são regidos por duas leis físicas fundamentais.

A primeira lei básica é a *Lei da Conservação de Energia*. A energia não se cria nem se destrói, salvo nos casos em que ocorrem reações atômicas ou nucleares, quando podem ocorrer transformações de massa em energia. Assim, a soma da energia e da massa do universo é uma constante. Como na grande maioria das situações a dualidade massa-energia não precisa ser considerada, é suficiente afirmar que o somatório dos fluxos e estoques energéticos em um processo ou sistema é constante,

$$\sum E_{ENTRADA} = \sum E_{SAIDA} + \Delta E_{SISTEMA} \quad (4)$$

Para um processo em regime permanente, no qual não ocorrem variações ao longo do tempo, não ocorrerão variações de estoque, $\Delta E_{SISTEMA}$, e naturalmente a soma dos fluxos energéticos na entrada e na saída devem ser iguais. Esta lei, também conhecida como a Primeira Lei da Termodinâmica, foi formalmente estabelecida por volta de 1840 por Joule e Meyer, permitindo efetuar balanços energéticos, determinar perdas, enfim, quantificar os fluxos energéticos. Baseia-se também o conceito de desempenho ou eficiência energética de um sistema energético, η_{ENERG} , relacionando o efeito energético útil com o consumo energético no sistema, como se explica,

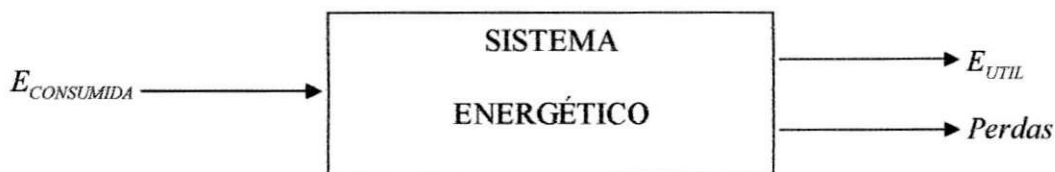


Figura 3 – Sistema energético generalizado

$$\eta_{ENERG} = \frac{E_{UTIL}}{E_{CONSUMIDA}} = \frac{E_{CONSUMIDA} - Perdas}{E_{CONSUMIDA}} = 1 - \frac{Perdas}{E_{CONSUMIDA}} \quad (5)$$

A segunda lei básica dos processos energéticos é a *Lei da Dissipação de Energia*, segundo a qual em todos os processos reais de conversão de energia ocorrem perdas, cujo valor corresponde ao incremento líquido da entropia do universo. Assim, a entropia tende sempre a aumentar no mundo real, já que apenas nos processos energéticos idealmente perfeitos ou reversíveis, não ocorre esta geração de entropia. Esta lei física, também conhecida como Segunda Lei da Termodinâmica, apresenta especial relevância no caso dos fluxos de calor, para os quais a conversibilidade em energia mecânica depende da temperatura da fonte térmica, conforme a expressão do rendimento máximo das máquinas térmicas, desenvolvida por Carnot em 1824:

$$\eta_{REVERS} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (6)$$

nesta expressão, válida para máquinas térmicas reversíveis, T_1 e T_2 correspondem, respectivamente, à temperaturas das fontes térmicas de alta e baixa temperatura.

6.6 Potência

Um conceito freqüentemente associado ao de energia. Potência corresponde ao fluxo de energia no decorrer do tempo, de enorme importância ao se tratar de processos humanos e econômicos, onde o tempo é essencial. Por exemplo, a taxa na qual um material é oxidado pode representar a possibilidade de sua utilização como combustível ou apenas a formação lenta de um resíduo, como é caso da queima de madeira e da formação de ferrugem. Ambos são processos energéticos, mas de sentido totalmente diverso devido às distintas taxas nas quais ocorrem.

6.7 Eficiência energética

O conceito de eficiência energética está relacionado ao processo de conversão de energia da sua forma primária ao uso final. Em termos práticos, melhorar a eficiência de um determinado serviço de energia significa reduzir o consumo de energia primária, diminuindo as perdas e eliminando desperdícios ao longo de toda a cadeia de transformação.

Quantitativamente, a eficiência energética pode ser avaliada mediante duas leis básicas: a primeira obtida pela relação entre a energia útil e os insumos energéticos despendidos para obtê-la; a segunda lei está relacionada com o mínimo de energia necessário para realizar determinada tarefa à energia de fato utilizada.

7. Utilização particular do cobre em circuitos elétricos e eletrônicos

O principal uso do **cobre** nos tempos modernos tem sido como condutor elétrico. O **cobre** possui uma condutividade elétrica por unidade de volume muito alta. Pode ser apresentado em forma de fios, simples ou múltiplos fios, que podem ser dobrados uma ou mais vezes.

A capacidade de associação do **cobre** com outros metais para a formação de ligas amplia muito a sua usabilidade em aplicações elétricas e eletrônicas. Outra de suas características é a resistência à corrosão.

7.1 A geração de energia elétrica

As máquinas síncronas, também chamadas de geradores síncronos ou alternadores são grandes máquinas que geram energia elétrica em usinas termoelétricas, nucleares ou hidrelétricas. São os primeiros dispositivos de conversão de energia nos sistemas elétricos mundiais na atualidade.

O gerador síncrono é composto pela carcaça do estator, o núcleo com ranhuras e enrolamento trifásico de **cobre**, o rotor com um enrolamento de **cobre** (enrolamento de campo) distribuído em sua superfície ou em pólos salientes. Este recebe a energia mecânica de uma fonte e é acionado a uma velocidade constante. O enrolamento do rotor, energizado a partir de uma fonte contínua, gera um campo magnético girante no entreferro, induzindo uma tensão no enrolamento do estator.

7.1.1 A repotenciação de geradores síncronos

A repotenciação de turbinas e geradores de usinas hidrelétricas tem sido apresentada como uma alternativa ao aumento da capacidade de geração das usinas hidrelétricas. Trata-se da melhoria da capacidade de condução das bobinas pela substituição dos enrolamentos antigos por enrolamentos novos com mais **cobre**, substituição do núcleo com novo projeto de ranhura e enrolamento, substituição dos pólos com novas bobinas de **cobre** com aletas em vez das bobinas de alumínio, mudança na isolação, modificação na ventilação dos geradores. Os benefícios são aumento da potência, diminuição das perdas, aumento da capacidade de sobrecarga, temperatura compatível, melhor dissipação térmica e menor

ruído, tomando possível obter um aumento na potência elétrica gerada, sem alteração na força motriz.

A repotenciação representa o aumento da eficiência dos sistemas de geração de energia, com o aumento da potência dos geradores, chegando em até 40% a mais de acréscimo na potência. Outro aspecto positivo é o de promover o melhor uso do potencial hídrico das usinas, principalmente o das usinas com mais de 30 anos.

7.2 Transformadores

Os transformadores são equipamentos elétricos que, por indução eletromagnética, transformam tensão e corrente alternadas de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário, terciário, etc...), com a mesma frequência, e geralmente com valores diferentes de tensão e corrente. Eles são constituídos, em sua forma elementar, de duas bobinas de **cobre** (circuito elétrico) uma no circuito dito primário, outra no circuito dito secundário, montadas sobre um núcleo fechado de material ferromagnético (circuito magnético).

De larga aplicação na eletroeletrônica, a função mais comum do transformador é transferir energia elétrica de um circuito de entrada para um circuito de saída, elevando ou baixando os valores de tensão e corrente, mantendo a frequência invariável. Na prática, entretanto, esta transferência de energia, do primário para o secundário, se dá através do circuito magnético e é acompanhada de perdas em ambos os circuitos: elétricos e magnético.

A acoplagem magnética é usada para transferir energia elétrica de um conjunto de espiras para outro. O conjunto de espiras conectado a uma fonte é chamado de *enrolamento primário*. O conjunto de espiras para o qual a energia elétrica é transferida e que entrega esta energia para a carga de um circuito é chamado de *enrolamento secundário*.

Os enrolamentos primário e secundário são bobinas de fios de **cobre**, na maioria dos casos com $n_1 \neq n_2$ onde n_1 é o número de espiras do enrolamento primário e n_2 é o número de espiras do enrolamento secundário.

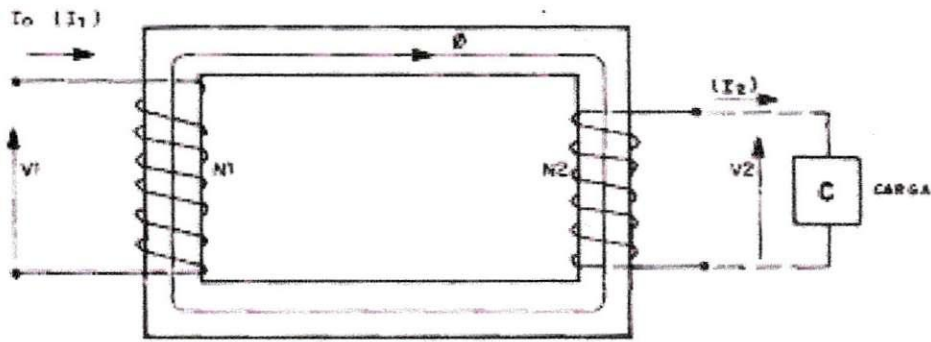


Figura 4 - Transformador monofásico

O transformador tem aplicações importantes na engenharia elétrica além da conversão de energia elétrica. Nos sistemas de comunicações variando a frequência de sinais, como transformadores de entrada, transformadores intermediários, transformadores de saída em circuitos de áudio e televisão. Nos sistemas de transmissão e distribuição como elevadores de tensão possibilitam a transmissão de energia por longas distancias com a diminuição das perdas nas linhas de transmissão. Usados também como abaixadores de tensão nos pontos de distribuição de energia elétrica.

7.2.1 Formas construtivas

Quanto ao número de fases

Considerando somente os transformadores de potência e de distribuição, podem ser construídos quanto ao número de fases, de acordo com a característica da carga que irá alimentar, os seguintes tipos: transformadores monobuchas (usados em sistemas de distribuição rural), transformadores bifásicos e transformadores trifásicos.

Quanto ao tipo de ligação

Os transformadores trifásicos, mais comumente usados, podem ter seus enrolamentos ligados de três diferentes maneiras: ligação triangulo, ligação estrela e ligação zig-zague.

Quanto ao meio isolante

Os transformadores são classificados quanto ao meio isolante em dois grupos: transformadores em líquido isolante e transformadores a seco.

7.2.2 Perdas no transformador

Quando uma bobina cujo núcleo é constituído de material não magnético é percorrida por uma corrente elétrica verificam-se perdas no condutor de acordo com a lei de Joule:

$$P = I^2 .R \quad (7)$$

Sendo o **cobre** o condutor mais utilizado nos aparelhos e maquinas elétricas, essas perdas são geralmente designadas com o nome de perdas no **cobre**.

Empregando-se para núcleo da bobina considerada uma substância ferromagnética, quando o condutor for percorrido por uma corrente contínua de intensidade constante, não há perdas adicionais a considerar; quando a corrente é contínua, porém, de intensidade variável, além das perdas no **cobre** verificam-se também perdas no núcleo magnético que tende a aquecer-se.

Esse efeito é ainda mais notável para correntes alternadas, e tanto maior quanto mais alta a frequência destas correntes.

Sendo os núcleos magnéticos constituídos de ligas cujo principal constituinte é o ferro, tais perdas são designadas de modo geral sob o nome de perdas no ferro, e são observadas no próprio interior do material ferromagnético. Dentre elas, podemos distinguir as perdas conseqüentes de correntes induzidas no interior da massa ferromagnética, chamadas perdas por corrente de Foucault, e ainda outras conseqüentes ao fenômeno de histerese, que são chamadas perdas por histerese.

Quando se tratam de núcleos de grande espessura, também existe o efeito pelicular que tende a aumentar as perdas no ferro e no **cobre**.

7.2.3 Relação de transformação

Se o núcleo de ferro de um transformador é considerado estar operando sob a condição ideal de 100% ou acoplamento unitário, a relação entre a tensão do enrolamento primário e a tensão do enrolamento secundário é igual à relação existente entre o número de espiras do enrolamento primário e secundário. Esta relação existente é expressa pela seguinte fórmula:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (8)$$

Onde:

E_p = tensão no primário, em volts.

E_s = tensão no secundário, em volts.

N_p = número de espiras do enrolamento primário.

N_s = número de espiras do enrolamento secundário.

Esta equação mostra que a relação de tensões pode variar a partir da variação da relação entre as espiras do enrolamento primário e secundário.

7.2.4 Transferência de potência

Apesar de o transformador poder elevar e reduzir uma tensão, não pode em qualquer condição, transferir mais potência ao secundário do que a existente no circuito primário. Se desconsiderarmos as perdas no **cobre** e no núcleo, a potência no circuito primário é igual àquela disponível a carga no circuito secundário, ou:

$$E_p I_p = E_s I_s \quad (9)$$

Onde:

I_p = corrente no enrolamento primário, em ampères.

I_s = corrente no enrolamento secundário, em ampères.

Esta equação mostra que se a tensão é elevada, a corrente tem que ser reduzida, considerando o produto $E.I$ é constante. Da mesma forma, se a tensão é reduzida, a corrente disponível para a carga no secundário será maior que a corrente no enrolamento primário.

7.2.5 Eficiência do transformador

A eficiência de um transformador é a medida da quantidade de potência entregue pelo enrolamento secundário, quando uma determinada quantidade de potência é aplicada ao enrolamento primário. A eficiência de um transformador é também uma indicação da magnitude das perdas no núcleo e no **cobre** que ocorrem no transformador. É expressa pela fórmula,

$$Eficiencia(\%) = \frac{P_p}{P_s} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

P_p = potência entregue ao enrolamento primário, em watts.

P_s = potência disponível no enrolamento secundário, em watts.

7.2.6 Transformadores de potência

Os transformadores de potência são empregados na conversão de tensões e correntes em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Seus principais componentes são os enrolamentos de **cobre**, o núcleo magnético, o invólucro metálico, o sistema de comutação, o sistema de refrigeração, o líquido isolante, os terminais e acessórios de controle e proteção.

No Brasil alguns fabricantes de transformadores de potência, bem como transformadores de distribuição são a Trafo, Cemec, WEG, Romagnole, Hitachi, entre outros.

7.2.7 Transformadores de distribuição

O transformador que conecta o sistema primário de alta tensão (4,16kV a 34,5kV) ao consumidor (480V ou menor) é usualmente chamado de transformador de distribuição. A variedade de relações, conexões, tipos de invólucro, esquemas de proteção, e aplicações de carga é muito grande. Estes transformadores podem ser monofásicos ou trifásicos e em potências nominais que variam em torno de 5kVA a 500kVA.

Os transformadores de distribuição são identificados por suas potências aparentes, expressas em kVA, que indicam a carga contínua que o transformador suporta, sem exceder a temperatura de operação de 55°C ou 65°C. Em serviço, um transformador de distribuição é raramente usado em sua capacidade máxima continuamente e, normalmente, funciona num ciclo de carga diário.

7.2.8 Transformadores *pad-mounted*

São usados em regiões urbanas, instalações industriais, condomínios residenciais, escolas, praças ou em lugares onde exista o trânsito de pedestres e o espaço físico seja insuficiente para a construção de estações abrigadas convencionais.

Este modelo característico de transformador tem como característica principal a compactação, ou seja, a parte ativa e as buchas são dispostas de tal maneira que sua aparência externa seja de uma mini-subestação.

7.2.9 Transformadores de distribuição auto-protegidos

Ao contrário dos transformadores de distribuição convencionais, possuem um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, sobrecargas e falhas no secundário. Além disso, apresentam sinalização visual quando em funcionamento em condições de sobrecarga.

Principais benefícios: economia na instalação, menores custos operacionais, evita o desligamento da rede, avisa o ponto de troca do transformador, maior proteção contra raios, maior durabilidade, maior capacidade de sobrecarga de curta duração.

7.2.10 Transformadores para forno

São transformadores utilizados para a alimentação de fornos elétricos. Normalmente, são especificados para operação com correntes elevadas e regime de carga muito variável.

7.2.11 Transformadores para aterramento

São transformadores utilizados em sistemas para os quais é desejável possuir ponto de terra acessível em local onde não existe transformador que possa ser aterrado.

7.2.12 O autotransformador

O autotransformador é um tipo especial de transformador. Consiste de um simples enrolamento contínuo que é ajustado de acordo com a necessidade de elevar ou reduzir a tensão. Quando é usado como um transformador elevador de tensão, o enrolamento primário inteiro é uma parte do enrolamento secundário. Quando usado como transformador redutor de tensão, o enrolamento secundário inteiro é uma parte do enrolamento primário.

A principal desvantagem do autotransformador é não possuir isolamento elétrica entre a entrada de potência no primário e a carga no secundário. Sob certas condições, essa situação pode introduzir o risco de choque elétrico.

7.2.13 O transformador de isolamento

Um transformador de isolamento possui uma relação de transformação de 1:1. Por esta razão, a tensão não pode ser elevada ou reduzida. A primeira função é servir como um dispositivo de segurança pela isolamento de um condutor aterrado da entrada de energia de um chassi ou de qualquer parte de um circuito de carga. O uso de um transformador de isolamento, entretanto, não reduz o risco de choque se o contato é feito através do enrolamento secundário do próprio transformador.

7.2.14 O transformador casador de impedância

Uma quantidade máxima de potência é transferida de uma fonte para uma dada carga quando a impedância (ou resistência) da carga é igual a impedância interna da fonte. Esta condição pode ser ilustrada por meio de um simples circuito com um resistor e uma bateria. A impedância da bateria é, para propósitos práticos, igual a sua resistência interna R_E . Neste circuito, a resistência da carga, R_L varia, enquanto a resistência interna da bateria permanece constante. Ao variar a resistência da carga, a medida que a resistência da carga se aproxima da resistência interna da bateria, a potência entregue a carga acrescenta em direção à máxima potência, o que ocorre quando R_L é igual a R_E . Quando a resistência da carga é pouco menor ou maior que a resistência interna da bateria, a potência entregue a carga diminui.

7.2.15 Transformadores para instrumentos

Os transformadores para instrumentos são dispositivos elétricos projetados e construídos especificamente para alimentarem instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção.

São dois os tipos de transformadores para instrumentos:

- **Transformador de potencial (TP):**

É um transformador para instrumento cujo enrolamento primário é ligado em derivação com um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção. Na prática é considerado um redutor de tensão, pois a tensão no seu circuito secundário é normalmente menor que a tensão no seu enrolamento primário.

- **Transformador de corrente (TC):**

É um transformador para instrumento cujo enrolamento primário é ligado em série em um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de corrente de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção. Na prática é considerado um redutor de corrente, pois a corrente que percorre o circuito

secundário é normalmente menor que a corrente que percorre o seu enrolamento primário.

7.3 Motores elétricos

O motor elétrico é uma máquina criada com o objetivo de energia elétrica em energia mecânica. A estrutura básica de um motor elétrico é composta de um estator e um rotor separados pelo entreferro e envolvidos por uma carcaça.

Tanto estator quanto rotor são construídos de material ferromagnético com ranhuras, e possuem enrolamentos de **cobre**.

Os tipos mais comuns de motores elétricos são:

- **Motores de corrente alternada** – são os mais utilizados, por que a distribuição de energia elétrica é feita normalmente em corrente alternada. Os principais tipos são motor de indução e motor síncrono.
- **Motores de corrente contínua** – são motores de custo mais elevado e, além disso, precisam de uma fonte de corrente contínua, ou de um dispositivo que converta a corrente alternada comum em corrente contínua. Podem funcionar com velocidade ajustável entre amplos limites e se prestam a controles de grande flexibilidade e precisão.

7.3.1 Rendimento do motor elétrico

O motor elétrico recebe energia elétrica e a transforma em energia mecânica. O rendimento define a eficiência com que é feita esta transformação.

Chamando de potência útil (P_U) a potência mecânica disponível, e potência absorvida (P_A) a potência elétrica que o motor retira da rede, o rendimento será a relação entre as duas, ou seja:

$$\eta = \frac{P_U (W)}{P_A (W)} = \frac{736 \times P (cv)}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi} \times 100 = \frac{1000 \times P (kW)}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi} \quad (11)$$

η = rendimento do motor;

V = tensão entre quaisquer das fases;

I = corrente de linha;

$\cos\varphi$ = fator de potência.

Sendo que:

$$\text{Potência absorvida} = \text{Perdas no núcleo do estator e perdas no cobre do estator} + \text{Potência transferida através do entreferro}$$

$$\text{Potência transferida através do entreferro} = \text{Perdas no cobre do rotor} + \text{Potência mecânica gerada}$$

$$\text{Potência mecânica gerada} = \text{Perdas rotacionais} + \text{Potência mecânica de saída (potência útil)}$$

O somatório de todas as perdas nos fornece outra expressão para o rendimento:

$$\eta = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{P_A} \quad (12)$$

onde:

$$\sum \text{Perdas} = \text{perdas no núcleo do estator} + \text{perdas no cobre do estator} + \text{perdas no cobre do rotor} + \text{perdas rotacionais.}$$

7.3.2 Motor de indução

O motor de indução trifásico é composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor.

O estator é formado por:

- Carcaça, que é a estrutura de suporte do conjunto;
- Núcleo de chapas magnéticas;
- Enrolamento trifásico, ou seja, três conjuntos iguais de bobinas de **cobre**, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado a rede trifásica de alimentação.

O rotor é formado por:

- a) Eixo, que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor;
- b) Núcleo de chapas magnéticas;
- c) Enrolamento trifásico, fechado sobre si mesmo, isto é, os três terminais são também ligados a um ponto comum, ou em curto circuito através de uma resistência trifásica externa.

O enrolamento do rotor pode ser também constituído de barras não isoladas e interligadas por anéis de curto-circuito; é o enrolamento “de gaiola” e o motor construído assim se chama “motor de gaiola”.

O que caracteriza o motor de indução é que só o estator é ligado à rede de alimentação. O rotor não é alimentado externamente e as correntes que circulam, nele são induzidas eletromagneticamente pelo estator, daí o nome motor de indução.

7.3.3 Motor de corrente contínua

O motor de corrente contínua ainda é extensivamente usado na indústria. Sua velocidade pode ser controlada dentro de uma larga faixa com relativa facilidade. Grandes motores de corrente contínua são usados como máquinas operatrizes, impressoras, meio de transporte, ventiladores, bombas de água, guindastes, máquinas na indústria de papel, na indústria têxtil, etc. Os motores de corrente contínua ainda são preferencialmente usados como motores de tração usados em locomotivas. Pequenos motores são usados como dispositivos de controle de posicionamento e servo-motores.

No motor de corrente contínua, o enrolamento do rotor é chamado de enrolamento de armadura, enquanto que o enrolamento do estator é chamado enrolamento de campo. O estator possui pólos salientes que são excitados por um ou mais enrolamentos de campo, chamados de enrolamentos de campo em paralelo ou enrolamentos de campo em série.

7.3.4 Motor trifásico de alto rendimento

De uma maneira geral, os motores elétricos são responsáveis por 55% da energia elétrica consumida nas indústrias. O gasto com o consumo de energia elétrica de um motor, ao longo de sua vida útil, pode chegar a 100 vezes o seu valor de compra inicial.

Um motor de alto rendimento é um motor com desempenho superior ao motor padrão, tanto em relação ao rendimento, quanto em relação à vida útil. Por ser um motor com baixas perdas, reduz significativamente a elevação de temperatura, fator este que determina o tempo maior de vida útil do motor.

Este melhor desempenho é conseguido através das características técnicas diferenciadas, algumas delas apresentadas a seguir:

- Chapa magnética com baixas perdas – reduz a corrente magnetizante e incrementa o rendimento;
- Ranhuras dimensionadas por computador – incremento no rendimento e fator de potência;
- Enrolamento de dupla camada – reduz perdas suplementares;
- **Maior quantidade de cobre** – reduz perdas no **cobre**;
- Ventilador adequado – reduz as perdas mecânicas;
- Anel curto e barras do rotor super dimensionadas – menores perdas por dissipação térmica.

Os motores de alto rendimento apresentam custos iniciais de aquisição superiores aos motores convencionais. Entretanto, o elevado rendimento compensa a eventual diferenciação no preço. A acentuada economia de energia elétrica promove o rápido retorno de investimento inicial.

Cálculo do retorno do investimento:

$$R(\text{anos}) = \frac{\Delta C}{0,736 \cdot cv \cdot Nh \cdot CkWh \cdot \left(\frac{100}{\eta_P} - \frac{100}{\eta_{AR}} \right)} \quad (13)$$

R = retorno do investimento em anos;

ΔC = diferença entre o custo dos motores de alto rendimento e o motor convencional;

c_v = potência do motor em cavalo-vapor;

Nh = número de horas trabalhadas em um ano;

$CkWh$ = custo do kW.h;

η_P = rendimento do motor convencional;

η_{AR} = rendimento do motor de alto rendimento.

7.4 Condutores elétricos

Condutor de energia é o meio pelo qual se transporta potência desde um determinado ponto, denominado fonte ou alimentação, até um terminal consumidor.

Os condutores elétricos apresentam diferentes formas e tipos de fabricação, cada um deles utilizado de acordo com suas características específicas.

São diversas as formas com que os condutores são fabricados, e cada uma delas é própria para um determinado tipo de aplicação: fio redondo sólido, condutor redondo normal, condutor redondo compacto, condutor setorial compacto, condutor flexível e condutor redondo compacto especial.

Praticamente, somente dois metais se destinam à fabricação de condutores elétricos: o alumínio e o **cobre**.

Condutores de alumínio – são usados, praticamente, em aplicações de redes e linhas aéreas de distribuição e transmissão de energia elétrica não localizadas nas proximidades da orla marítima. O principal obstáculo em popularizar a aplicação dos condutores de alumínio é a dificuldade de conexão, quando o outro elemento a ser conectado é o **cobre**, pois nessa região de contato há uma acelerada deterioração do alumínio, com a formação de uma película de óxido de alumínio, responsável pelo aquecimento exagerado e pela destruição da conexão.

Condutores de cobre – dominam o mercado nas aplicações de instalações elétricas, sejam prediais ou industriais e nas redes aéreas localizadas no litoral. O **cobre** utilizado nos condutores elétricos deve ser purificado através de processo de eletrólise, por isso recebe o nome de **cobre eletrolítico**, conseguindo-se, dessa forma, um grau de pureza de 99,9%. Posteriormente, é submetido a processos térmicos para se obter a têmpera desejada.

O **cobre** é usado nas redes aéreas apenas nas baixas tensões, pois seu peso permite apenas seções de áreas retas de pequena dimensão, por isso a utilização do alumínio é mais freqüente em linhas de alta tensão, pois são mais leves. Já nas redes subterrâneas não existe esse problema.

7.4.1 Isolamento

Existe uma diferença importante entre os termos *isolação* e *isolamento*. *Isolação* exprime a parte qualitativa, do material empregado, como por exemplo: *isolação* de polietileno reticulado. *Isolamento* tem um sentido quantitativo, por exemplo: cabo com isolamento para 750 V.

As *isolações* sólidas podem ser fabricadas a partir dos seguintes materiais: termoplásticos, termofixos.

- a) **Termoplásticos** – fabricadas à base de cloreto de polivinila (PVC), tem a propriedade de se tornarem gradativamente amolecidas a partir de 120°C, passando ao estado pastoso, até desagregar-se do material condutor correspondente.
- b) **Termofixos** – fabricadas a partir de dois elementos distintos: polietileno reticulado (XLPE) e borracha etileno-propileno (EPR).

7.4.2 Blindagem

São materiais semicondutores ou simplesmente condutores que envolvem o condutor elétrico e ou a sua *isolação* com a finalidade de confinar o campo eletrostático ou de escoar as correntes induzidas e de curto-circuito. A *blindagem* de um cabo é feita no próprio condutor e externamente.

7.4.3 Formação de cabos

Os cabos de energia podem ser construídos de maneiras diversas em função de sua destinação.

- a) **Cabos isolados** – são aqueles constituídos por um único condutor e dotados apenas de *isolação*.

- b) **Cabos unipolares** – são os cabos isolados dotados de uma capa de proteção. Quando não se quer especificar, os cabos isolados e unipolares são conhecidos como cabos singelos.
- c) **Cabos multipolares** – são aqueles constituídos por vários cabos isolados e dotados de capa de proteção. Podem ser constituídos da seguinte forma: cabos bipolares (dois cabos isolados), cabos tripolares (três cabos isolados) e cabos quadripolares (quatro cabos isolados).

7.5 Buchas de passagem

São elementos isolantes próprios para instalação em cubículos metálicos ou alvenaria e em equipamentos diversos, cuja finalidade é permitir a passagem de um circuito de um determinado ambiente para outro.

Além dos componentes normais, as buchas podem ser equipadas com outros recursos auxiliares, tais como transformadores de corrente, chifres metálicos para disrupção de tensões impulsivas, etc.

As buchas de passagem podem ser classificadas em dois tipos básicos:

Quanto à instalação:

- **Buchas de passagem para uso exterior:** os dois terminais estão expostos ao meio exterior. Sua aplicação é restrita a casos especiais tais como alimentação de transformadores de potência separados por barreira corta fogo;
- **Buchas de passagem para uso interior:** os dois terminais da bucha estão contidos num ambiente abrigado não sujeito às intempéries. É constituída de um isolador de superfície lisa ou ligeiramente corrugada, atravessada longitudinalmente por um vergalhão maciço de **cobre eletrolítico**, ou alumínio em alguns casos;
- **Buchas de passagem para uso interior-exterior:** um dos terminais da bucha está exposto ao meio ambiente abrigado, enquanto o outro terminal está instalado ao tempo. É constituída de isolador para uso ao tempo, e de outro isolador, em geral de superfície lisa ou ligeiramente corrugada, próprio para instalação abrigada. São atravessadas por um vergalhão de **cobre eletrolítico** ou de alumínio que permite a continuidade elétrica entre os ambientes considerados;

- **Buchas para uso em equipamentos:** são buchas em que um terminal fica exposto ao meio ambiente, e o outro voltado para o interior de um equipamento, geralmente cheio de óleo mineral isolante. São construídas de porcelana vitrificada, no interior da qual se atravessa longitudinalmente um vergalhão de **cobre eletrolítico** ou de alumínio.

Quanto à construção:

- **Buchas de passagem sem controle de campo elétrico:** este tipo de bucha não dispõe de elementos apropriados para a distribuição uniforme das linhas de força resultantes do campo elétrico. Este tipo constitui a maioria das buchas de média tensão, utilizadas em subestações industriais e em equipamentos, apresentadas anteriormente;
- **Buchas de passagem condensivas:** também conhecidas como buchas capacitivas são aquelas na qual o condutor metálico está instalado no interior do isolador de porcelana e envolvido com materiais especiais com a finalidade de assegurar a distribuição uniforme das linhas de campo elétrico. Desta forma, evita a ionização do ar na região onde é fixada a estrutura de sustentação. O núcleo da bucha é constituído de um vergalhão de **cobre eletrolítico** em torno do qual são montadas as diversas camadas do material semiconductor, que formam os condensadores cilíndricos de controle do campo elétrico. O espaço interno, formado entre o núcleo e o corpo isolante da bucha é preenchido por um composto de material isolante.

7.6 Chaves seccionadoras

A chave seccionadora, ou o seccionador interruptor é o dispositivo definido como sendo um dispositivo mecânico de manobra capaz de abrir e fechar, em carga, circuitos de uma instalação sem defeitos, com capacidade adequada de resistir aos reforços decorrentes, e que, além de desempenhar esta função, é capaz de, na posição aberta, garantir a distância de isolamento requerida pelo nível de tensão do circuito.

Os seccionadores são utilizados em subestações para permitir manobras de circuitos elétricos sem carga, isolando disjuntores, transformadores de medição e de proteção e

barramentos. Utilizados também em redes aéreas de distribuição com a finalidade de seccionar os alimentadores durante os trabalhos de manutenção. Podem ser fabricados tanto em unidades monopolares como em unidades tripolares.

Os seccionadores compõem-se de várias partes: circuito principal, circuitos auxiliares e de comando, pólos, contatos, terminais, dispositivo de operação e dispositivo de bloqueio. Podem ser constituídos de um só pólo (chaves seccionadoras unipolares) ou de três pólos (chaves seccionadoras tripolares). Os tripolares são dotados de mecanismo que obriga a abertura simultânea dos três pólos.

7.6.1 Seccionadores simples

São constituídos por uma lâmina condutora (seccionadores unipolares) ou por três lâminas condutoras (seccionadores tripolares) de abertura simultânea, acionadas através de mecanismo articulado.

O seccionador simples é montado sobre estrutura metálica, constituída de chapa de ferro dobrada em U que sustenta os três pólos e o eixo do mecanismo de acionamento manual na extremidade do qual pode ser montada a alavanca.

As lâminas e os contatos são fabricados em **cobre eletrolítico**. Cada lâmina é constituída por um conjunto de facas duplas ou até por dois conjuntos de facas duplas, dependendo do modelo e da capacidade de condução de corrente nominal.

7.8 Chave de aterramento rápido

É um equipamento destinado à proteção de sistemas elétricos, e que, quando sensibilizado pela ação de um relé, provoca o aterramento, em geral, de uma fase, fazendo atuar um disjuntor de retaguarda, normalmente localizado longe do ponto de instalação da referida chave.

Normalmente, são utilizadas em subestações das concessionárias que suprem áreas rurais ou pequenas vilas com cargas elétricas de pequeno porte.

As chaves de aterramento rápido são equipamentos de construção robusta e constituídas basicamente de três partes: terminal, coluna de isoladores e caixa de comando.

O mecanismo de operação da chave possui uma bobina de **cobre** usada no disparo que está em série com um contato do relé de proteção. Quando esta bobina está energizada faz soltar a trava que retém a mola de fechamento, cuja força mecânica armazenada age diretamente sobre a alavanca de aterramento que leva à fase correspondente ligada ao contato fixo do terminal da chave.

7.9 Reguladores de tensão

O regulador de tensão é um equipamento destinado a manter um determinado nível de tensão em uma rede de distribuição urbana ou rural, quando submetido a uma variação de tensão fora dos limites especificados.

É um dos equipamentos mais úteis para as concessionárias de energia que objetivam manter uma boa qualidade de fornecimento a seus consumidores na forma de tensão, com razoável estabilidade. O emprego do regulador de tensão é muito intensificado em redes de distribuição rural de comprimento longo e carga não muito acentuada, pois reduz a queda de tensão e estreita a faixa de variação da tensão de fornecimento.

O Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE estabelece que nenhum consumidor pode receber energia elétrica num nível de tensão fora da faixa de -7,5% a +5% da tensão nominal do sistema.

Os principais tipos de reguladores de tensão em redes de distribuição presentes no mercado são: o regulador de tensão *auto-booster* e o regulador de tensão de 32 degraus. No regulador de tensão *auto-booster* encontramos **cobre** nas bobinas série, paralela e na bobina de controle. No regulador de tensão de 32 degraus o **cobre** está presente nos enrolamentos e derivações deste.

7.10 Resistor de potência

O termo resistor de potência é comumente aplicado a uma ampla variedade de resistores que são projetados para aplicações industriais. Em um típico resistor de potência, o fio da resistência, geralmente feito a partir uma liga de níquel-cromo ou **cobre-níquel**, é enrolado em uma forma tubular de cerâmica, que é totalmente coberta por uma camada espessa de esmalte de vidro.

7.11 Reatores eletromagnéticos

São constituídos basicamente por uma bobina de fio de **cobre** enrolada sobre um núcleo de ferro-silício, operando na frequência da rede elétrica (60Hz). Neste tipo de reator, ocorrem grandes perdas de potência pela qualidade do ferro empregado e pela elevada resistência do fio relativamente fino do enrolamento. Essa potência elétrica se dispersa em forma de calor, resultando em temperaturas elevadas (podendo atingir 100°C) durante o funcionamento normal. Os reatores eletromagnéticos podem ser classificados em três tipos: partida convencional série, partida convencional e partida rápida.

7.12 Relés de proteção

A proteção de um sistema de baixa ou alta tensão é projetada tomando-se como base os fusíveis e os relés incorporados necessariamente a um disjuntor que é na essência, a parte mecânica responsável pela desconexão do circuito afetado com a fonte supridora.

O nome relé representa um grande número de equipamentos e dispositivos, com as mais diferentes formas de construção e operação, para aplicações diversas, dependendo da importância, do porte e da segurança da instalação considerada.

Os relés de proteção apresentam diversas características que particularizam a sua aplicação num determinado sistema, de acordo com os requisitos exigidos. Essas características podem ser agrupadas: quanto à forma construtiva (fluidodinâmicos, eletromagnéticos, eletrodinâmicos, de indução, térmicos e eletrônicos), quanto ao desempenho (sensibilidade, rapidez e confiabilidade), quanto às grandezas elétricas (relés de tensão, corrente, frequência, potência, impedância), quanto à temporização (relés instantâneos, temporizados com retardo dependente, temporizados com retardo independente) e quanto à forma de acionamento (relés de ação direta e indireta).

De forma geral, os relés apresentam em sua construção, bobinas de **cobre** que possibilitam a formação de um campo magnético capaz de atuar no dispositivo, além de isolar o circuito de atuação do relé e o circuito de acionamento.

7.12.1 Relé eletromagnético

O relé eletromagnético é constituído basicamente de uma bobina de **cobre** envolvendo um núcleo magnético cujo entreferro é formado por uma peça móvel, na qual é fixado um contato elétrico que atua sobre um contato fixo, permitindo a continuidade do circuito elétrico de acionamento do disjuntor. A peça móvel se desloca no sentido de permitir o menor valor de relutância no circuito magnético.

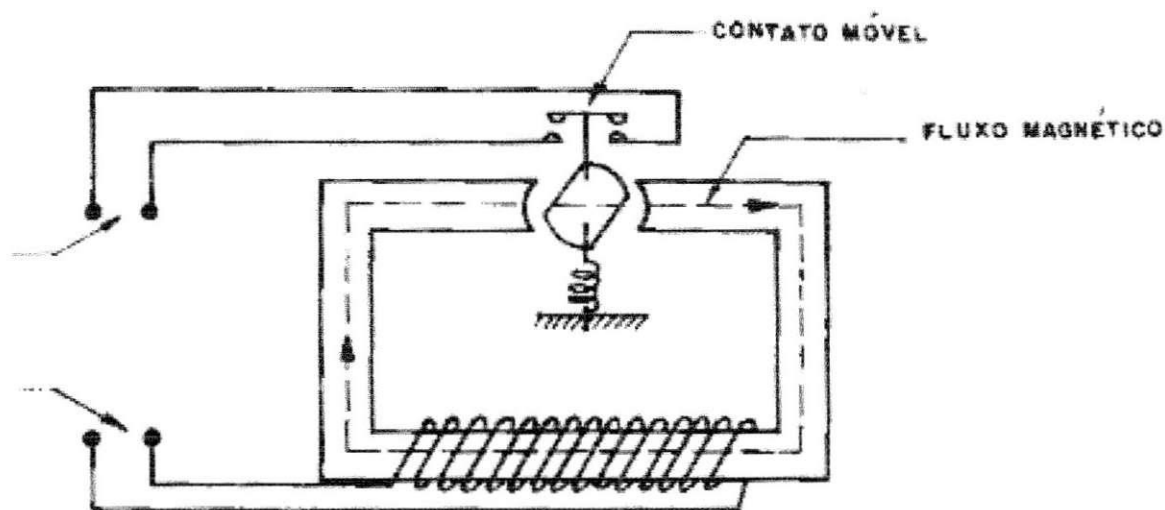


Figura 5 – Relé eletromagnético

7.13 Disjuntores

Os disjuntores são equipamentos destinados à interrupção e ao restabelecimento das correntes elétricas num determinado ponto do circuito. Devem ser sempre instalados acompanhados dos relés respectivos, responsáveis pela detecção das correntes elétricas do circuito que, após analisadas por sensores previamente ajustados, podem enviar ou não o comando para a abertura do disjuntor.

A função principal de um disjuntor é interromper as correntes de defeito de um determinado circuito durante o menor espaço de tempo possível. Porém, também são solicitados a interromper correntes de circuitos operando a plena carga e a vazio, e a energizar os mesmos circuitos em condições de operação normal ou em falta.

Em um disjuntor de baixa tensão, o **cobre** está presente nos terminais de contato.

7.14 Aterramento

O termo aterramento se refere à terra propriamente dita ou a uma grande massa que pode ser utilizada em seu lugar. Aterrando o sistema, ou seja, ligar intencionalmente um condutor fase ou, o que é mais comum, o neutro à terra, tem por objetivo controlar a tensão em relação à terra dentro de limites previsíveis, como também fornecer um caminho para a circulação de corrente que irá permitir a detecção de uma ligação indesejada entre os condutores e a terra.

O primeiro objetivo do aterramento dos sistemas elétricos é proteger as pessoas e o patrimônio contra uma falta (curto-circuito) na instalação. As funções básicas de um sistema de aterramento são: segurança pessoal, desligamento automático, controle de tensões, estabilidade durante transitórios, escoamento de cargas estáticas e possibilitar o funcionamento de aparelhos eletrônicos.

7.14.1 Tipos de eletrodos de aterramento

Basicamente, os eletrodos de aterramento podem ser divididos em:

a) **Eletrodos existentes:** prédios com estruturas metálicas são normalmente fixados por meio de longos parafusos a seus pés nas fundações de concreto. Esses parafusos engastados no concreto servem como eletrodos, enquanto que a estrutura metálica funciona como condutor de aterramento.

b) **Eletrodos fabricados:** normalmente são hastes de aterramento de **cobre**.

c) **Eletrodos encapsulados em concreto:** em contato com o solo, o concreto é um meio semicondutor com resistividade muito melhor que o solo propriamente dito. Dessa forma, a utilização dos próprios ferros da armadura da edificação, colocados no interior do concreto das fundações apresenta ótimos resultados.

Qualquer que seja o tipo de fundação deve-se assegurar a interligação entre os ferros das diversas sapatas, formando assim um anel. Essa interligação pode ser feita com o próprio ferro da estrutura, embutido em concreto ou por meio do uso de cabo **cobre**.

d) **Outros eletrodos:** caso não seja viável o uso das fundações como eletrodo de aterramento, fitas metálicas ou cabos enterrados são soluções adequadas técnica e economicamente.

7.14.2 Aterramento na proteção contra descargas atmosféricas

O aterramento deve ser o meio pelo qual as correntes dos raios escoam no solo, sem provocar tensões de passo perigosas e mantendo baixa a queda de tensão na resistência de terra.

Os eletrodos de aterramento podem ser de **cobre**, aço galvanizado a quente ou aço inoxidável, não sendo permitido o uso de alumínio. Podendo também ser utilizado o aço revestido de **cobre** com camada mínima de 254mm.

7.15 Instrumentos de bobina móvel

Também conhecidos pelos nomes de “instrumentos de bobina móvel e ímã fixo” ou “instrumentos magnetoelétricos”, estes instrumentos são constituídos, essencialmente, das partes:

- a) Ímã permanente de peças polares cilíndricas - fornece no entreferro uma indução magnética;
- b) Núcleo cilíndrico de ferro doce – torna as linhas de fluxo magnético radiais;
- c) Quadro retangular de metal condutor – em geral feito de alumínio com a finalidade de servir de suporte à bobina e produzir amortecimento por correntes de Foucault;
- d) Bobina de fio de **cobre** – enrolada sobre o quadro de alumínio, por onde circulará a corrente a ser medida.

7.15.1 Amperímetros

Instrumentos de bobina móvel são feitos para suportar pequenas correntes, da ordem de miliampères a microampères. Para ampliar a capacidade de medição desses instrumentos, transformando-os em amperímetros capazes de medir correntes elevadas, colocam-se resistores em paralelo.

7.15.2 Voltímetros

Os voltímetros podem também se originar dos instrumentos de bobina móvel pela adição de resistores em série com o medidor.

7.16 Medidor de energia elétrica tipo indução

O medidor tipo indução é empregado em corrente alternada para medir a energia elétrica absorvida por uma carga. É constituído, essencialmente, de duas partes:

- a) **Bobina de tensão ou de potencial B_P** – altamente indutiva, com grande número de espiras de fio fino de **cobre**, para ser ligada em paralelo com a carga;
- b) **Bobina de corrente B_C** – constituída de poucas espiras de fio grosso de **cobre**, para ser ligada em série com a carga; é dividida em duas meias bobinas enroladas em sentidos contrários;
- c) **Núcleo de laminas de material ferromagnético** – são laminas geralmente feitas de ferro-silício, justapostas, mas isoladas umas das outras com o objetivo de reduzir as perdas por correntes de Foucault;
- d) **Conjunto móvel ou rotor** – constituído de um disco de alumínio, de alta condutibilidade, com o grau de liberdade de girar em torno do seu eixo de suspensão, ao qual é solidário. A este eixo está preso um parafuso sem fim que aciona um sistema mecânico de engrenagens que registra, num mostrador, a energia elétrica consumida;
- e) **Imã permanente** – produz conjugado frenador ou de amortecimento sobre o disco.

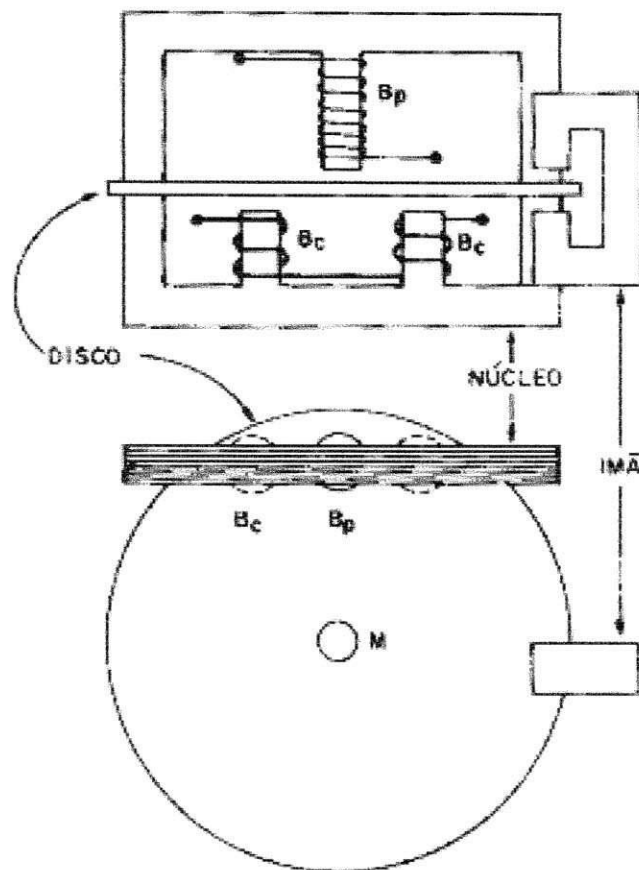


Figura 6 – Medidor de energia elétrica tipo indução

7.17 Medidores de energia elétrica ativa e reativa

A medição de energia elétrica ativa é feita através do medidor de energia elétrica, também chamado de medidor de W.h do tipo indução, que são apresentados em diversas formas, dependendo principalmente da carga instalada. Existem medidores para circuito monofásico a dois fios, monofásicos a três fios, nos circuitos de duas fases e um neutro e nos circuitos trifásicos a quatro fios. Todos os medidores que fazem esses tipos de medição apresentam bobinas de corrente e bobinas de potencial feitas de **cobre**.

A medição de energia elétrica reativa é aplicada pelas concessionárias de energia aos consumidores com potência elétrica instalada igual ou superior a 75 kVA, variando este

limite de acordo com as tendências de cada concessionária, suas condições técnica e econômica.

7.18 Circuito impresso

O tipo mais comum de circuito impresso consiste de um conjunto de componentes montados sob uma placa e soldados em finas trilhas de **cobre**, desenhadas sobre a placa. Além de suportar a montagem dos componentes, o material usado na placa deve também servir de isolamento e ser capaz de resistir às altas temperaturas da soldagem e da operação do circuito sem alterações significantes em seu estado. Originalmente, na fabricação de placas de circuito impresso, a superfície inteira de um ou dos dois lados da placa é coberta por uma fina folha de **cobre**, que se une à placa em todos os pontos.

Em uma das formas mais comuns de produção de circuitos impressos, uma solução protetora é usada ao transferir o modelo de circuito para a folha de **cobre**. Esta solução tem a propriedade de resistir à ação química de outro produto, como o cloreto de ferro ou ácido cromo, no qual a placa é deixada. Após um curto período de tempo, o **cobre** que não foi coberto com esta solução protetora é corroído, deixando apenas as trilhas protegidas pela solução. A seguir, a solução protetora é retirada da placa com o solvente apropriado mostrando as trilhas de **cobre** idênticas ao modelo do circuito. O último passo é fazer furos na placa nos quais serão fixados os componentes em seus devidos lugares.

7.19 Microprocessadores

Na corrida por processadores mais rápidos com preços menores, as empresas tem utilizado o **cobre** na fabricação de uma geração de microprocessadores menores e mais rápidos.

Em um chip de **cobre**, em oposição aos tradicionais chips de alumínio, as conexões entre os transistores são feitas de **cobre**. A principal vantagem do **cobre** é de ser um ótimo condutor de eletricidade, assim as conexões são muito mais finas que as conexões feitas com alumínio e chips menores podem comportar mais transistores.

Na tecnologia dos processadores, para medir a distancia entre cada componente utiliza-se o **mícron**. Um **mícron** equivale à milésima parte de um milímetro. A diminuição

da distancia que o elétron percorre entre transistores permite menor tempo de percurso, o que significa uma performance melhor. Os chips de **cobre** já têm distancias menores que 0,18 microns e espera-se futuramente distancias menores que 0,13 microns.

8. O cobre como material condutor de calor

A condutividade térmica de metais e ligas também é uma característica de extrema importância, pois demonstra a capacidade do material de liberar para o ambiente o aquecimento causado pelas perdas.

8.1 Transmissão de calor

Sempre que um corpo está a uma temperatura maior que a de outro, ou, no mesmo corpo existem temperaturas diferentes, ocorre uma cessão de energia da região de temperatura mais elevada para a região de temperatura mais baixa e a esse fenômeno chama-se transmissão de calor.

Existem três formas de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. Tais formas são fundamentalmente diferentes, regidas por leis próprias, mas que na realidade, podem ocorrer em simultaneidade.

Em meados de 1825, o francês J. J. Fourier formulou matematicamente equações que descreviam a condução de calor e que possibilitaram cálculos e projetos com precisão maior do que os métodos anteriormente empregados.

Fourier verificou que o fluxo de calor q uma de duas paredes de seção reta constante, era proporcional a área A e à diferença de temperatura $T_1 - T_2$, sendo T_1 e T_2 as temperaturas mantidas constantes nas faces paralelas à distancia x e era inversamente proporcional à espessura da parede.

Substituindo os materiais da parede e mantendo todas as demais situações absolutamente iguais, Fourier constatou que o fluxo de calor alterava-se para cada material e, então introduziu o coeficiente de condutibilidade térmica K .

$$q = \frac{KA}{x}(T_1 - T_2) \quad (14)$$

O fator de proporcionalidade K é de fundamental importância e exprime a maior ou menor facilidade que um material apresenta à condução de calor. Os valores de K variam numa extensa faixa e os principais fatores capazes de influir nessa diversificação são constituição química, estado físico e temperatura.

Tabela 3 – Coeficiente de condutibilidade térmica de metais

Metais	Temperatura (°F)	K
Prata	32 – 212	242
Cobre	32	226
alumínio	32	117
magnésio	32 – 212	92
Zinco	32	65
Estanho	32 – 212	35
Aço	32 – 212	34
chumbo	32 – 212	20
antimônio	32	10,6
mercúrio	32 – 212	4,8

8.2 Resistência térmica

Representa a oposição que um material oferece à passagem do fluxo de calor, da mesma forma que a resistência elétrica em relação ao fluxo de corrente elétrica. E em analogia a expressão da resistência elétrica, a resistência térmica de uma parede plana é dada por:

$$R_T = \frac{x}{KA} \quad (15)$$

8.3 Aquecedor solar de água

No Brasil, a utilização da energia solar a cada dia tem se tornado mais comum, principalmente em residências, com a substituição de chuveiros elétricos por aquecedores solares de água.

A cada m^2 de coletor solar instalado permite-se evitar a inundação de $56m^2$ de áreas férteis na construção de novas usinas hidrelétricas e gerar em um ano a energia equivalente à 215kg de lenha, 66 litros de diesel ou 73 litros de gasolina. O uso do aquecedor solar de água diminui em média 35% o consumo de energia elétrica em uma residência. Em residências, a aplicação do aquecedor solar de água vai além do aquecimento de água para

banho e pode ser também utilizado na lavanderia, cozinha e até para aquecimento de piscinas.

Com a crescente evolução tecnológica dos aquecedores solares, foram desenvolvidos dispositivos como o Registro Misturador Solar, que é confeccionado em **cobre** e torna possível a instalação de aquecedores solares de água em residências prontas, dispensando a quebra de paredes e azulejos para instalação da rede própria para água quente.

Os aquecedores solares são compostos basicamente de duas partes: placas coletoras solares com superfície em **cobre** e reservatórios térmicos em **cobre**.

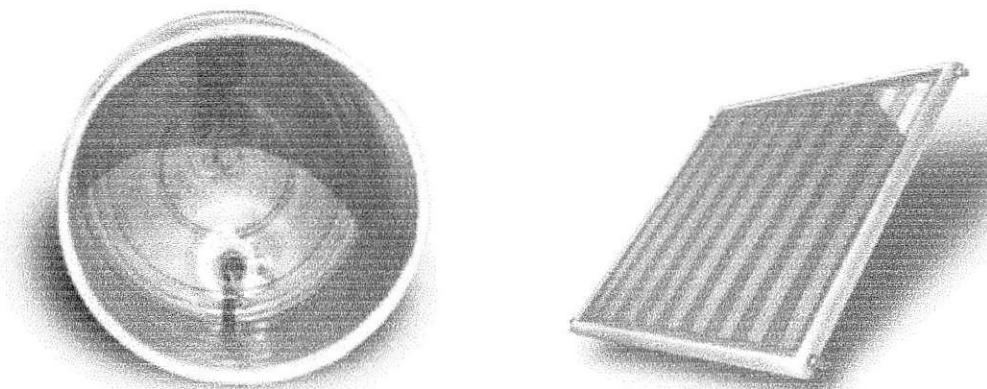


Figura 7 – Reservatório térmico e placa aquecedora solar

Na instalação dos aquecedores solares, bem como a rede hidráulica para a água quente é preferencial o uso de tubos de **cobre** por suportar altas temperaturas, oferecer boa condutividade térmica, durabilidade e ação bactericida.

A comprovada propriedade de condutividade térmica do **cobre** está presente nas placas coletoras solares e nos reservatórios térmicos. As placas coletoras solares captam a energia do sol e a transferem para a água que circula em seus tubos internos. Os reservatórios térmicos recebem e armazenam a água aquecida pelas placas coletoras. Como o consumo da água nem sempre ocorre no momento em que a água é aquecida, existe a necessidade de se garantir que a água permaneça quente pelo maior tempo possível no interior do reservatório. A tecnologia empregada nos reservatórios tem evoluído bastante e os fabricantes vem usando o **cobre** como matéria prima há algum tempo.

8.4 Hidráulica

As tubulações de **cobre** possuem diversas aplicações nas instalações hidráulicas domiciliares ou industriais. Podem ser utilizadas tanto no transporte de água fria como no transporte de água quente, em instalações de combate ao incêndio por hidrantes ou *sprinklers*, em instalações de gás e nas instalações de aquecimento solar.

Algumas vantagens do **cobre** em instalações hidráulicas:

- **Durabilidade** – tubos de **cobre** tem uma vida útil superior aos materiais alternativos como o PVC e o ferro galvanizado;
- **Manutenção** – uma vez instalado, não requer reparos;
- **Resistência à corrosão** – não sofre corrosão, desde que utilizado adequadamente;
- **Resistência mecânica** – resiste a choques, vibrações e pressões dos sistemas de sucção e recalque;
- **Rapidez na instalação** – as tubulações de **cobre** são facilmente soldadas, garantindo vedação perfeita e segurança do sistema;
- **Impermeabilidade** – Fluidos, germes, gases e raios ultravioleta são barrados pelo **cobre**.

8.5 Radiadores

A Associação Internacional do Cobre (ICA) e a *Outokumpu Copper Strip* (OCS) da Suécia, desenvolveu e implementou um novo método de fabricação de radiadores ou trocadores de calor automotivos chamado *CuproBraze*. Este processo é viável pois possui baixo custo de investimento, não agride o meio-ambiente e pode ser executado nas próprias instalações e equipamentos normalmente empregados na fabricação de alumínio brazados.

Em comparação com os radiadores de alumínio, os radiadores de **cobre** são mais eficientes, mais duráveis e têm qualidade superior, consomem menos energia elétrica no processo de fabricação, entre outras vantagens.

A utilização do **cobre** na fabricação de radiadores torna possível a fabricação de radiadores mais resistentes, com operação sem fluxo, utilização de um forno com atmosfera controlada, uma única operação de brazagem, benefícios de custo, capacidade de reciclagem, além de ser um processo não agressivo ao meio-ambiente.

Os radiadores de **cobre** são aplicados atualmente em: caminhões, automóveis, aquecedores, condensadores, evaporadores, resfriadores a óleo e resfriadores de ar.

8.6 Caldeira a vapor

Aparelho destinado à produção de vapor, constituído de um gerador principal de folha de ferro ou **cobre** vermelho, é um longo cilindro arredondado em suas extremidades. Abaixo dele e comunicando-se com ele, existem outros dois cilindros de mesmo comprimento e menor diâmetro chamados ebulidores.

Os ebulidores são diretamente mergulhados no foco de calor. O vapor ali formado se condensa na água do gerador principal aquecendo-a rapidamente. A superfície de aquecimento cresce, produzindo grande quantidade de vapor.

8.7 Refrigeração termoelétrica

O processo de obtenção de temperaturas abaixo do ambiente é baseado no efeito Peltier. Um par termoelétrico ao ser percorrido por uma corrente elétrica contínua, apresenta uma junção quente e uma junção fria. Os pares termoelétricos utilizados em refrigeração são constituídos de um metal (**cobre**) e um semicondutor (Telureto de Bismuto). A quantidade de calor absorvida na junção fria de um par termoelétrico é

entretanto muito pequena, de modo que para que se tenha uma capacidade de refrigeração utilizável é necessário combinar vários pares termoelétricos formando um módulo termoelétrico.

Os módulos termoelétricos atuais são constituídos de:

- vários pares termoelétricos ligados em série, sendo um de semicondutor tipo N e outro do tipo P alternadamente;
- duas superfícies planas de material cerâmico, uma cobrindo as junções quentes e outra as junções frias.

Quando submetido a uma fonte de corrente contínua, o módulo apresenta uma superfície quente e outra fria.

Um refrigerador termoelétrico é constituído de:

- um ou mais módulos termoelétricos dispostos em série ou em paralelo;
- trocadores de calor fixados às superfícies cerâmicas dos módulos para aumentar a capacidade de troca de calor dessas superfícies;
- uma fonte de corrente contínua.

8.8 Torre de resfriamento - *DryCooler*

O DryCooler é um tipo de torre de resfriamento com algumas vantagens sobre as torres de resfriamento convencionais. É recomendado para ambientes com poeira, com escassez de água ou simplesmente quando por motivação ecológica se quer economizar água e eliminar o despejo de água contaminada com produtos químicos.

O efeito de resfriamento é obtido por troca térmica entre a água, que corre nos tubos de **cobre**, e o ar ambiente soprado por ventiladores sobre as aletas de um trocador de calor de alta eficiência. Nos dias mais quentes as aletas do trocador de calor são automaticamente umedecidas por uma lâmina de água que garante um resfriamento adicional pelo efeito evaporativo. Nos dias mais frios os ventiladores são automaticamente desligados um a um, para economizar energia elétrica.

Aplicações Típicas:

- Resfriamento do circuito de óleo de injetoras, sopradoras e outras máquinas de transformação de plástico;
- Água de condensação para unidades de água gelada;
- Resfriamento de compressores de ar;
- Resfriamento de equipamentos de solda por indução;

9. O cobre e a eficiência energética

9.1 Eficiência energética no Brasil

Desde o início dos anos 80, o governo do Brasil vem investindo em programas de uso racional de energia, mediante o Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica – PROCEL.

Em termos práticos, essas ações tem sido concentradas nas regiões Sul e Sudeste, por serem essas regiões, as mais industrializadas e mais densamente povoadas do país. Por outro lado na região Nordeste, onde os recursos energéticos disponíveis encontram-se em situação precária, os programas ainda não são amplamente divulgados. Essa realidade impõe a necessidade de ações urgentes de disseminação do uso racional de energia elétrica que não se limitem apenas às campanhas publicitárias e realizações de eventos informativos.

Numa realidade baseada no mercado e na competição, as atenções se voltam cada vez mais para o aspecto “qualidade” que, num setor onde o produto é a energia, significa minimizar as perdas no seu fornecimento. A utilização normal da energia gera perdas, e a ocorrência de problemas no sistema elétrico, provocados por fenômenos naturais ou por ações deliberadas sobre o sistema, irá sempre acontecer.

Em algumas universidades, a preocupação com a eficiência energética e a qualidade de energia tem originado algumas pesquisas que abordam os temas e, unido a isso, a qualidade de energia elétrica envolve um número de tecnologias emergentes e tem grandes aplicações no sistema elétrico como um todo.

A crescente utilização de equipamentos sensíveis, o incremento do uso de cargas eletronicamente controladas, e a ênfase na eficiência que tem crescido continuamente na aplicação da correção do fator de potência, têm criado uma situação complexa no setor elétrico.

O aumento da eficiência energética implica na melhoria da produtividade global, ou seja, produzir mais energia com qualidade, com menos investimentos e com menos desperdícios.

9.2 Lei da eficiência energética

A política da conservação de energia e da eficiência energética no Brasil assumiu outra postura, após sancionada e decretada a Lei n.º 10.295, de 17 de outubro de 2001, posteriormente regulamentada pelo decreto n.º 4.059, de 19 de dezembro do mesmo ano, que ficou conhecida como Lei da Eficiência Energética.

A Lei, em seu artigo 1º, destaca a alocação eficiente de recursos energéticos na política nacional de conservação e uso de energia e a preservação do meio ambiente.

De acordo com a mesma Lei, o Poder Executivo estabelece níveis máximos de consumo de energia, ou níveis mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia elétrica fabricados ou comercializados no país, com base em indicadores técnicos, levando em consideração a vida útil dos aparelhos consumidores de energia.

Pretende-se em até um ano após a publicação dos níveis mínimos de eficiência energética, estabelecer um programa de metas para evolução progressiva dos níveis estabelecidos, obrigando os fabricantes e importadores de aparelhos consumidores de energia elétrica a tomarem as medidas necessárias para que sejam obedecidos os níveis máximos de consumo de energia e os níveis mínimos de eficiência energética.

9.3 Cargas lineares e não-lineares

As cargas chamadas de “lineares” são aquelas constituídas essencialmente por resistências, indutâncias e capacitâncias de valores praticamente fixos; em outras palavras, cargas cuja impedância é considerada constante. Como exemplo de cargas lineares, podemos citar os motores usuais, a iluminação incandescente e as cargas de aquecimento.

Nas cargas “não-lineares”, a corrente não é proporcional à tensão aplicada. Estas representavam uma pequena porcentagem do total das cargas usuais e pouco influíam no projeto e no funcionamento das instalações elétricas.

Entretanto, nos últimos anos, o que tem sido chamado de “revolução eletrônica” introduziu o uso em larga escala de microcomputadores, fontes de energia ininterrupta (UPS), acionamentos de máquinas à velocidade variável, não somente em instalações comerciais ou industriais, mas também nas residências. Essas cargas eletrônicas, tipicamente não lineares, provocam distorções nas ondas de tensão e corrente e trazem problemas às instalações elétricas de baixa tensão, como freqüentes aquecimentos de transformadores e geradores, com carga abaixo da nominal, superaquecimento de condutores neutros em circuitos trifásicos razoavelmente equilibrados, disparo intempestivo de disjuntores, etc.

9.4 Harmônicas

Uma tensão ou corrente harmônica pode ser definida como um sinal senoidal cuja freqüência é múltiplo inteiro da freqüência fundamental do sinal de alimentação. A corrente ou a tensão não senoidal pode ser expressa mediante diversas componentes:

$$v(t) = V_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + V_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) + V_3 \cos(3\omega t + \varphi_3) + \dots + V_h \cos(h\omega t + \varphi_h) \quad (16)$$

$$i(t) = I_1 \cos(\omega t + \phi_1) + I_2 \cos(2\omega t + \phi_2) + I_3 \cos(3\omega t + \phi_3) + \dots + I_h \cos(h\omega t + \phi_h) \quad (17)$$

Cada harmônica tem sua fase e seu módulo. Em geral, as harmônicas de ordem par são nulas, devido à atuação dos dispositivos de forma simétrica e periódica. As harmônicas de ordem elevada são pequenas, pois as variações são suavizadas pela presença de indutâncias no sistema. A presença de harmônicas pares é um sintoma de que o controle dos dispositivos semicondutores está desajustado e a existência de harmônicas elevadas pode ser indício de variações bruscas de tensão ou corrente. O que pode causar uma deterioração de equipamento que está sendo controlado, interferências em equipamentos de radio freqüência, baixa eficiência dos equipamentos elétricos.

9.4.1 Harmônicas em computadores e televisores

Embora existam diversos eletrodomésticos cuja carga é não-linear, os televisores e os computadores são os mais comuns e, conseqüentemente, as harmônicas produzidas por estes aparelhos são transmitidas para a rede elétrica o que têm sido motivo freqüente de análises e normalizações. A razão pela qual a forma de onda da alimentação desses aparelhos é não senoidal está relacionada com o emprego de um circuito retificador na entrada dos respectivos circuitos.

9.4.2 Norma IEC 555-2

A norma IEC 555-2 estabelece exigências sobre harmônicas, que devem ser atendidas por todos os equipamentos de consomem menos de 16A por fase em redes de 220V a 415V. Dentre esses, estão os computadores e os televisores.

Tabela 4 – Limites da norma IEC 555-2

Harmônica	Limite (mA/W)	Limite (A)
3	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13 ou maior	3,85/n	0,15 . 15/n

A tabela acima mostra os limites que todo equipamento com potência acima de 50W deve cumprir. Abaixo desta potência, não há limite algum. A norma estabelece os limites com base nos valores eficazes de cada harmônica. A relação entre o valor eficaz e o valor máximo é:

$$I_{RMS}(A_{RMS}) = \frac{I_M(A_{MAX})}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

O total do valor eficaz é a soma quadrática de todas as harmônicas:

$$I_{RMS}(A_{RMS}) = \sqrt{I_{RMS1}^2 + I_{RMS2}^2 + I_{RMS3}^2 + \dots + I_{RMSn}^2} \quad (19)$$

Normalmente, os computadores provocam distorções na rede com uma harmônica que é ligeiramente superior à admitida pela norma. Uma solução para o problema pode consistir, portanto, em instalar uma reatância de **cobre** em série com a fonte.

9.4.3 Harmônicas em sistemas trifásicos

Um sistema trifásico é composto por três tensões de igual amplitude, porém defasadas de 120° .

$$V_{AN} = V_M \cos(\omega t + \phi) \quad (20)$$

$$V_{BN} = V_M \cos(\omega t + \phi - 120^\circ) \quad (21)$$

$$V_{CN} = V_M \cos(\omega t + \phi + 120^\circ) \quad (22)$$

Considerando o caso de ligarmos à fase A uma carga não-linear, teremos uma corrente de fase da forma:

$$I_A = I_M \cos(\omega t + \phi_1) + I_3 \cos(3\omega t + \phi_3) + \dots \quad (23)$$

Se na fase B ligarmos uma carga idêntica, a corrente será idêntica, porém defasada de 120° :

Na prática, por exemplo, os pulsos de corrente em um televisor devem coincidir com os valores máximos de cada tensão. Assim, em cada fase, teremos os mesmos pulsos, porém defasados de 120° . Então, a terceira harmônica se defasa em 3 vezes de 120° , ou seja, 360° , enquanto que a fundamental se defasa apenas em 120° . Analogamente, a quinta harmônica se defasa em 5 vezes 120° e assim sucessivamente.

Em um sistema equilibrado, a soma de todas as correntes de fase deve ser nula. Mas na prática, o condutor neutro conduz a soma de todas as correntes de fase:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C \quad (24)$$

Ao somar as correntes defasadas de 120°, observamos que a corrente de neutro é a de terceira harmônica. Ou seja, considerando um sistema com cargas equilibradas não-lineares distribuídas nas três fases, circulará uma corrente pelo neutro igual a três vezes a corrente de terceira harmônica que circula por uma fase. Isso significa que se uma determinada carga é composta somente por televisores e computadores, a corrente pelo neutro será superior à corrente de fase e isto deve ser levado em consideração no dimensionamento da instalação elétrica.

Portanto, essa situação, quando não é prevista pelo projetista da instalação elétrica, poderá gerar vários problemas. Uma corrente excessiva no neutro, onde, via de regra, não existe proteção contra sobrecorrentes, pode causar além de superaquecimento do condutor, de suas conexões e do barramento de neutro, uma queda de tensão no circuito além dos limites fixados.

Uma solução aplicável ao caso da influência da terceira harmônica em sistemas trifásicos é o dimensionamento de condutores considerando as harmônicas. O dimensionamento correto dos condutores de **cobre** podem, nesse caso, apresentar uma solução para este problema. A norma NBR-5410 estabelece critérios de dimensionamento de condutores para circuitos trifásicos a quatro condutores, com desequilíbrio inferior a 50% de corrente pelo neutro, quando a corrente pelo neutro é igual à corrente de fase, e quando a corrente pelo neutro é superior à corrente de fase.

9.4.4 Harmônicas em transformadores, motores e geradores

As potências nominais dos transformadores e das máquinas girantes são determinadas com base no aquecimento provocado por correntes alternadas senoidais na frequência de 60Hz. Quando as correntes são formas de onda distorcidas, com resíduos harmônicos consideráveis, verifica-se que o aquecimento é maior do que o esperado para correntes senoidais de mesmo valor. O aumento das perdas no ferro é a principal razão desse sobreaquecimento.

Quando um material ferromagnético é magnetizado através de uma corrente alternada, as partículas elementares, denominados “domínios magnéticos” invertem seu

sentido, isto é, sua polaridade, com a alternância da corrente. Contudo, o processo da magnetização é acompanhado por perdas causadas pelo atrito entre os domínios existentes no material, as perdas por histerese. Nos transformadores, motores e geradores essas perdas ocorrem pelo aquecimento das laminas de aço do núcleo e crescem com aumento da frequência devido ao aumento da velocidade com que ocorrem as alternâncias nas orientações dos domínios magnéticos.

Por outro lado, os campos magnéticos aplicados a núcleos laminados produzem correntes que circulam nas laminas. São as correntes de Foucault, que ao circularem, originam perdas por aquecimento do núcleo. Essas perdas são proporcionais ao quadrado da frequência. Nessas condições, quanto maior a frequência da corrente que produz o campo eletromagnético, mais rápida será a variação do fluxo magnético conseqüentemente maiores serão as perdas.

O efeito pelicular também tem sua parcela de contribuição, embora pequena, no aquecimento provocado pelas harmônicas nos transformadores e nas maquinas girantes, relacionando-se, não com o núcleo magnético, mas com os condutores dos enrolamentos de **cobre** desses equipamentos. Portanto, a seção efetiva do condutor é reduzida aumentando sua resistência e, assim, aumentando as perdas no **cobre**.

Como resultado do aumento das perdas por histerese, perdas por correntes de Foucault e das perdas no **cobre**, um transformador ou um gerador, fornecendo não mais do que sua potência nominal, porém, alimentando cargas não-lineares com elevado resíduo harmônico, terá um aquecimento excessivo, podendo sofrer danos sérios.

Na medida em que as cargas de uma instalação absorvem correntes harmônicas, elas agem como uma impedância da fonte, causando distorção na tensão de alimentação.

Os motores são, via de regra, cargas lineares, porém quando a tensão aplicada apresenta distorção harmônica, eles passam a absorver correntes harmônicas, provocando sobreaquecimento por histerese, correntes de Foucault e perdas no **cobre**.

Outro problema nos motores diz respeito às harmônicas de seqüência negativa, como exemplo a quinta harmônica, que produzem conjugado de sentido oposto ao da rotação normal do motor, o que reduz o conjugado mecânico final e a capacidade de acionamento. Isso provoca aumento na corrente absorvida podendo, no limite, causar a queima do motor.

9.5 Eficiência no transformador

Todo equipamento deve ser projetado para operar na mais alta frequência possível. Felizmente, as perdas nos transformadores são pequenas. O transformador por ser um dispositivo estático, não possui perdas rotacionais como a fricção do ar e outras perdas de uma máquina rotativa. Num transformador bem projetado a eficiência pode ser da ordem de 99,9%. A eficiência no transformador pode ser expressa por:

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + \text{perdas}} \quad (25)$$

Onde P_0 é a potência de saída, e as perdas podem ser resumidas pelas perdas no núcleo P_N e as perdas no **cobre** P_{CU} , que podem ser determinadas conhecendo-se as correntes nos enrolamentos primários e secundários e suas respectivas resistências:

$$P_{CU} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (26)$$

A perda no **cobre** é função da corrente na carga. A perda no núcleo depende da tensão aplicada ao transformador. Desde que a tensão mantenha-se constante, a perda no núcleo é quase constante e pode ser obtida a partir de um teste de circuito aberto do transformador. Logo a eficiência de um transformador, sob qualquer condição de operação, pode ser determinada quando são conhecidos os seus parâmetros do circuito equivalente, e conhecendo-se as correntes em cada enrolamento de modo a determinar as perdas no **cobre**.

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + P_N + P_{CU}} \quad (27)$$

10. Conclusão

O **cobre** tem sido um dos metais não-ferrosos mais utilizados pelo homem em todo tempo, e isto se mostra na grande quantidade de dispositivos, aplicações, utensílios e de finalidades na qual ele é aplicado. Tal utilização, torna-se uma evidência da forma de como a história do próprio **cobre**, sua descoberta, mineração, aperfeiçoamento e aplicação se confunde com a história da evolução tecnológica.

Como vimos, as aplicações nas quais esse metal e suas ligas são empregados são justificadas por suas excelentes propriedades de condução elétrica e térmica, além da ductibilidade e resistência mecânica. As variações de formas e as finalidades nas quais se utilizam as suas ligas, também são motivos pelos quais podemos considerar o **cobre** como um metal de extrema importância para o avanço técnico científico nos dias atuais.

No contexto da eficiência energética, o **cobre** apresenta-se como um importante recurso, amplamente utilizado, para solução de problemas comuns aos sistemas elétricos de baixa e alta tensão. Sendo, nesse mesmo contexto, um aliado no melhor aproveitamento dos recursos energéticos, à medida que sua utilização diminui as perdas e possibilita maior conservação de energia térmica e elétrica.

11. Bibliografia

ANDRADE, M. L. A., VIEIRA, J. R. M., CUNHA, L. M. S. e KELLER, M. C. A Cadeia Produtiva do Cobre: Panorama Internacional e Nacional. Gerencia Setorial de Mineração e Metalurgia do BNDES, 1997. 26p.

ARAUJO, C. Transmissão de Calor. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978. 390p.

BUBAN, P. e SCHMITT, M. L. Technical Electricity and Eletronics. New York: McGraw-Hill Book Company, 1972. 474p.

- BURKE, J. J. Power Distribution Engineering: Fundamentals and Applications. New York: Marcel Dekker, 1994. 356p.
- CHESF. Workshop sobre Repotenciação de Turbinas e Geradores em Usinas Hidrelétricas. CD-ROM, Recife, 2000.
- CUTNELL, J. D. e JOHNSON, K. W. Physics. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- KINDERMANN, G. Choque Elétrico. Porto Alegre: Sagra – D.C. Luzzado, 1995. 203 p.
- LEMOS H. C. e ARANTES, J. L. G. Perfil Analítico do Cobre. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1982. 87p.
- MADEIROS, T. B. Eficiência Energética Associada ao Emprego do Cobre na Eletroeletrônica. Trabalho de Conclusão de Curso: Campina Grande, 2002.
- MEDEIROS FILHO, S. Fundamentos de Medidas Elétricas. 2ª Edição, Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1986. 307p.
- MEDEIROS FILHO, S. Medição de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1976. 483p.
- MORENO, H. e COSTA, P. F. Aterramento Elétrico. São Paulo: Procobre, 2001.
- MORENO, H. Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas, Efeitos e Soluções. São Paulo: Procobre, 2001.
- MOURA, D. F. P. Qualidade de Energia Associada à Eficiência Energética. Relatório Final PIBIC: Campina Grande, 1999.

NOGUEIRA, L. A. H. Energia: Conceitos e Definições. Itajubá: Curso Tecnológico de Otimização Energética. 27p.

REZENDE, E. M. Materiais Usados em Eletrônica. Rio de Janeiro: Livraria Interciência, 1977. 382 p.

SANTANA, C. J. R. Instalações Elétricas Hospitalares. Porto Alegre: Ed. PUCRS, 1999. 233p.

SOUZA, J. R. A e MORENO, H. (Org.). Guia EM da NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. São Paulo: Aranda, 2002. 291p.

www.ciagri.usp.br/~svcex/caldeira, acessado em 21/6/2003.

www.computerworld.com, acessado em 17/6/2003.

www.revistadofrio.com.br/artigooc.html , acessado em 24/6/2003.

www.margirius.com.br, acessado em 12/6/2003.

www.mecalor.com.br/dc.html, acessado em 24/6/2003.

www.procobrebrasil.org, acessado em 5/6/2003.

