

CENTRO DE FORMAÇÃO PROFISSIONAL PEDRO MARTINS GUERRA

# ***MÁQUINAS ELÉTRICAS***

*Itabira*

*2004*

*FIEMG*

*CIEMG*

*SESI*

***SENAI***

*IEL*

*Sistema FIEMG*

**Presidente da FIEMG**  
Robson Braga de Andrade

**Gestor do SENAI**  
Petrônio Machado Zica

**Diretor Regional do SENAI e**  
**Superintendente de Conhecimento e Tecnologia**  
Alexandre Magno Leão dos Santos

**Gerente de Educação e Tecnologia**  
Edmar Fernando de Alcântara

**Elaboração/Organização**  
Eugênio Sérgio de Macedo Andrade

**Unidade Operacional**  
Centro de Formação Profissional Pedro Martins Guerra

# Sumário

<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	<b>05</b>
<b>1. TRANSFORMADORES</b> .....	<b>06</b>
1.1 Relação de Transformação .....	09
1.2 Relação de Potência em Transformadores .....	10
1.3 Diagrama Fazorial .....	12
1.4 Funcionamento de um Transformador a Vazio e com Carga .....	12
<b>2. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS</b> .....	<b>14</b>
2.1 Tipos de Ligação de Transformadores Trifásicos .....	15
2.2 Análise de Óleo e Umidade .....	19
2.3 Resfriamento de Transformadores Trifásicos .....	25
2.4 Características dos Transformadores .....	26
2.5 Aplicação .....	29
<b>3. MOTORES DE CA MONOFÁSICOS</b> .....	<b>31</b>
3.1 Motores Tipo universal .....	31
3.2 Motores Monofásicos de Indução .....	32
3.2.1 Motor de Campo Distorcido .....	33
3.2.2 Motor Monofásico de Fase Auxiliar .....	35
<b>4. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (MIT)</b> .....	<b>38</b>
4.1 Construção .....	38
4.2 Princípio de Funcionamento .....	41
4.3 Ligação de Motores .....	42
4.4 Considerações sobre Torque .....	43
4.5 Características Operacionais .....	49
4.6 Motor de Indução Trifásico de Rotor Bobinado .....	49
4.7 Dimensionamento de Circuitos Terminais, Ramais e Alimentadores .....	51
<b>5. MOTOR DE INDUÇÃO - ROTOR DE DUPLA GAIOLA</b> .....	<b>55</b>
<b>6. MOTORES DE MÚLTIPLAS VELOCIDADES</b> .....	<b>56</b>
6.1 Motores de Dois Enrolamentos .....	56
6.2 Motor Dahlander .....	56
<b>7. MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO</b> .....	<b>58</b>

FIEMG

CIEMG

SESI

**SENAI**

IEL

<b>8. MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA</b> .....	<b>60</b>
8.1 Princípio de Funcionamento .....	60
8.2 Partida dos Motores CC .....	65
8.3 Características de Torque dos Motores CC .....	66
8.3.1 Motor Série .....	66
8.3.2 Motor Shunt .....	67
8.3.3 Motor Composto .....	68
8.4 Características de Velocidade dos Motores CC .....	69
8.4.1 Motor Série .....	69
8.4.2 Motor Shunt .....	70
8.4.3 Motor Composto .....	70
8.5 Potência Mecânica e Rendimento de um Motor CC .....	71
8.6 Formas de Controle da Velocidade dos Motores CC .....	72
8.7 Reação da Armadura .....	73
8.8 Enrolamentos .....	74
8.9 Inversão de Rotação do Motor CC .....	75
8.10 Frenagens .....	76
8.11 Controle de Velocidade do Motor CC – Circuito RLE .....	77
8.12 Escovas Elétricas .....	80
8.13 O Carbono .....	81
8.14 Classificação das Escovas .....	81
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>83</b>

FIEMG

CIEMG

SESI

**SENAI**

IEL

## Apresentação

**“Muda a forma de trabalhar, agir, sentir, pensar na chamada sociedade do conhecimento. “  
Peter Drucker**

O ingresso na sociedade da informação exige mudanças profundas em todos os perfis profissionais, especialmente naqueles diretamente envolvidos na produção, coleta, disseminação e uso da informação.

O **SENAI**, maior rede privada de educação profissional do país, sabe disso, e, consciente do seu papel formativo, educa o trabalhador sob a égide do conceito da competência:” *formar o profissional com responsabilidade no processo produtivo, com iniciativa na resolução de problemas, com conhecimentos técnicos aprofundados, flexibilidade e criatividade, empreendedorismo e consciência da necessidade de educação continuada.*”

Vivemos numa sociedade da informação. O conhecimento, na sua área tecnológica, amplia-se e se multiplica a cada dia. Uma constante atualização se faz necessária. Para o **SENAI**, cuidar do seu acervo bibliográfico, da sua infraestrutura, da conexão de suas escolas à rede mundial de informações – internet – é tão importante quanto zelar pela produção de material didático.

Isto porque, nos embates diários, instrutores e alunos, nas diversas oficinas e laboratórios do **SENAI**, fazem com que as informações, contidas nos materiais didáticos, tomem sentido e se concretizem em múltiplos conhecimentos.

O **SENAI** deseja, por meio dos diversos materiais didáticos, aguçar a sua curiosidade, responder às suas demandas de informações e construir *links* entre os diversos conhecimentos, tão importantes para sua formação continuada!

**Gerência de Educação e Tecnologia**

# 1. TRANSFORMADORES

O transformador é um dispositivo que permite elevar ou abaixar os valores de tensão ou corrente em um circuito de CA.

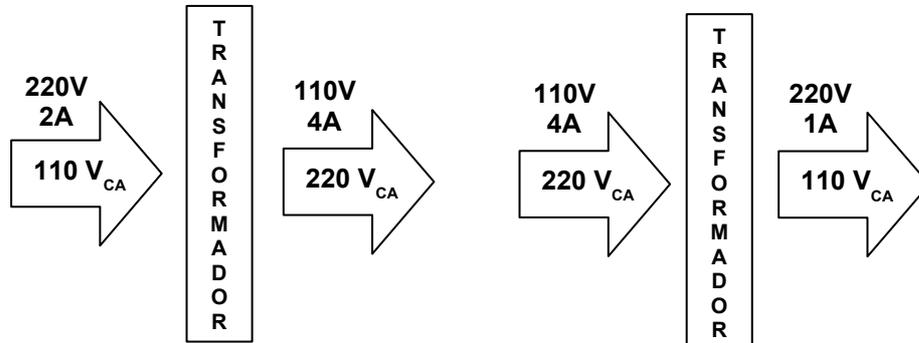


Figura 1.1

A grande maioria dos equipamentos eletrônicos emprega transformadores, seja como elevador ou abaixador de tensões.

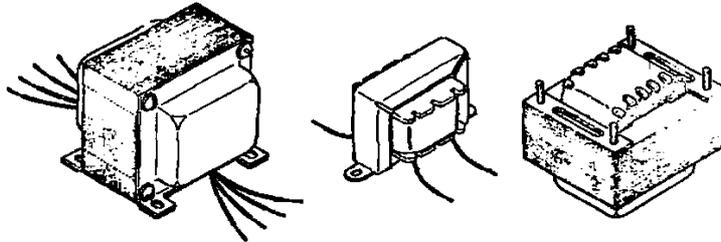


Figura 1.2

Quando uma bobina é conectada a uma fonte de CA surge um campo magnético variável ao seu redor.

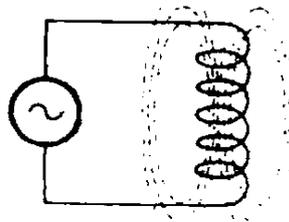


Figura 1.3 – Campo magnético variável

Aproximando-se outra bobina à primeira, o campo magnético variável gerado na primeira bobina “corta” as espiras da segunda bobina.

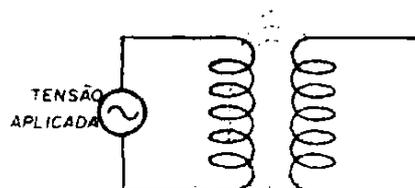


Figura 1.4

Como conseqüência da variação de campo magnético sobre suas espiras surge, na segunda bobina, uma tensão induzida.

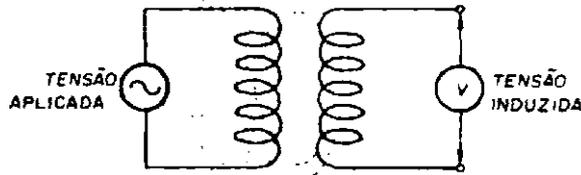


Figura 1.5

A bobina na qual se aplica a tensão CA é denominada de primário do transformador e a bobina onde surge a tensão induzida é denominada de secundário do transformador.

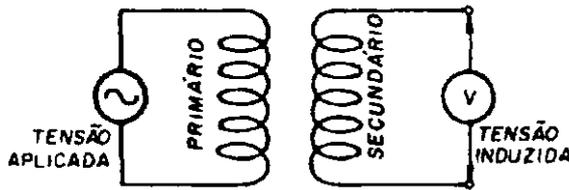


Figura 1.6

É importante observar que as bobinas primária e secundária são eletricamente isoladas entre si. A transferência de energia de uma para outra se dá exclusivamente através das linhas de força magnética.

A tensão induzida no secundário de um transformador é proporcional ao número de linhas magnéticas que corta a bobina secundária.

Por esta razão, o primário e o secundário de um transformador são montados sobre um núcleo de material ferromagnético.

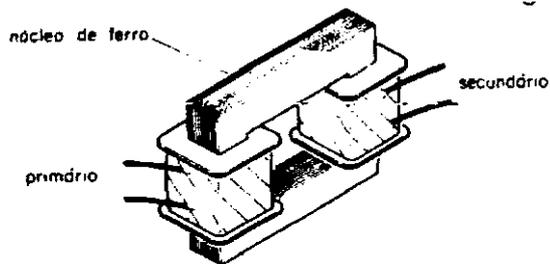


Figura 1.7

O núcleo diminui a dispersão do campo magnético, fazendo com que o secundário seja cortado pelo maior número de linhas magnéticas possível, obtendo uma melhor transferência de energia entre primário e secundário. As figuras abaixo ilustram o efeito provocado pela colocação do núcleo no transformador.

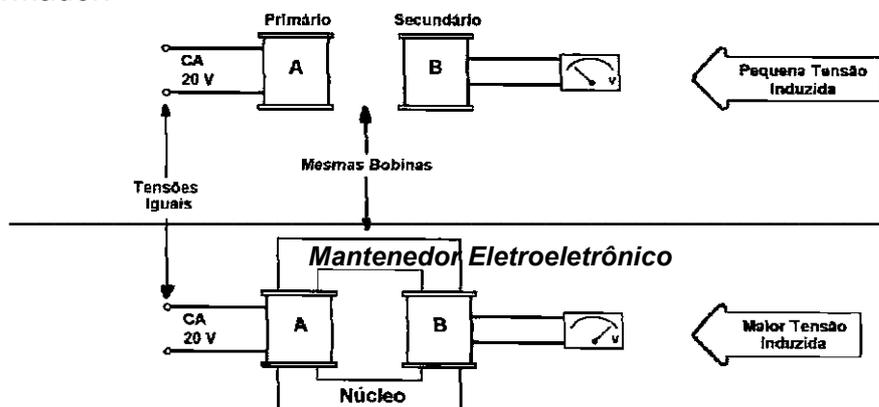


Figura 1.8

Com a inclusão do núcleo, o aproveitamento do fluxo magnético gerado no primário é maior. Entretanto surge um inconveniente:

O ferro maciço sofre grande aquecimento com a passagem do fluxo magnético.

Para diminuir este aquecimento utiliza-se ferro silício laminado para a construção do núcleo.

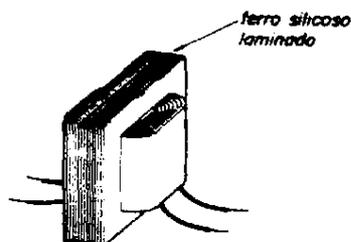


Figura 1.9

Com a laminação do ferro se reduzem as “correntes parasitas” responsáveis pelo aquecimento do núcleo.

A laminação não elimina o aquecimento, mas reduz sensivelmente em relação ao ferro maciço.



Figura 1.10 - Símbolos empregados para representar o transformador, segundo a norma ABNT

## 1.1 RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

A aplicação de uma tensão CA ao primário de um transformador resulta no aparecimento de uma tensão induzida no seu secundário.

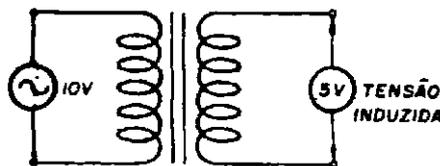


Figura 1.11

Aumentando-se a tensão aplicada ao primário, a tensão induzida no secundário aumenta na mesma proporção.

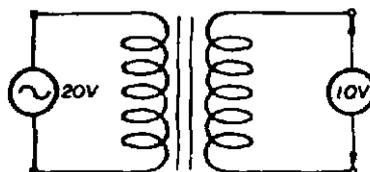


Figura 1.12 – A tensão aplicada no primário dobra, a tensão induzida no secundário também dobra

Verifica-se através dos exemplos das figuras acima que, no transformador tomado com exemplo, a tensão do secundário é sempre a metade da tensão aplicada no primário.

A relação entre as tensões no primário e secundário depende fundamentalmente da relação entre o número de espiras no primário e secundário.

Num transformador com primário de 100 espiras e secundário de 200 espiras, a tensão no secundário será o dobro da tensão no primário.

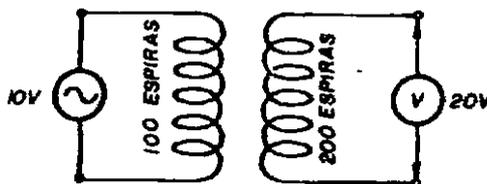


Figura 1.13 – O dobro de espiras no secundário, o dobro da tensão no secundário

Denomina-se o número de espiras do primário de  $N_P$  e do secundário de  $N_S$ . Pode-se escrever:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{20V}{10V} = 2 \qquad \frac{N_S}{N_P} = 2$$

(lê-se: saem 2 para cada 1 que entra)

Verifica-se que o resultado da relação  $N_S / N_P$  é o mesmo da relação  $V_S / V_P$ . Logo, pode-se escrever :

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

Matematicamente pode-se escrever que, para o transformador usado como exemplo:

$$\frac{V_S}{V_P} = 0,5$$

onde  $V_S$  = tensão no secundário.

$V_P$  = tensão no primário.

O resultado desta relação ( $V_S/V_P$ ) é denominado de relação de **transformação**.

$$\frac{V_S}{V_P} = \text{Relação de Transformação}$$

A relação de transformação expressa a relação entre a tensão aplicada ao primário e a tensão induzida no secundário.

Um transformador pode ser construído de forma a ter qualquer relação de transformação de que se necessite. Por exemplo:

Relação de Transformador	Tensões
3	$V_S = 3 \times V_P$
5,2	$V_S = 5,2 \times V_P$
0,3	$V_S = 0,3 \times V_P$

Tabela 1.1

Os transformadores isoladores são muito utilizados em laboratórios de eletrônica para que a tensão presente nas bancadas seja eletricamente isolada da rede.

## 1.2 RELAÇÃO DE POTÊNCIA EM TRANSFORMADORES

O transformador é um dispositivo que permite modificar os valores de tensão e corrente em um circuito de CA.

Em realidade o transformador recebe uma quantidade de energia elétrica no primário, transforma em campo magnético e converte novamente em energia elétrica disponível no secundário.

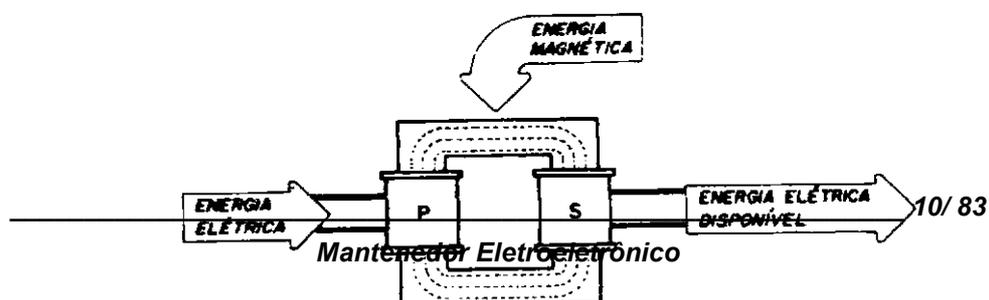


Figura 1.14

A quantidade de potência absorvida da rede elétrica pelo primário do transformador é denominada de potência do primário, representada pela notação  $P_P$ .

Admitindo-se que não existam perdas por aquecimento do núcleo, pode-se concluir que toda a potência absorvida no primário está disponível no secundário.

*Potência Disponível no Secundário = Potência Absorvida no Primário*

A potência disponível no secundário é denominada de potência do secundário  $P_S$ . Se não existem perdas, pode-se afirmar:

$$P_S = P_P$$

A potência do primário depende da tensão aplicada e da corrente absorvida da rede:

$$\text{Potência do Primário} \Rightarrow P_P = V_P \times I_P$$

A potência do secundário é produto da tensão e corrente no secundário:

$$\text{Potência do Secundário} \Rightarrow P_S = V_S \times I_S$$

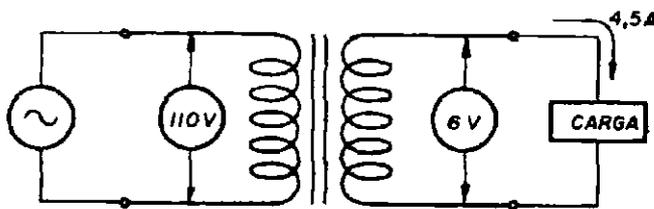
Considerando o transformador como ideal pode-se, então escrever:  $P_S = P_P$

$$V_S \times I_S = V_P \times I_P \quad \leftarrow \text{Relação de potências no transformador}$$

Esta equação permite que se determine um valor do transformador se os outros três forem conhecidos.

### Exemplo

1) Um transformador abaixador de 110 V para 6 V deverá alimentar no seu secundário uma carga que absorve uma corrente de 4,5 A. Qual será a corrente no primário?



$$\begin{aligned} V_P &= 110V \\ V_S &= 6V \\ I_S &= 4,5A \\ I_P &= ? \end{aligned}$$

$$V_P \times I_P = V_S \times I_S \Rightarrow I_P = \frac{V_S \times I_S}{V_P}$$

$$I_P = \frac{6V \times 4,5A}{110V} \quad I_P = \frac{27W}{110V} \quad I_P = 0,24A$$

### 1.3 DIAGRAMA FASORIAL

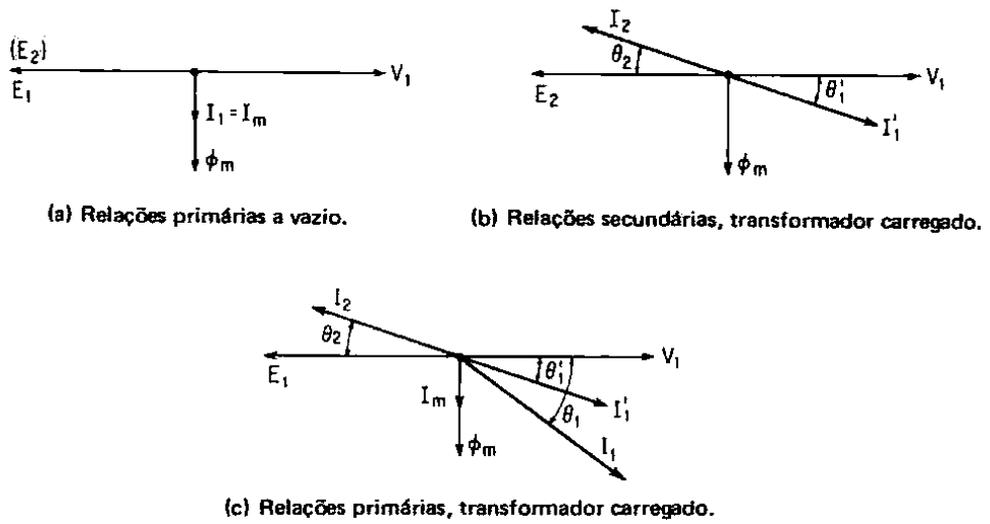


Figura 1.15 – Relações fasoriais no transformador ideal

### 1.4 FUNCIONAMENTO DE UM TRANSFORMADOR A VAZIO E COM CARGA

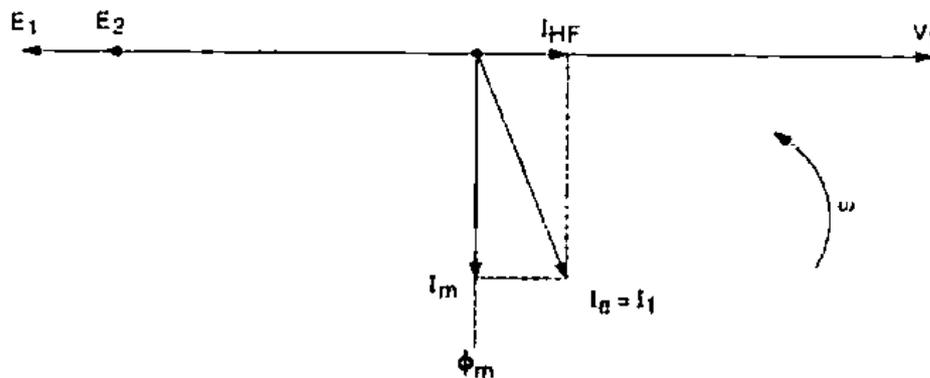
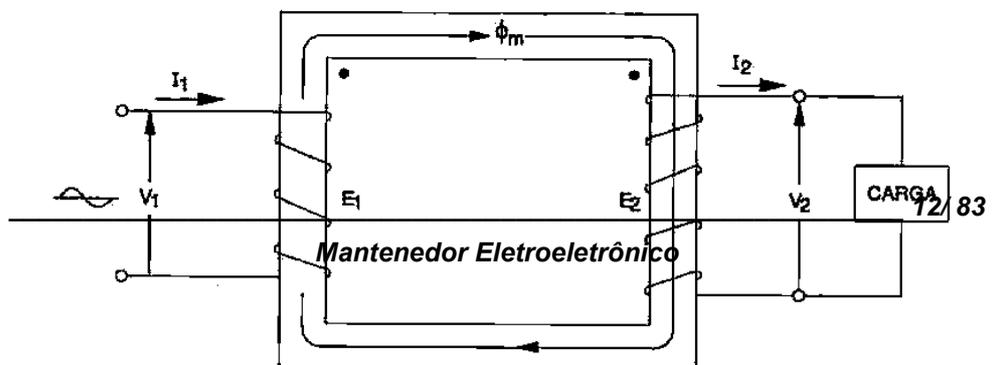


Figura 1.16 – A vazio





funcionamento baseia-se no fato de que uma tensão é induzida no secundário, quando este é percorrido pelo fluxo magnético variável gerado no primário.

O transformador é formado basicamente pelo núcleo e pelas bobinas (primária e secundária).

O núcleo constitui o circuito magnético do transformador. É peça metálica construída com chapas de ferro-silício isoladas entre si e sobre a qual são montadas as bobinas.

Os transformadores trifásicos, usados na distribuição de eletricidade, têm as mesmas funções que o transformador monofásico : abaixar ou elevar a tensão.

Trabalham com três fases e são de porte grande e mais potentes que os monofásicos.

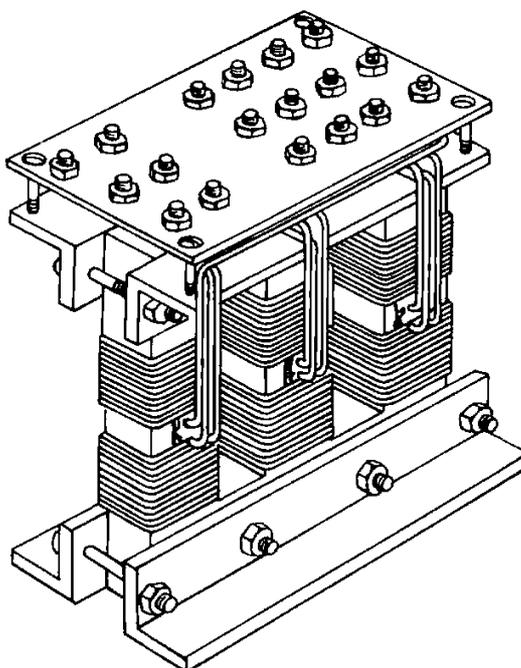


Figura 2.1 – Representação esquemática do núcleo do transformador trifásico

O núcleo dos transformadores trifásicos também é constituído de chapas de ferro-silício. Essas chapas possuem três colunas que são unidas por meio de duas armaduras. Cada coluna serve de núcleo para uma fase onde estão localizadas duas bobinas, uma primária e outra secundária. Por essa razão, esses transformadores têm, no mínimo, seis bobinas: três primárias e três secundárias, isoladas entre si. As bobinas das três fases devem ser exatamente iguais.

Num transformador trifásico, cada fase funciona independentemente das outras duas, como se fossem três transformadores monofásicos em um só. Isso significa que três transformadores monofásicos exatamente iguais podem substituir um transformador trifásico.

Esse sistema é mais econômico, pois facilita os serviços de manutenção, reparação e aumento de capacidade do banco de transformadores. A ligação inicial de dois transformadores monofásicos em triângulo aberto permite que um terceiro transformador seja acrescentado quando houver um aumento de carga.

## 2.1 TIPOS DE LIGAÇÃO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

As ligações internas entre as três fases do transformador trifásico podem ser feitas de duas maneiras:

- ligação em estrela (y);
- ligação em triângulo ( $\Delta$ ).

Tudo o que já foi estudado sobre as ligações em estrela e em triângulo vale também para os transformadores trifásicos.

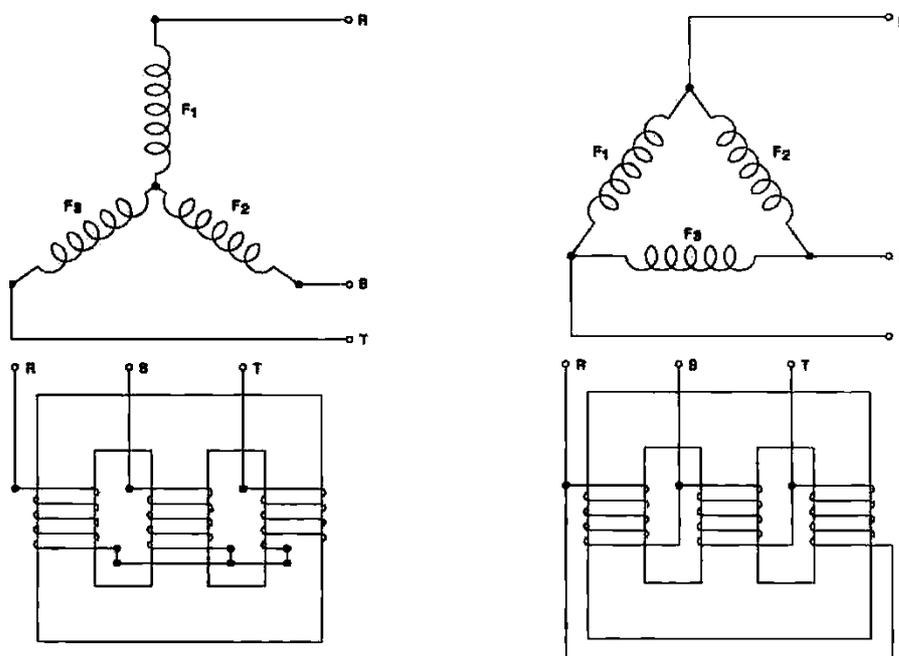


Figura 2.2 - Representações esquemáticas possíveis para esses tipos de ligação

As ligações em estrela e em triângulo são executadas tanto no primário quanto no secundário do transformador. Nos diagramas, as letras H e X representam, respectivamente, o primário e o secundário, enquanto as extremidades dos enrolamentos são identificadas por números.



Figura 2.3

As ligações do primário e do secundário podem ser combinadas de várias formas:

- em estrela no primário e em estrela no secundário;
- em triângulo no primário e em triângulo no secundário;
- em estrela no primário e em triângulo no secundário e vice-versa.

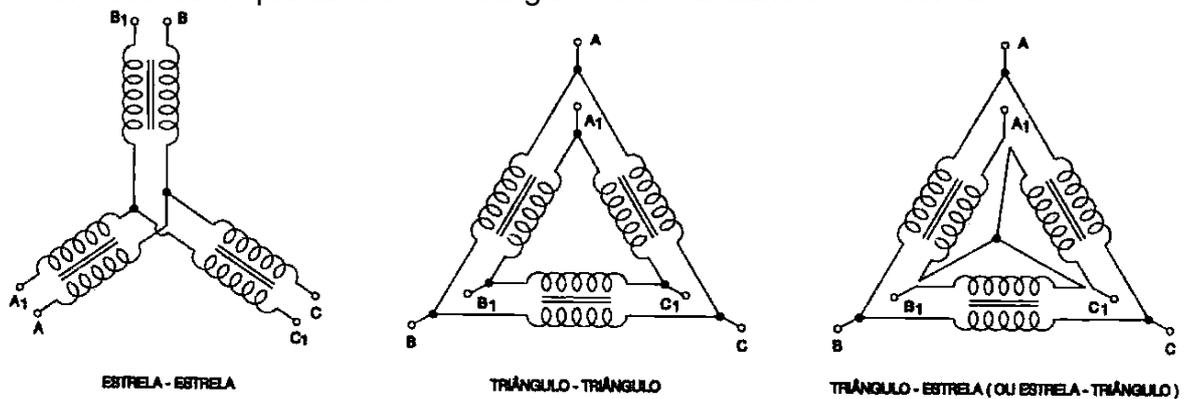


Figura 2.4 – Esquemas dos tipos de combinações

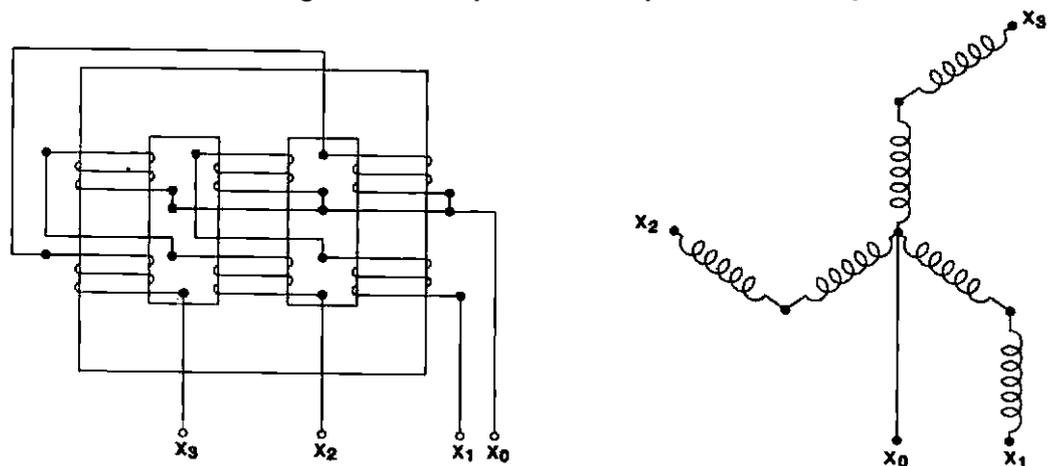


Figura 2.5 - Quando é necessário equilibrar as cargas entre as fases do secundário, emprega-se a ligação em ziguezague

Se, por exemplo, a fase 1 do secundário estiver recebendo mais carga, esse desequilíbrio será compensado pela indução das duas colunas onde a fase 1 está distribuída.

Para que as combinações de ligações sejam realizadas, os transformadores são divididos em dois grupos:

- **grupo A:** quando a tensão do secundário está em fase com a tensão do primário;
- **grupo B:** quando a tensão do secundário está defasada em 30°.

Dois transformadores de um pequeno grupo podem ser ligados em paralelo, desde que exista entre eles correspondência de tensão e impedância.

Transformadores de grupos diferentes não podem ser ligados em paralelo.

Na tabela abaixo são representadas as interligações dos enrolamentos, a relação de transformação e os tipos de ligação que podem ser feitos com os transformadores do grupo A .

TIPOS DE LIGAÇÃO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DO GRUPO A			
Símbolo e denominação	Diagrama		Relação de transformação (tensão entre fases)
	Enrolamento de mais alta tensão	Enrolamento de mais baixa tensão	
$\Delta/\Delta$ Triângulo-triângulo			$EX = \frac{NX'}{NH} \cdot EH$
$Y/Y$ Estrela-estrela			$EX = \frac{NX}{NH} \cdot EH$
$\Delta/\text{zigzag}$ Triângulo-ziguezague			$EX = \frac{NX \cdot EH \cdot \sqrt{3}}{2NH}$

Para verificar se as lides ou terminais c H1, H2, H3 / e X1, X2, X3 de um transformador pelos de corrente trifásica apropriada. Em seguida, ligam-se os terminais H1 e X1 entre si (curto -circuito).

Finalmente , mede-se a tensão entre os vários pares de terminais. O resultado deve ser o seguinte :

- tensão entre  $H_2$  e  $X_3$  igual à tensão entre  $H_3$  e  $X_2$  ;
- tensão entre  $H_2$  e  $X_2$  menor que a tensão entre  $H_1$  e  $X_2$  ;
- tensão entre  $H_2$  e  $X_2$  menor que a tensão entre  $H_2$  e  $X_3$ .

Na tabela a seguir, são apresentadas as interligações dos enrolamentos, a relação de transformação e os tipos de ligação que podem ser feitos com os transformadores do grupo B.

TIPOS DE LIGAÇÃO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DO GRUPO B			
Símbolo e denominação	Diagrama		Relação de transformação (tensão entre fases)
	Enrolamento de mais alta tensão	Enrolamento de mais baixa tensão	
$\Delta/Y$ Triângulo-estrela			$EX = \frac{NX \cdot 1,73 \cdot EH}{NH}$
$Y/\Delta$ Estrela-triângulo			$EX = \frac{NX \cdot EH}{NH \cdot \sqrt{3}}$
$Y/Y$ Estrela-ziguezague			$EX = \frac{NX \cdot EH \cdot \sqrt{3}}{2NH}$

*Observação:*  $N_h$  = número de espiras do primário e  $N_x$  = número de espiras do secundário.

## 2.2 ANALISE DE ÓLEO E UMIDADE

Antes de entrar diretamente no assunto acima , faremos uma rápida revisão sobre os isolantes .

Observe a figura a seguir ,onde duas placas condutoras entre as quais se intercala um material de elevada resistividade (isolante).

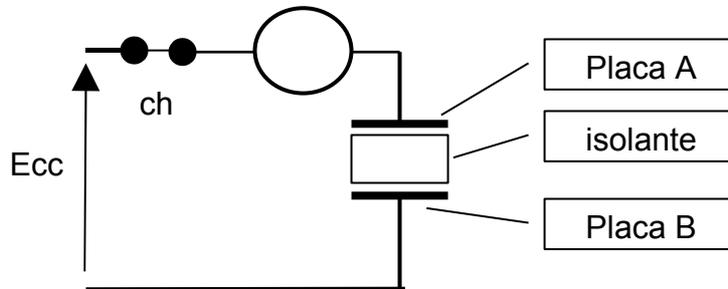


Figura 2.6

Ao aplicarmos uma tensão  $E$  ao conjunto forma-se um capacitor . Se a tensão for contínua ,haverá a carga do capacitor ficando uma placa positiva (+) e outra negativa (-) . No intervalo entre as placas, aparece um campo elétrico proveniente da carga elétrica existente cujo valor é:

$$Q = C \times E$$

onde:  $C$  é a capacitância em Farads,

$E$  é a tensão em Volts e

$Q$  é a carga em Coulombs.

Este campo elétrico tende a transferir a carga de uma placa para a outra através do isolante . Quando isto ocorre , diz-se que está havendo uma fuga e aparece uma corrente de uma placa para a outra , e esta é denominada corrente de fuga.

Se o isolante é perfeito ,não há fuga no intervalo entre as placas ( $i_f = 0$ ) e o galvanômetro  $G$  intercalado no circuito ,registra apenas a corrente de carga  $i_c$  (corrente de capacitância) . Se a chave for aberta ,o capacitor  $C$  permanece carregado e o galvanômetro indicaria 0 A.

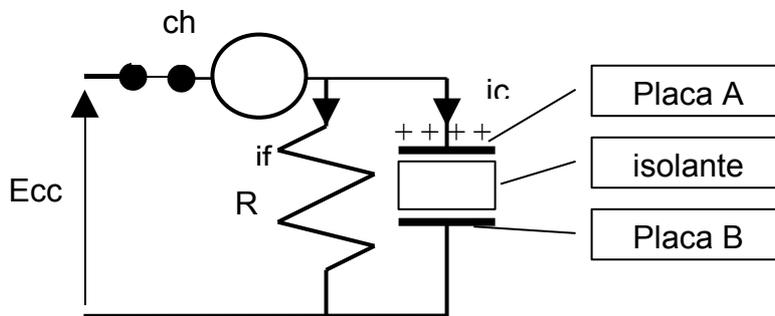


Figura 2.7

Se o isolante não é perfeito , a corrente de fuga  $i_f$  é diferente de 0 A , e o galvanômetro registra  $i_t = i_f + i_c$  . Se a chave  $ch$  for aberta , desligando a fonte , o capacitor não permanecerá carregado pois a corrente de carga se escoará através do isolante representado por  $R$ , na figura 2.7.

### Circuito Equivalente do Material Isolante

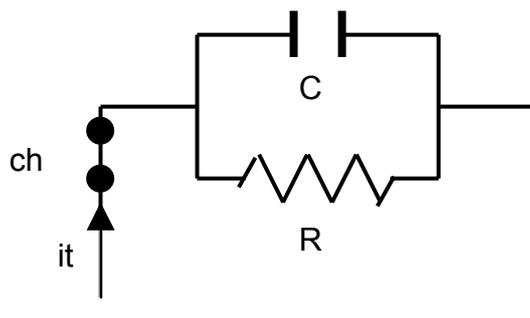


Figura 2.8

O isolante na prática é constituído por pequenos capacitores ligados em paralelo com resistores elementares, conforme figura acima, que é uma representação geral e simplificada.

No caso de um isolante perfeito, temos

$$I_f = 0 \text{ A}$$

$$I_t = i_c$$

$$R = \text{infinito}$$

Instante  $t$  segundos

$$I_f = 0 \text{ A}$$

$$I_c = 0 \text{ A}$$

No caso de um isolante não perfeito, temos

$I_f$  diferente de  $0 \text{ A}$

$$I_t = i_c + i_f$$

$R$  de valor mensurável

Instante  $t$  segundos

$I_f$  diferente de  $0 \text{ A}$

$$I_c = 0 \text{ A}$$

$$I_t = i_f$$

Em ambos os casos,  $i_c$  é considerado corrente de carga dos capacitores elementares e se anula após algum tempo que a chave  $ch$  for fechada.

### Medidas de Isolamento

a) Resistência de isolamento: consiste em se medir o valor de  $R$  no circuito equivalente. O material isolante em bom estado tem  $R$  elevado e  $i_f$  tendendo a  $0 \text{ A}$

b) Perdas dielétricas: se aplicarmos uma fonte de tensão C.A. ao isolante conforme circuito equivalente teremos o diagrama fasorial abaixo:

Podemos avaliar o estado do isolante através do ângulo  $\delta$ , chamado de ângulo de perdas

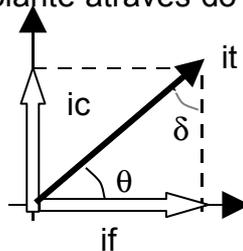


Figura 2.9

Com efeito,  $\cos(\theta) = \frac{if}{it}$ .

Para um isolante em bom estado,  $if \rightarrow 0$  A e  $\cos(\theta) \rightarrow 0$  ou  $\theta = 90^\circ$ . O cosseno chama-se fator de potência do isolamento.

Alguns autores citam a medida através da tangente do ângulo  $\delta$  que será:

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{if}{ic}$$

Nos isolantes práticos  $\delta \rightarrow 90^\circ$  e  $it = ic$ . então  $\operatorname{tg}(\delta) = \cos(\theta)$ . Um material mais isolante que o vácuo, tem capacitância cujo valor será menor que a do vácuo. Se  $C < C_0$ , então  $k < 1$ , enquanto que, se o material for menos isolante que o vácuo, teremos  $C > C_0$ , e  $k > 1$ .

### Classificação dos Materiais Isolantes

Modernamente, faz-se a classificação de modo a orientar o usuário para o emprego adequado de um isolante. Como se sabe a temperatura aumenta a mobilidade molecular, degradando o isolante. Sendo assim, as características dielétricas em si, não são suficientes para a escolha do material isolante, valendo mais para a escolha, as condições de temperatura sob as quais o material vai trabalhar.

Assim sendo, não se deve isolar um fio em algodão para trabalhar dentro de uma estufa, e assim a ASA classificou os isolantes segundo as temperaturas máximas de trabalho, onde presume-se que o isolante não perde suas características dielétricas. Esta classificação baseia-se em duas temperaturas notáveis e que são:

#### a) Ponto de Fulgor

É a temperatura na qual um material começa a emanar vapores e sob chama externa pode inflamar-se.

#### b) Ponto de Ignição

É a temperatura na qual espontaneamente sem presença de chama externa, o material se inflama.

Deve-se então tomar o cuidado de se utilizar materiais que não atinjam as respectivas temperaturas .

### c) Constante Dielétrica

É uma grandeza que relaciona as capacitâncias de um isolante em relação à capacitância do vácuo (permissividade).

$$K = \frac{C}{C_0}$$

### d) Rigidez Dielétrica

Suponha a figura a seguir , onde se tenha um isolante de espessura 'd' sobre o qual se aplica um potencial proveniente de uma fonte de tensão.

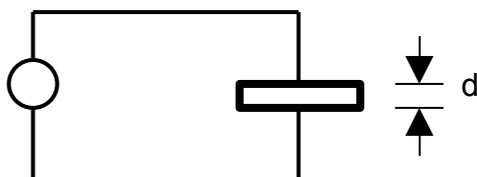


Figura 2.9

Para valores pequenos de tensão não há corrente através do isolante , porém se a tensão for aumentada , existirá um instante em que flui uma corrente através do isolante , ocorrendo a perfuração do mesmo .

Esta tensão que provoca a perfuração é denominada tensão disruptiva ou de descarga e sua medida é em kV/cm ou kV/mm.

Para isolantes sólidos utiliza-se o megohmetro para avaliar a resistência elétrica do isolamento .

A ocorrência da umidade influencia na medição de isolação .

Agora , falaremos sobre o assunto proposto que é análise de óleo e umidade nos transformadores .

Para o resfriamento das partes elétricas e magnéticas de transformadores de distribuição de energia elétrica utiliza-se o óleo mineral , cujas principais características devem obedecer a critérios normalizados e aprovados .

A rigidez dielétrica que é medida com eletrodos distanciados a 2,5mm deve ser de 30kV (ABNT –MB 330).

A cor característica é o amarelo limão.

O ponto de fulgor aproximado de 130°C.

O fator de potência máximo de 0,1%.

A viscosidade de 30cs (centitokes).

Quantidade de água 35 ppm máximo (ASTM D 1533).

Tensão interfacial (40 dina/cm) 0,4 mN/cm a 25°C (MB 320).

Número de neutralização (NN) menor que 0,1 mgKOH/g, refere-se a acides do óleo.

A tensão interfacial é a tensão na interface óleo água e é medida em dina/cm ou milinewton/metro, e à medida que o óleo se deteriora a TIF diminui, e em tese ,o método é usado para triagem do óleo , embora não permita diferenciar os diversos contaminantes.

### **Recomendações Para Inspeção**

Deve-se retirar amostra do óleo do tanque ( reservatório ) do transformador para ensaios em laboratório ou no próprio local , rigidez dielétrica , fator de potência , quantidade de água (ppm) ,tensão interfacial e análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo.

Normalmente , o espaço acima do nível de óleo no reservatório pode conter gás sob pressão , deve-se determinar o ponto de orvalho do gás antes de reduzi-la a zero .

O transformador não deve ser aberto quando a temperatura do tanque e das partes internas não for no mínimo 10°C acima do ponto de orvalho do ar e sua umidade relativa superior a 70%.

Lembrar que o gás inerte e os vapores de óleo são sufocantes e podem causar a morte .

Se o teor de umidade da isolação for superior a 0,5% deve-se proceder à secagem do transformador com a retirada do óleo , sem expor o núcleo , as bobinas , e as demais partes isoladas ao ambiente.

Não deixar o óleo isolante e a isolação sólida do transformador em contato com a umidade do ar ou de qualquer outra fonte .

### **Sistemas de Preservação do Óleo Isolante de Transformadores**

Para que a ação do ar atmosférico sobre o óleo isolante seja reduzida ou eliminada ,os transformadores são equipados com dispositivos de preservação .

Se a respiração do transformador se realizar livremente sem que o ar atmosférico passe por qualquer sistema que elimine as substâncias que prejudiquem o óleo , dois de seus grandes inimigos , o oxigênio e a umidade estarão presentes e contribuirão para a sua degradação.

1. O desidratador mais comum é o uso de sílica-gel (substância desidratante) o qual absorve a umidade que quando completamente seco exibirá uma cor azul. Com a presença de umidade passa para a cor rosa.
2. Selagem com gás e óleo
3. Sistema de selagem com gás inerte de pressão controlada automaticamente
4. Sistema de selagem com bolsa ou célula de ar

### Testes Recomendados Para o Óleo em Serviço em Transformadores

1. Exame visual e cor: verifica a existência de partículas sólidas e sua coloração cuja classificação é feita comparando-se com as cores de uma escala padrão numerada de 0 a 8
2. Densidade: pode ser determinada pelo método do densímetro , que é a relação entre massa de determinado volume de óleo e a massa de igual volume de água na temperatura de 15°C.

Tanto o densímetro quanto o termômetro devem ser cuidadosamente mergulhados no óleo dentro de uma proveta e a medição para óleo tipo B deverá ser no máximo 0,86 e para o óleo tipo A 0,9 de acordo com CNP-16, resolução 16/79.

Deve-se observar:

- rigidez dielétrica;
- fator de potência;
- número de neutralização;
- tensão interfacial;
- umidade.

### Programação da Manutenção Preventiva do Transformador

Os maiores inimigos do sistema de isolamento de um transformador são: Água , calor excessivo ,oxigênio e contaminação.

Água – um teor de água de 50 ppm no óleo do transformador é uma indicação de que a isolamento está muito umidificada.

Os valores recomendados para transformadores de 69kV é de 35 ppm , para transformadores acima de 69kV a 238kV é de 25 ppm .

Calor excessivo – a vida útil do óleo isolante reduz-se aproximadamente à metade para cada 10°C acima de 60°C.

São consideradas temperaturas críticas da isolamento de óleo a 60°C na parte superior do tanque.

Temperatura de serviço(°C)	Vida útil do óleo isolante
60	20 anos
70	10 anos
80	6 anos
90	2,5 anos
100	1,25 anos
110	7 meses

Tabela 2.3

Número de neutralização (NN) e tensão interfacial (TIF)

A experiência de campo ,durante quinze anos ,indica que os valores abaixo tabelados podem ser atingidos:

Tempo de serviço (anos)	NN(máximo) (mgKOH/g)	TIF (mínima) (dina/cm)
De 1 a 5	0,05	35
De 6 a 10	0,06	30 - 35

Tabela 2.4

Assim que o valor de NN chegar a 0,10 mgKOH/g ou a TIF cair para 30 dina/cm,é recomendável que o óleo seja submetido a tratamento.

O intervalo de tempo recomendável entre a realização de testes do óleo do transformador depende da temperatura do óleo da parte superior do tanque do transformador em serviço contínuo.

Os testes recomendáveis do óleo são: rigidez dielétrica ,número de neutralização (NN) ,tensão interfacial (TIF) , cor , teor de água em ppm, densidade, aspecto, sedimento e fator de potência , que são referidos conforme a temperatura do óleo na parte superior do tanque , conforme tabela abaixo:

Temperatura contínua do óleo isolante do topo do tanque (°C)				
	60 a 70	70 a 80	80 a 90	90 a 100
intervalos	anual	6 meses	4 meses	mensalmente

Tabela 2.5

## 2.3 RESFRIAMENTO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Os transformadores, quando em funcionamento, apresentam uma pequena perda que também se manifesta sob a forma de calor. Assim, quanto maior a potência consumida, maior é a geração de calor dentro do transformador.

Como a temperatura elevada traz danos irreparáveis ao funcionamento do transformador, deve-se mantê-la dentro de limites seguros.

Segundo a norma da ABNT (EB91), existem dois tipos de resfriamento:

- a seco;

- com líquido isolante.

### **Transformador Com Resfriamento Seco**

Segundo a norma EB91, “transformador a seco é o transformador cujos núcleos e enrolamento estão envoltos e refrigerados pelo ar do ambiente” .

Dentro desse grupo estão todos os pequenos transformadores e os de baixa potência nos quais a troca de calor é feita com o ar.

Para os transformadores desse grupo que necessitem de maior refrigeração, usam-se ventiladores que forcem a circulação do ar. Isso acontece em aparelhos eletrônicos como os microcomputadores, por exemplo.

### **Transformador Em Líquido Isolante**

De acordo com a norma EB91, transformador em líquido isolante “é o transformador cujos núcleo e enrolamento são imersos em líquido isolante”.

Esse líquido isolante exerce duas funções: isolação e resfriamento, pois transfere para as paredes do tanque o calor produzido.

Para cumprir essas funções, o óleo refrigerante deve possuir:

- elevada rigidez dielétrica;
- boa fluidez;
- capacidade de funcionamento em temperaturas elevadas.

O líquido isolante que possui essa característica é o óleo mineral.

*Observação: Existe também um óleo chamado de ascarel, mas seu uso é proibido por ser altamente tóxico e, portanto, prejudicial à saúde.*

Os transformadores que necessitam desse tipo de resfriamento são os trifásicos de grande potência, usados na rede de distribuição de energia elétrica.

## **2.4 CARACTERÍSTICAS DOS TRANSFORMADORES**

Os transformadores, em geral, apresentam perdas de potência, quando estão em funcionamento. Essas perdas podem ser por efeito Joule (calor) e perdas no ferro.

Além dessa característica, estudaremos o rendimento e a impedância percentual dos transformadores monofásicos e trifásicos.

### **Perdas Por Efeito Joule**

As perdas por efeito Joule ocorrem em forma de calor, devido à resistência ôhmica dos enrolamentos; elas são chamadas de perdas no cobre.

Outras perdas são conhecidas como: perdas do núcleo que ocorrem pelo efeito da histerese magnética, e perdas adicionais devidas às correntes parasitas (ou correntes de Foucault).

As perdas no cobre dos transformadores monofásicos são calculadas através da fórmula:  $P_{Cu} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$

onde: **P<sub>cu</sub>** corresponde às perdas no cobre em Watts;

**R<sub>1</sub>** é a resistência ôhmica do enrolamento primário, medida na temperatura de trabalho (75°C);

**I<sub>1</sub>** é a corrente primária em plena carga;

**R<sub>2</sub>** é a resistência ôhmica do enrolamento secundário, medida na temperatura de trabalho (75°C);

**I<sub>2</sub>** é a corrente secundária em plena carga.

Pode-se observar, através da fórmula, que as perdas no cobre sofrem dois tipos de variação, ou seja:

- através da variação da carga do transformador, pois, variando a carga, variam também as correntes primárias  $I_1$  e correntes secundárias  $I_2$ ;
- através da variação de temperatura de trabalho do transformador, variam também as resistências ôhmicas dos enrolamentos primários  $R_1$  e  $R_2$ .

Para o cálculo de perda nos transformadores trifásicos, a fórmula é:

$$P_{Cu} = 3 (R_1 \cdot I F_1^2 + R_2 \cdot I F_2^2)$$

## Rendimento

Você já estudou que o enrolamento primário absorve potência elétrica, enquanto o enrolamento secundário fornece potência elétrica.

O rendimento de um transformador é definido pela relação entre a potência elétrica fornecida pelo secundário e a potência elétrica absorvida pelo primário.

A potência absorvida pelo primário corresponde à potência fornecida pelo secundário mais as perdas no cobre e no ferro.

Como as perdas no cobre variam em função da temperatura, o rendimento do transformador deve ser calculado com a temperatura em regime de trabalho, ou seja, 75°C.

Para este cálculo, usa-se a seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2}{V_2 \cdot I_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \quad \text{ou} \quad \eta(75^\circ\text{C}) = \frac{V_2 \cdot I_2}{V_2 \cdot I_2 + P_{Cu}(75^\circ\text{C}) + P_{Fe}}$$

onde:  $\eta$  é o rendimento na temperatura ambiente;  
 $75^{\circ}\text{C}$  é o rendimento na temperatura de trabalho;  
 $V_2$  é a tensão secundária em volts;  
 $I_2$  é a corrente secundária em ampères;  
 $P_{\text{Cu}}$  indica as perdas no cobre à temperatura ambiente;  
 $P_{\text{Cu}}(75^{\circ}\text{C})$  indica as perdas à temperatura de trabalho;  
 $P_{\text{Fe}}$  indica as perdas no ferro.

Para transformadores trifásicos, a expressão é a seguinte:

$$\eta = \frac{V_{F2} \cdot I_{F2}}{V_{F2} \cdot I_{F2} + P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}}} \quad \text{ou} \quad \eta(75^{\circ}\text{C}) = \frac{V_{F2} \cdot I_{F2}}{V_{F2} \cdot I_{F2} + P_{\text{Cu}}(75^{\circ}\text{C}) + P_{\text{Fe}}}$$

onde:  $V_{F2}$  é a tensão secundária de fase  
 $I_{F2}$  é a corrente secundária de fase

### Impedância Percentual

A impedância percentual ou tensão de curto-circuito percentual corresponde a uma parte da tensão nominal do enrolamento primário suficiente para fazer circular a corrente nominal do enrolamento secundário, desde que este esteja fechado em curto-circuito.

O valor da impedância percentual varia entre 3 e 9% e vem marcado na placa dos transformadores com os símbolos  $Z\%$   $UK\%$  ou  $V_{\text{cc}}\%$ .

Este valor é calculado com a seguinte fórmula:

$$Z\% = \frac{V_{\text{cc}}}{U_{\text{np}}} \cdot 100$$

### Exemplo

Cálculo da impedância percentual de um transformador com as seguintes características:

- tensão nominal do primário ( $U_{\text{np}}$ ) = 500V;
- corrente nominal do secundário ( $I_{\text{ns}}$ ) = 20 A;
- tensão suficiente para fazer circular 20 A no secundário quando fechado em curto-circuito ( $V_{\text{cc}}$ ) = 30V.

$$Z\% = \frac{30}{500} \cdot 100 = 6\%$$

O valor da impedância percentual ( $Z\%$ ) é 6%.

A impedância percentual é um dado importante para o cálculo da corrente de curto circuito, cuja fórmula é:

$$I_{cc} = \frac{I_{ns}}{Z\%} \cdot 100$$

### Exemplo

Cálculo da corrente de curto-circuito do transformador do exemplo anterior.

$$I_{cc} = \frac{20}{6} \cdot 100 = 333 \text{ ou } 333 \text{ A}$$

A corrente de curto-circuito desse transformador é 333 A .

O valor da impedância percentual também é usado no dimensionamento de dispositivos de comando e proteção do equipamento e para auxiliar a ligação em paralelo entre transformadores.

Nesse tipo de ligação, a diferença entre as impedâncias dos transformadores não deve exceder a 10%.

Para valores diferentes da tensão de curto-curcuito ( $V_{cc}$ ) o transformador com tensão menor fica com a maior carga.

## 2.4 APLICAÇÃO

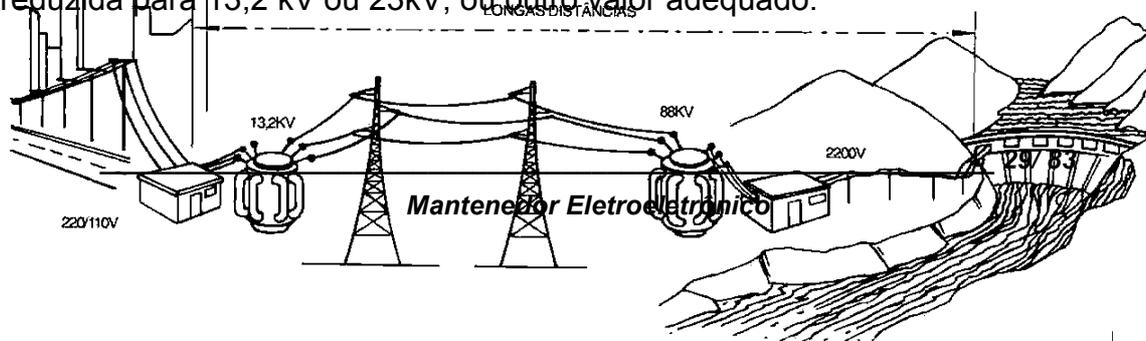
Já aprendemos que a energia elétrica em corrente alternada é a mais comumente usada, porque seus valores de tensão podem ser alterados com facilidade . Esse fato facilita bastante a geração, a transmissão da energia elétrica, desde a usina geradora até os consumidores.

A transmissão de energia elétrica só é economicamente viável se realizada em altas tensões, e para obter níveis adequados de tensão são utilizados os transformadores trifásicos.

### Distribuição De Energia Elétrica

Primeiramente, através de transformadores, a tensão é elevada a 88 KV. Então, ela é transportada por meio de linhas de transmissão até uma subestação central.

Nessa subestação, com o auxílio de transformadores, a tensão é de novo reduzida para 13,2 kV ou 23kV, ou outro valor adequado.



**Figura 2.10**

Consumo de energia se faz, pois, em baixa tensão. Assim, antes de ser distribuída, a tensão é reduzida outra vez nas subestações.

A distribuição em baixa tensão se processa nas tensões de 110/220V é realizada por transformadores monofásicos. Já a distribuição das tensões de 127/220V se faz por transformadores trifásicos com o secundário ligado em estrela.

### 3. MOTORES DE CA MONOFÁSICOS

Os motores de CA podem ser monofásicos ou polifásicos. Estudaremos os motores monofásicos alimentados por uma única fase de CA.

Para melhor entender o funcionamento desse tipo de motor, você deverá ter bons conhecimentos sobre os princípios de magnetismo e eletromagnetismo, indução eletromagnética e corrente alternada.

Os motores monofásicos possuem apenas um conjunto de bobinas, e sua alimentação é feita por uma única fase de CA. Dessa forma, eles absorvem energia elétrica de uma rede monofásica e transformam-na em energia mecânica.

Os motores monofásicos são empregados para cargas que necessitam de motores de pequena potência como, por exemplo, motores para ventiladores, geladeiras, furadeiras portáteis etc.

De acordo com o funcionamento, os motores monofásicos podem ser classificados em dois tipos: universal e de indução.

#### 3.1 MOTORES DO TIPO UNIVERSAL

Podem funcionar tanto em CC como em CA; daí a origem de seu nome.

O motor universal é o único motor monofásico cujas bobinas do estator são ligadas eletricamente ao rotor por meio de dois contatos deslizantes (escovas). Esses dois contatos, por sua vez, ligam em série o estator e o rotor.

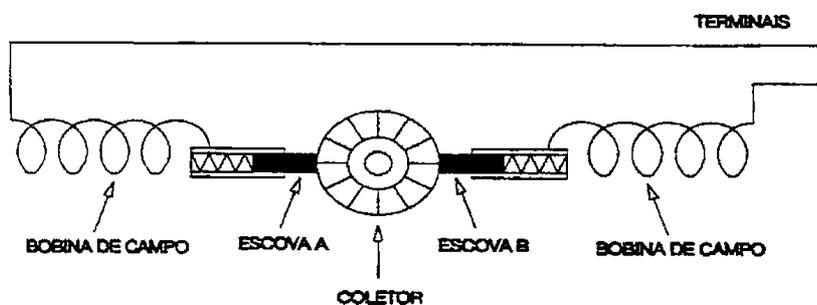


Figura 3.1 – Esquema elétrico do motor universal

*Observação:* É possível inverter o sentido do movimento de rotação desse tipo de motor, invertendo-se apenas as ligações das escovas, ou seja, a bobina ligada à escova A deverá ser ligada à escova B e vice-versa.

Os motores universais apresentam conjugado de partida elevado e tendência a disparar, mas permitem variar a velocidade quando o valor da tensão de alimentação varia. Sua potência não ultrapassa a 500W ou 0,75cv e permite velocidade de 1500 a 15000rpm.

Esse tipo de motor é o motor de CA mais empregado e está presente em máquinas de costura, liquidificadores, enceradeiras e outros eletrodomésticos, e também em máquinas portáteis, como furadeiras, lixadeiras e serras.

### Funcionamento dos Motores Tipo Universal

A construção e o princípio de funcionamento do motor universal são iguais ao do motor em série de CC. Quando o motor universal é alimentado por corrente alternada, a variação do sentido da corrente provoca variação no campo, tanto do rotor quanto do estator. Dessa forma, o conjugado continua a girar no mesmo sentido inicial, não havendo inversão do sentido da rotação.

## 3.2 MOTORES MONOFÁSICOS DE INDUÇÃO

Possuem um único enrolamento no estator. Esse enrolamento gera um campo magnético que se alterna juntamente com as alternâncias da corrente. Neste caso, o movimento provocado não é rotativo.

### Funcionamento dos Motores Monofásicos de Indução

Quando o rotor estiver parado, o campo magnético do estator, ao se expandir e se contrair, induz correntes no rotor.

O campo gerado no rotor é de polaridade oposta à do estator. Assim, a oposição dos campos exerce um conjugado nas partes superior e inferior do rotor, o que tenderia a girá-lo 180° de sua posição original. Como o conjugado é igual em ambas as direções, pois as forças são exercidas pelo centro do rotor e em sentidos contrários, o rotor continua parado.

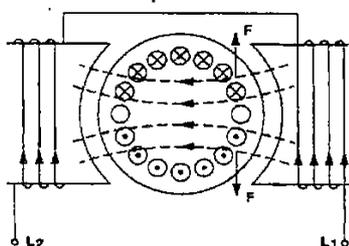


Figura 3.2 – Campo magnético com o rotor parado

Se o rotor estiver girando, ele continuará o giro na direção inicial, já que o conjugado será ajudado pela inércia do rotor e pela indução de seu campo magnético. Como o rotor está girando, a defasagem entre os campos magnéticos do rotor e do estator não será mais que 180°.

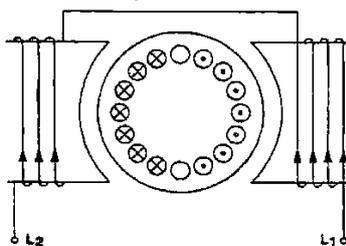


Figura 3.3 – Campo magnético com o rotor girando

São dois os tipos de motores de indução: o motor de campo distorcido e o motor monofásico de fase auxiliar. Para dar o giro inicial do rotor, são usados comumente dois tipos de partida:

### 3.2.1 MOTOR DE CAMPO DISTORCIDO

Constitui-se por um rotor do tipo gaiola de esquilo e por um estator semelhante ao do motor universal. Contudo, no motor de campo distorcido, existe na sapata polar uma ranhura onde fica alojado um anel de cobre ou espira em curto-circuito. Por isso, este motor é conhecido também como motor de anel ou de espira em curto-circuito.

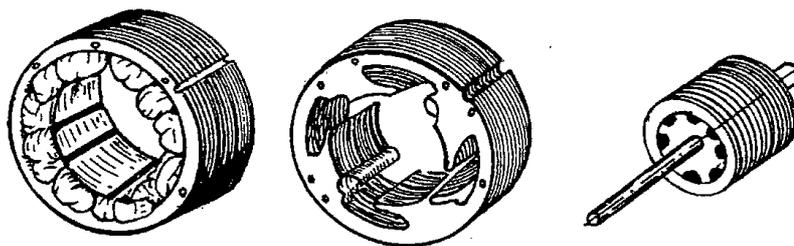


Figura 3.4 – Motor de indução de campo distorcido

Uma vez que, no motor de campo distorcido, o rotor é do tipo gaiola de esquilo, todas as ligações encontram-se no estator.

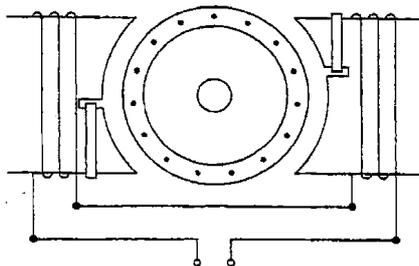


Figura 3.5 – Rotor tipo gaiola de esquilo

Esse tipo de motor não é reversível. Sua potência máxima é de 300W ou 0,5cv; a velocidade é constante numa faixa de 900 a 3400rpm, de acordo com a frequência da rede e o número de pólos do motor.

Esses motores são usados, por exemplo, em ventiladores, toca-discos, secadores de cabelo etc.

### Funcionamento dos Motores de Campo distorcido

Quando o campo magnético do estator começa a aumentar (a partir de zero) as linhas de força cortam o anel em curto. A corrente induzida no anel gera um campo magnético que tende a se opor ao campo principal.

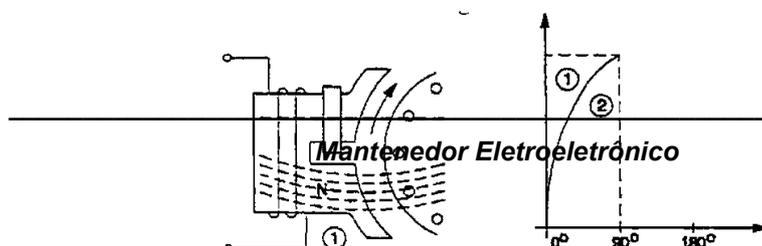


Figura 3.6 – Estator do motor de campo distorcido com campo magnético acima de zero

Com o aumento gradativo do campo até  $90^\circ$ , a maior parte das linhas de força fica concentrada fora da região do anel. Quando o campo atinge o máximo, ou seja, os  $90^\circ$ , não há campo criado pela bobina auxiliar, formada pelo anel, e ele se distribui na superfície da peça polar.

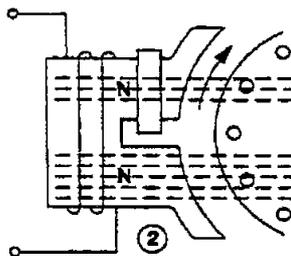


Figura 3.7 – Estator do motor de campo distorcidos com campo no nível máximo

De  $90^\circ$  a  $180^\circ$  o campo vai se contraindo, e o campo da bobina auxiliar tende a se opor a essa contração, concentrando as linhas de força na região da bobina auxiliar.

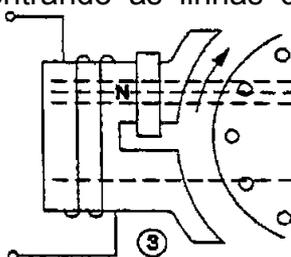


Figura 3.8 – Contração do campo da bobina auxiliar

De  $0^\circ$  a  $180^\circ$  o campo se movimenta ao longo da superfície polar, definindo assim o sentido de rotação.

De  $180^\circ$  a  $360^\circ$  o campo varia do mesmo modo que de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , porém em direção oposta.

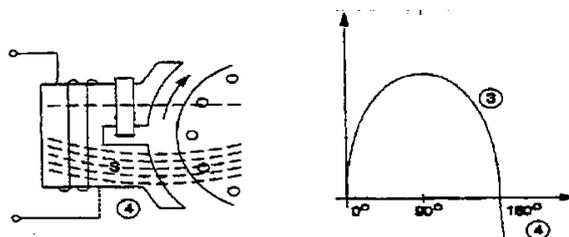


Figura 3.9 – Definição do sentido de rotação

O movimento do campo produz um conjugado fraco, mas suficiente para dar partida ao motor. Como o conjugado é pequeno, esse tipo de motor é usado para alimentar cargas leves.

### 3.2.2 MOTOR MONOFÁSICO DE FASE AUXILIAR

É o de mais larga aplicação. Sua construção mecânica é igual à dos motores trifásicos de indução.

Assim, no estator há dois enrolamentos: um de fio mais grosso e com grande número de espiras (enrolamento principal ou de trabalho), e outro de fio mais fino e com poucas espiras (enrolamento auxiliar ou de partida).

O enrolamento principal fica ligado durante todo o tempo de funcionamento do motor, mas o enrolamento auxiliar só atua durante a partida. Esse enrolamento é desligado ao ser acionado um dispositivo automático localizado parte na tampa do motor e parte no rotor.

Geralmente, um capacitor é ligado em série com o enrolamento auxiliar, melhorando, desse modo, o conjugado de partida do motor.

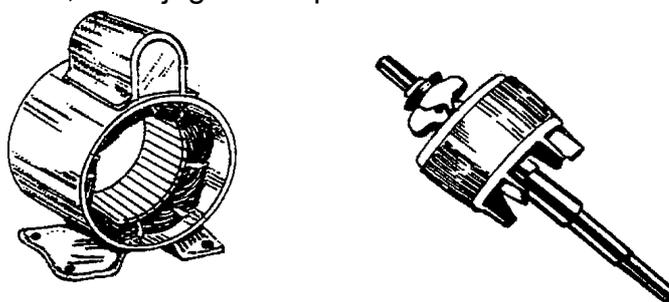


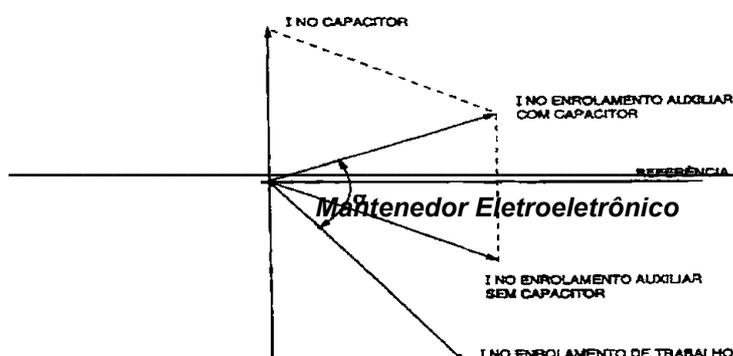
Figura 3.10 – Enrolamento auxiliar

### Funcionamento dos Motores de Fase Auxiliar

O motor monofásico de fase auxiliar funciona em função da diferença entre as indutâncias dos dois enrolamentos, uma vez que o número de espiras e a bitola dos condutores do enrolamento principal são diferentes em relação ao enrolamento auxiliar.

As correntes que circulam nesses enrolamentos são defasadas entre si. Devido à maior indutância no enrolamento de trabalho (principal), a corrente que circula por ele se atrasa em relação à que circula no enrolamento de partida (auxiliar), cuja indutância é menor.

O capacitor colocado em série com o enrolamento tem a função de acentuar ainda mais esse efeito e aumentar o conjugado de partida. Isso aumenta a defasagem, aproximando-a de  $90^\circ$  e facilitando a partida do motor.



**Figura 3.11 – Defasagem quando é colocado um capacitor em série com o enrolamento**

Depois da partida, ou seja, quando o motor atinge aproximadamente 80% de sua rotação nominal, o interruptor automático se abre e desliga o enrolamento de partida. O motor, porém, continua funcionando normalmente.

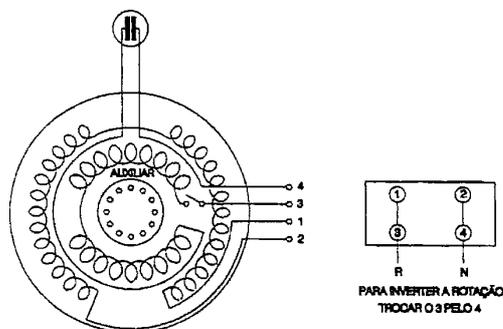
Os motores monofásicos de fase auxiliar podem ser construídos com dois, quatro ou seis terminais de saída.

Os motores de dois terminais funcionam em uma tensão (110 ou 220V) e em um sentido de rotação.

Os de quatro terminais são construídos para uma tensão (110 ou 220V) e dois sentidos de rotação, os quais são determinados conforme a ligação efetuada entre o enrolamento principal e o auxiliar.

De modo geral, os terminais do enrolamento principal são designados pelos números 1 e 2 e os do auxiliar, por 3 e 4.

Para inverter o sentido de rotação, é necessário inverter o sentido da corrente no enrolamento auxiliar, isto é, trocar o 3 pelo 4.



**Figura 3.12 – Inversão da rotação dos motores de 4 terminais**

Os motores de seis terminais são construídos para duas tensões (110 e 220V) e para dois sentidos de rotação.

Para a inversão do sentido de rotação, inverte-se o sentido da corrente no enrolamento auxiliar.

O enrolamento principal é designado pelos números 1, 2, 3 e 4 e o auxiliar por 5 e 6. Para a inversão do sentido de rotação, troca-se o terminal 5 pelo 6.

As bobinas do enrolamento principal são ligadas em paralelo, quando a tensão é de 110V e, em série, quando a tensão é de 220V.

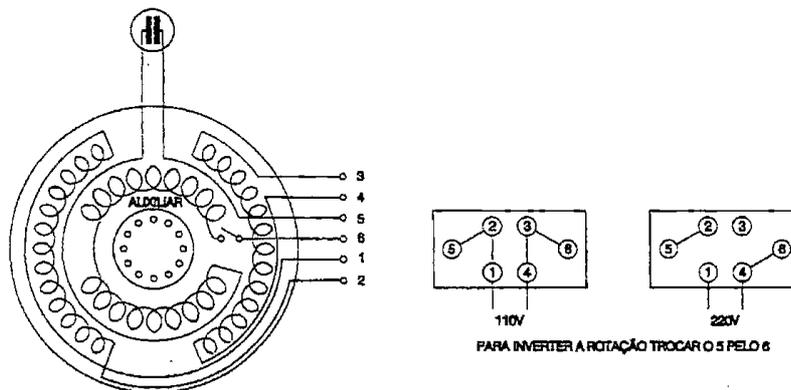


Figura 3.13 – Inversão de rotação dos motores de 6 terminais

O motor de fase auxiliar admite reversibilidade quando retiram-se os terminais do enrolamento auxiliar para fora com cabos de ligação. Admite também chave de reversão, mas nesse caso, a reversão só é possível com o motor parado.

A potência desse motor varia de 1/6cv até 1cv, mas para trabalhos especiais existem motores de maior potência.

A velocidade desse tipo de motor é constante e, de acordo com a frequência e o número de pólos, pode variar de 1425 a 3515rpm.

## 4. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (MIT)

Dentre os motores existentes, o de indução é o mais utilizado, devido ao seu aspecto construtivo, velocidade praticamente constante, custo, e pelo fato de ser ligado a uma corrente alternada, entre outros aspectos.

O motor de indução difere fundamentalmente dos outros tipos de motores, sobretudo pelo fato de não existir nenhuma alimentação externa ao rotor. As tensões e correntes necessárias ali são produzidas por indução, podendo ser o monofásico, que não será tema principal deste trabalho, e o trifásico (motor de indução trifásico – MIT).

#### 4.1 CONSTRUÇÃO

O MIT é composto, basicamente, por duas partes:

- rotor;
- estator.

##### Rotor

O rotor é constituído de um eixo que transmite a energia mecânica desenvolvida; tem um “pacote” de chapas magnéticas (núcleo), cujo objetivo é melhorar a permeabilidade magnética do meio com pequenas perdas por histerese e Foucault. O enrolamento pode ser bobinado ou do tipo “gaiola de esquilo”.

O rotor bobinado é constituído de um enrolamento trifásico, fechado internamente em estrela, sendo os três terminais ligados externamente em série com uma resistência trifásica ou curto-circuitada.

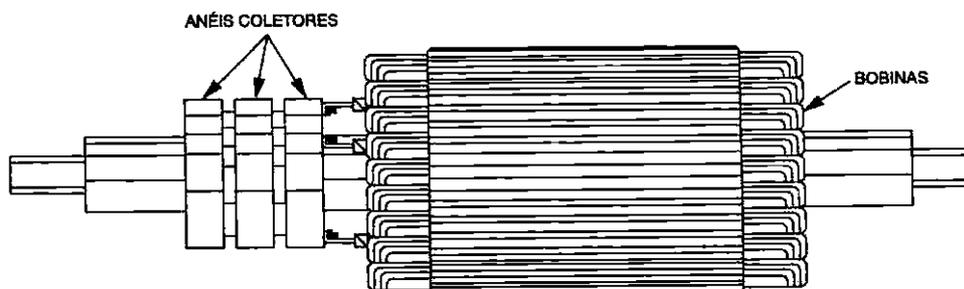


Figura 4.2 – Rotor bobinado

No rotor gaiola de esquilo os condutores de cobre ou alumínio, em forma de barras, estão curto-circuitados em cada terminal por anéis contínuos. Daí o nome “gaiola de esquilo”. Essas barras condutoras não são paralelas ao eixo do rotor; são deslocadas ou colocadas segundo um pequeno ângulo em relação a ele, para produzir um torque mais uniforme e reduzir o “zumbido” magnético durante a operação do motor. Os condutores não precisam ser isolados do núcleo, porque as correntes induzidas seguem o caminho de uma resistência, os condutores de alumínio.

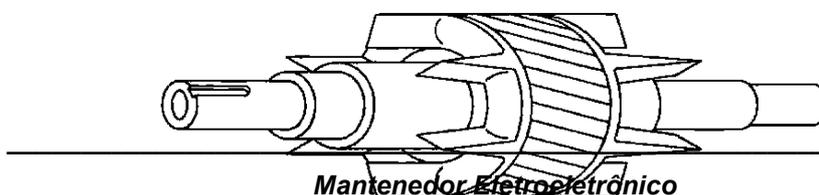


Figura 4.3 – Rotor gaiola de esquilo

**Estator**

O estator é formado por uma carcaça, que é a estrutura suporte de todo o conjunto normalmente construída de ferro fundido. Internamente existe o núcleo, que é um “pacote” de chapas magnéticas com a mesma função do núcleo do rotor, ou seja, concentrar as linhas de indução criadas pelo condutores ligados à corrente alternada. Nas ranhuras do núcleo do estator existe o enrolamento trifásico, constituído de três bobinas ou três conjuntos de bobinas de cobre ou alumínio, defasadas geometricamente de 120°.

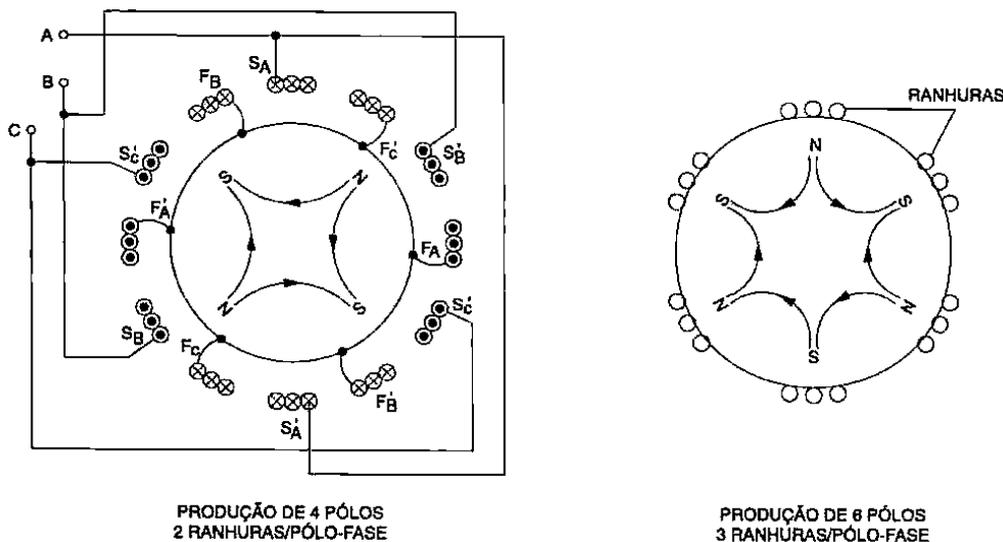


Figura 4.4

Estas bobinas interagem, produzindo um campo magnético girante, que só é possível graças à construção do estator (as bobinas estão defasadas de 120° geométricos), e por serem alimentados por correntes alternadas trifásicas, cujas fases estão defasadas entre si de 120° elétricos.

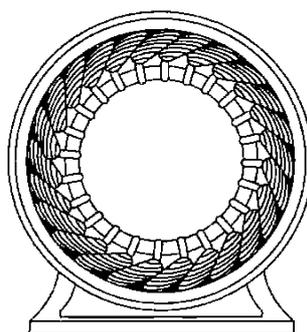


Figura 4.5 - Estator de um MIT

**Campo Magnético Girante**

O campo magnético gerado por uma bobina depende da intensidade da corrente que passa por ela. Como as correntes estão defasadas de  $120^\circ$  elétricos, e como variam tanto de intensidade quanto de sentido, em função do tempo, daí serem alternadas, os campos magnéticos que produzem têm as mesmas características.

Os três campos magnéticos combinam-se em um único, cuja posição varia de acordo com o tempo, para agirem sobre o rotor.

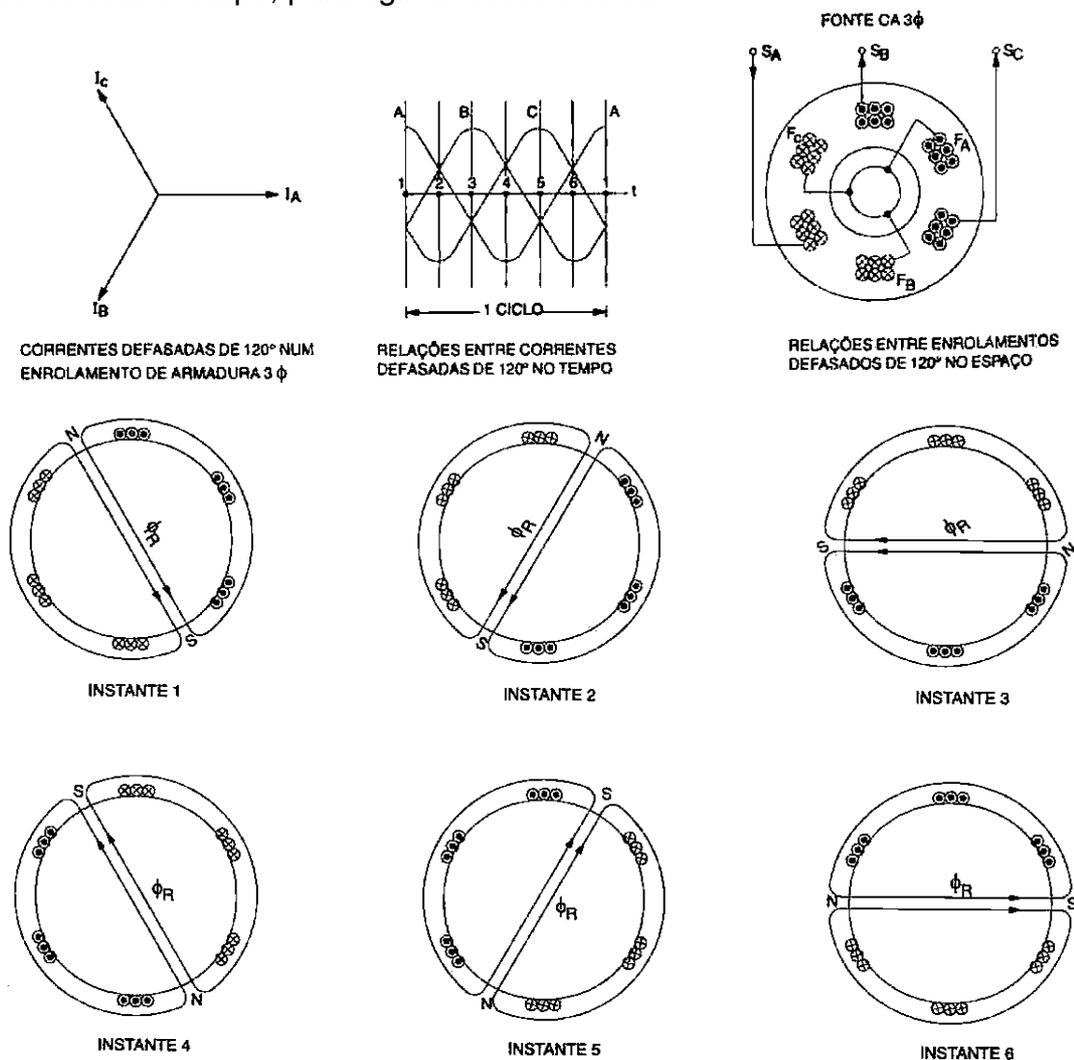
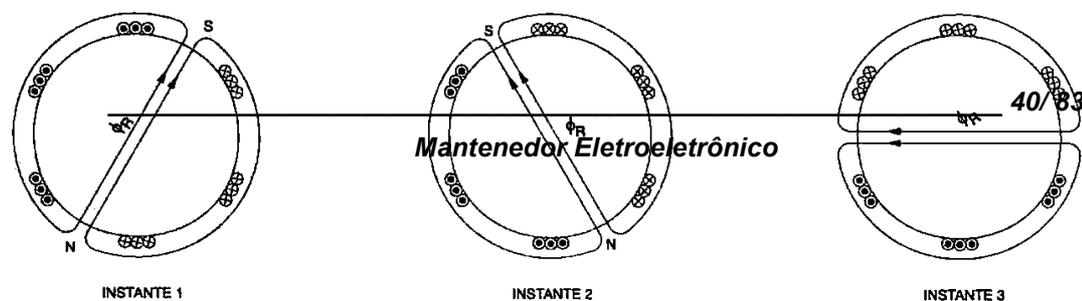


Figura 4.6 - Formas de onda das correntes alternadas que vão gerar os campos magnéticos, defasados de  $120^\circ$ , alimentando os enrolamentos do estator

Essas bobinas interagem, produzindo um campo magnético girante. Isso só acontece graças à construção do estator, e por estar alimentado por uma corrente alternada trifásica, cujas fases estão defasadas entre si de  $120^\circ$  elétricos.

O campo magnético girante produzido no estator estabeleceu o sentido horário de acordo com a ligação dos terminais na rede ABC. Se quaisquer dos terminais da linha que alimenta o estator forem invertidos, ocorrerá uma inversão no campo magnético girante, o que ocasionará a inversão do motor.



**Figura 4.7 - Novo sentido do campo magnético girante, após a inversão das fases A e C, por exemplo, no estator do motor**

A velocidade do campo magnético girante varia diretamente com a frequência, ou seja, o campo girante está em sincronismo com a frequência da rede. Daí a ser chamada de velocidade síncrona, que pode ser deduzida da seguinte forma:

$$N_{S(\text{rps})} = \frac{F}{P} \Rightarrow N_{S(\text{rpm})} = \frac{60F}{p} \Rightarrow N_{S(\text{rpm})} = \frac{60 \cdot 2 \cdot F}{p} \Rightarrow N_{S(\text{rpm})} = \frac{120 \cdot F}{p}$$

onde: **Ns** é a velocidade síncrona;

**rps** são as rotações por segundo;

**rpm** são as rotações por minuto;

**F** é a frequência da rede, em Hz;

**P** são os pares de pólo do motor;

**p** são os números de pólos do motor  $p = \frac{P}{2}$ .

## 4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Ao circular uma corrente alternada nos enrolamentos do estator, surge um campo magnético girante. As linhas de indução deste campo magnético “cortam” os condutores do rotor, induzindo neles, uma d.d.p. Devido ao circuito estar fechado, surge uma corrente; esta corrente, induzida, gera um campo magnético em volta dos condutores, que tende a acompanhar, ou se alinhar, com o campo girante produzido pelo estator. Como o campo magnético do estator “gira” à velocidade síncrona, o campo do rotor não consegue acompanhá-lo. Portanto, o campo magnético do rotor segue o campo do estator, mas sempre atrasado em relação a ele.

De acordo com a lei de Lenz, qualquer corrente induzida tende a se opor às variações do campo que a produziu. No caso do motor de indução, a variação é a rotação do campo magnético no rotor, que é oposto ao do estator. Esta é a razão pela qual o rotor acompanha o estator tão próximo o permitam o seu peso e a sua carga.

Se a velocidade do estator e do rotor fossem iguais, não haveria movimento relativo entre eles e, em consequência, não haveria f.e.m induzida no rotor; não

existindo tensão induzida não existiria torque agindo no rotor. A velocidade do rotor deve ser inferior à do campo magnético girante, para existir movimento relativo entre os dois.

Assim, o rotor deve “escorregar” em velocidade a fim de produzir o torque . Por isto há uma diferença de velocidades produzidas entre a velocidade síncrona do campo girante e a do rotor, denominada velocidade de escorregamento ou deslize. Pode ser expressa como uma porcentagem da velocidade síncrona, ou como número decimal para o caso dos motores.

Então, o escorregamento ou deslize pode ser expresso da seguinte forma:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \cdot 100$$

ou simplesmente:

$$N_r = N_s \cdot (1 - S)$$

onde: **S** é o escorregamento;

**N<sub>s</sub>** é a velocidade síncrona do campo magnético girante, em rpm;

**N<sub>r</sub>** é a velocidade do rotor.

Então, o motor de indução ou motor assíncrono é assim chamado devido ao seu princípio de funcionamento, baseado na indução eletromagnética. Por isso, a velocidade do rotor não é igual à velocidade do campo magnético girante.

### 4.3 LIGAÇÃO DE MOTORES

O motor de indução, ou melhor, o estator do MIT, pode ser ligado a uma, duas ou quatro tensões diferentes, padronizadas por norma.

A ligação de motores nestas várias tensões não é mais que combinações de conexão dos terminais do estator, possibilitando sua ligação em estrela ou triângulo.

É exatamente o número de terminais (ou pontas) do estator que determina quantas são as tensões de ligação: o motor de três terminais só poderá ser ligado em uma tensão; o motor de seis e nove terminais poderá ser ligado em duas tensões; e o motor de 12 terminais poderá ser ligado em quatro tensões, porém uma das ligações não é mais usual, pois as concessionárias de energia elétrica não mais distribuem tensões superiores a 500V.

No entanto, independente do número de terminais e da tensão aplicada aos terminais do motor, por meio da combinação desejada, a bobina só trabalha com uma tensão, a tensão de triângulo. As figuras a seguir apresentam as ligações dos motores trifásicos de seis e de 12 terminais.

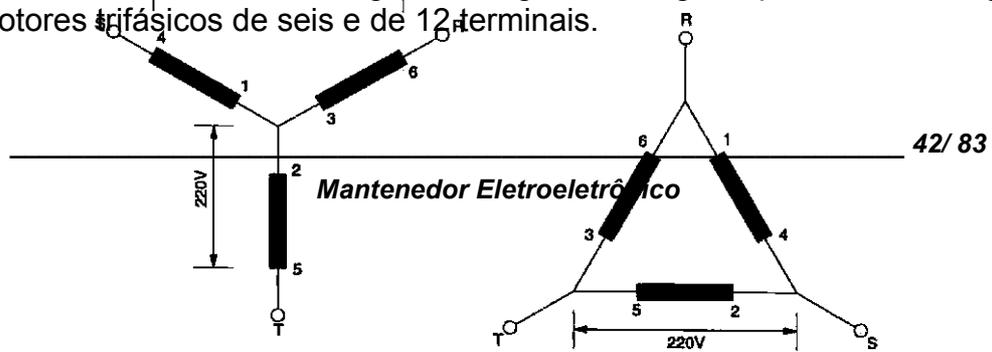


Figura 4.8 – Ligação de motores de seis terminais

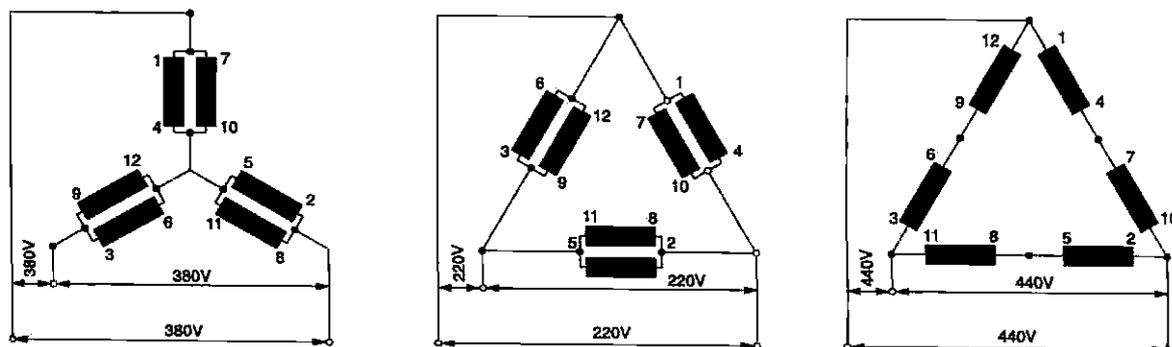


Figura 4.9 – Ligação de motores trifásicos de 12 terminais

## 4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE TORQUE

### Fatores que Afetam o Torque de um MIT

De acordo com o princípio de funcionamento do MIT, verifica-se que o rotor é arrastado pelo campo magnético girante.

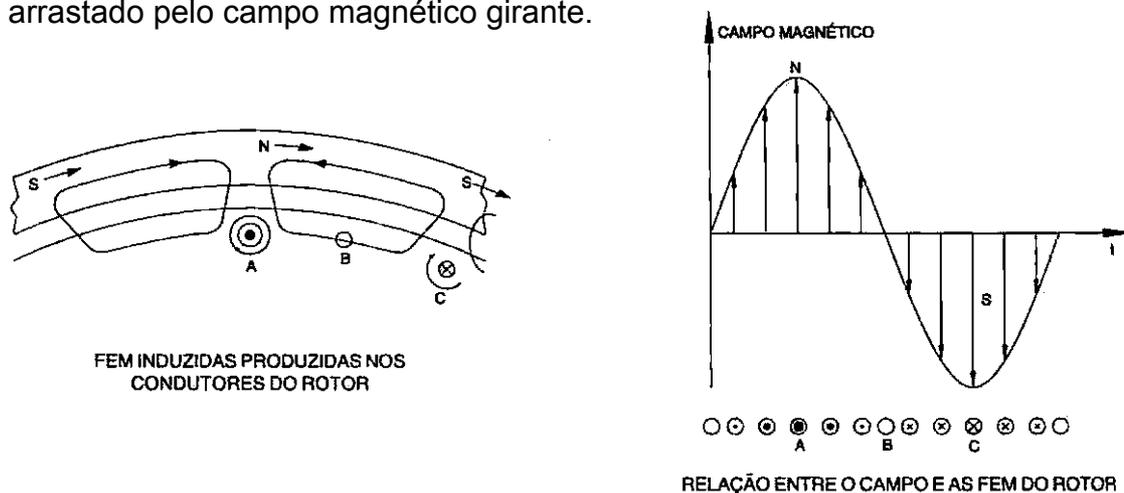


Figura 4.10 - Interações dos condutores do rotor com o campo magnético do estator

Observação:  $\odot$  Corrente saindo do plano da página.  
 $\otimes$  Corrente entrando no plano da página.

Para analisar esta figura, deve-se imaginar que o rotor esteja travado e o campo magnético do estator girando no sentido horário.

Observa-se que os campos magnéticos produzidos no enrolamento primário (estator) induzem nos condutores do rotor uma corrente elétrica, responsável por um campo magnético que interage, produzindo uma atração dos campos, ou seja, uma tendência do rotor girar no mesmo sentido do campo magnético girante.

Aplicando a regra da mão esquerda no condutor A, por exemplo, observa-se o condutor desenvolvendo forças eletromagnéticas no mesmo sentido da rotação do campo. De forma semelhante, o condutor C tem o mesmo comportamento. Destas forças resulta o torque. O condutor B, neste instante, não possui f.e.m. induzida porque não está submetido à variação do fluxo.

Todos os condutores entre os A e B têm correntes induzidas de intensidade variáveis; e a f.e.m. induzida variará senoidalmente, de acordo com a intensidade do fluxo. De acordo com estas informações, conclui-se que o número de pólos desenvolvidos no estator é igual ao número de pólos opostos no rotor.

Na condição de bloqueio, a frequência da f.e.m. induzida do rotor é igual à frequência do campo magnético girante, da mesma forma que, se o rotor atingisse a velocidade do campo magnético girante, não haveria f.e.m. induzida e a frequência seria zero. De acordo com esta afirmativa, a frequência das tensões no rotor varia inversamente com a velocidade, e o escorregamento varia da mesma forma.

A frequência do rotor pode ser expressa como uma função da frequência do estator e do escorregamento, ou seja:

$$F_R = S \cdot F_S$$

onde:  $F_R$  é a frequência de uma determinada f.e.m. induzida no rotor;  
 $S$  é o escorregamento do motor;  
 $F_S$  é a frequência da rede.

A resistência dos condutores do rotor é muito baixa, devido à grande seção transversal e ao pequeno comprimento das barras. Mas como estão alojados no núcleo do rotor, eles possuem a propriedade da indutância e, conseqüentemente, da reatância indutiva. A indutância  $L_R$  das barras do rotor é um valor fixo, mas a reatância indutiva  $X_R$  variará com a frequência do rotor. A reatância do rotor é uma grandeza determinada a partir do ensaio a rotor bloqueado, quando usa-se esta reatância como um padrão de referência.

Como a reatância do rotor do motor de indução é máxima, quando este estiver travado, pois  $X_R = 2\pi \cdot F_S \cdot L$  e à medida que aumenta a rotação a reatância diminui, pode-se concluir que a reatância do rotor para qualquer frequência é:

$$X_R = S \cdot X_{bl}$$

onde:  $X_R$  é a reatância do rotor;  
 $S$  é escorregamento ou deslize;  
 $X_{bl}$  é a reatância do rotor bloqueado (máxima).

Pode-se observar que a reatância a rotor bloqueado é uma referência que vai do máximo a rotor bloqueado e varia de acordo com a rotação.

A tensão induzida no rotor também varia de acordo com o escorregamento, de tal forma que, se o rotor estiver girando a velocidade síncrona, a f.e.m. é mínima. Então, a tensão no rotor será:

$$E_R = S \cdot E_{bl}$$

onde:  $E_R$  é a f.e.m. induzida no rotor;

$S$  é o deslize ou escorregamento;

$E_{bl}$  é a f.e.m. induzida a rotor bloqueado (máximo quando o rotor estiver travado).

### Conclusão

A tensão induzida, reatância e frequência do rotor variam em função do escorregamento, ou seja, variam do valor máximo quando bloqueado a zero quando a velocidade do rotor for igual à velocidade do campo girante.

### Torque do Mit Rotor Gaiola de Esquilo

O torque desenvolvido pelos condutores do rotor, independente da velocidade, pode ser expresso em função do fluxo magnético e da corrente que produz o fluxo no estator e no rotor da seguinte forma:

$$T = K \cdot \phi \cdot I_R \cdot \cos \theta_R$$

onde:  $T$  é o torque desenvolvido (N . m) ou (Kgf m);

$\phi$  é o fluxo resultante produzido pelas tensões de excitação de campo do estator e o rotor;

$I_R \cdot \cos \theta_R$  surge devido à corrente do rotor não estar em fase com a tensão induzida e o fluxo do campo magnético girante.

### Torque de Partida

Para a definição do toque de partida de um MIT, deve-se analisá-lo considerando seus parâmetros com o rotor bloqueado.

De acordo com as equações estudadas anteriormente, de tensão, frequência e reatância, deduzem-se outras como:

$$Z_{bl} = R_R + j \cdot X_{bl} \Rightarrow |Z_{bl}| = \sqrt{R_R^2 + X_{bl}^2}$$

onde:  $Z_{bl}$  é a impedância a rotor bloqueado;

$|Z_{bl}|$  representa o módulo de  $Z_{bl}$ ;

$R_R + j \cdot X_{bl}$  é a soma da resistência do rotor com a reatância a rotor; bloqueado em quadratura.

O fator de potência a rotor bloqueado será:

$$\cos \theta_R = \frac{R_R}{Z_{bl}}$$

E o módulo da corrente do rotor pode ser definido por:

$$I_{bl} = \frac{E_{bl}}{Z_{bl}} = \frac{E_{bl}}{R_R + j \cdot X_{bl}} = \frac{E_{bl}}{\sqrt{R_R^2 + X_{bl}^2}}$$

Então, substituindo estes termos na equação do torque, tem-se o torque de partida do MIT:

$$T_p = K \cdot \phi \cdot \frac{E_{bl}}{\sqrt{R_R^2 + X_{bl}^2}} \times \frac{R_R}{\sqrt{R_R^2 + X_{bl}^2}} = \frac{K \cdot \phi \cdot E_{bl} \cdot R_R}{R_R^2 + X_{bl}^2}$$

Como já foi dito, esta análise do torque de partida é a partir do rotor travado, e as tensões são induzidas nos condutores por ação transformadora.

A tensão  $E_{bl}$  é proporcional ao fluxo  $\phi$ , que por sua vez é proporcional à tensão do barramento que alimenta o estator. Como a tensão que alimenta o estator é definida como  $V_{f'}$ , tem-se:

$$T_p = \frac{K \cdot V_{f'}^2 \cdot R_R}{R_R^2 + X_{bl}^2}$$

Uma vez que a resistência  $R_R$  e a reatância a rotor bloqueado  $X_{bl}$  são constantes para uma determinada tensão aplicada, pode-se concluir que:

$$\text{Se } K' = \frac{K \cdot R_R}{R_R^2 + X_{bl}^2} \text{ então } T_p = K' \cdot V_{f'}^2$$

Ou seja, o torque de partida varia com o quadrado da tensão aplicada nas bobinas.

Ao reduzir a tensão nos enrolamentos do estator, desde que o motor esteja a vazio, reduzirá a corrente de primário e secundário (rotor) do motor.

Então, a teoria básica dos métodos de partida à tensão reduzida, de motores de indução trifásico, é reduzir a corrente de partida.

### Torque Máximo de um MIT

Num motor de indução de rotor gaiola de esquilo não é comum o torque de partida ser igual ao torque máximo. Por isto, é usual considerar que o torque máximo acontece a um escorregamento  $S$  diferente de 1.

Então, para qualquer escorregamento, a corrente do rotor, bem como o fator de potência, serão:

$$I_R = \frac{S \cdot E_{bl}}{\sqrt{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2}} \text{ e } \cos \theta_R = \frac{R_R}{\sqrt{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2}}$$

Substituindo estes termos na equação do torque  $T = K\phi I_R \cos \theta_R$ , tem-se:

$$T = \frac{K \cdot \phi \cdot S \cdot E_{bl}}{\sqrt{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2}} \cdot \frac{R_R}{\sqrt{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2}} \Rightarrow T = \frac{K \cdot \phi \cdot S \cdot E_{bl} \cdot R_R}{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2}$$

Como a tensão a rotor bloqueado  $E_{bl}$  é proporcional ao fluxo  $\phi$ , tem-se a equação:

$$T = \frac{K \cdot \phi^2 \cdot S \cdot R_R}{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2}$$

O torque máximo é obtido quando esta equação do torque é derivada em relação à resistência do rotor e igualada a zero, da seguinte forma:

$$\frac{dT}{dR_R} = 0$$

Utilizando a regra de cadeia, tem-se:

$$\frac{dT}{dR_R} = \frac{K \cdot \phi^2 \cdot \{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2\} - K \cdot \phi^2 \cdot R_R \cdot (2R_R)}{\{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2\}^2}$$

Fazendo  $\frac{dT}{dR_R} = 0$  para que se determine o valor máximo de  $T$ , teremos:

$$\frac{K \cdot \phi^2 \cdot \{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2\} - K \cdot \phi^2 \cdot R_R \cdot 2}{\{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2\}^2} = 0$$

$$\Rightarrow K \cdot \phi^2 \cdot \{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2 - 2R_R^2\}$$

$$\Rightarrow R_R^2 - 2R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2 = 0$$

$$\Rightarrow R_R^2 = (S \cdot X_{bl})^2$$

$$\Rightarrow R_R = S \cdot X_{bl}$$

Para o escorregamento no torque máximo dá-se o nome de  $S_{Tmáx}$ . Então, de acordo com a equação anterior:

$$R_R = S_{Tmáx} \cdot X_{bl} \Rightarrow S_{Tmáx} = \frac{R_R}{X_{bl}}$$

A equação mostra que o escorregamento ou deslize para o torque máximo  $S_{Tmáx}$  acontece quando se divide a resistência do rotor pela reatância a rotor bloqueado. Considerando novamente,  $\phi^2$  sendo proporcional a  $V_f^2$  e substituindo a equação do escorregamento a torque máximo pela equação

$$T = \frac{K \cdot \phi^2 \cdot S \cdot R_R}{R_R^2 + (S \cdot X_{bl})^2}$$

tem-se:

$$T = \frac{K \cdot V_f^2 \cdot R_R \cdot \frac{R_R}{X_{bl}}}{R_R^2 + \left( \frac{R_R}{X_{bl}} \cdot X_{bl} \right)^2} \Rightarrow T_{máx} = \frac{KV_f^2}{2X_{bl}}$$

As fórmulas do torque máximo e do escorregamento a torque máximo estabelecem que o torque máximo não depende da resistência do rotor  $R_R$ , enquanto o escorregamento a torque máximo depende. Por isto, pode-se concluir que dois motores com resistências rotóricas diferentes podem ter seus torques máximos iguais; porém, o seu escorregamento para esses conjugados é maior para o motor de maior resistência.

## 4.5 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS

Ao alimentar os terminais do motor de indução de rotor gaiola, ele desenvolverá um torque de partida que aumentará sua velocidade e decrescerá seu escorregamento. O seu torque também aumentará até aquele valor do escorregamento a torque máximo desenvolvido.

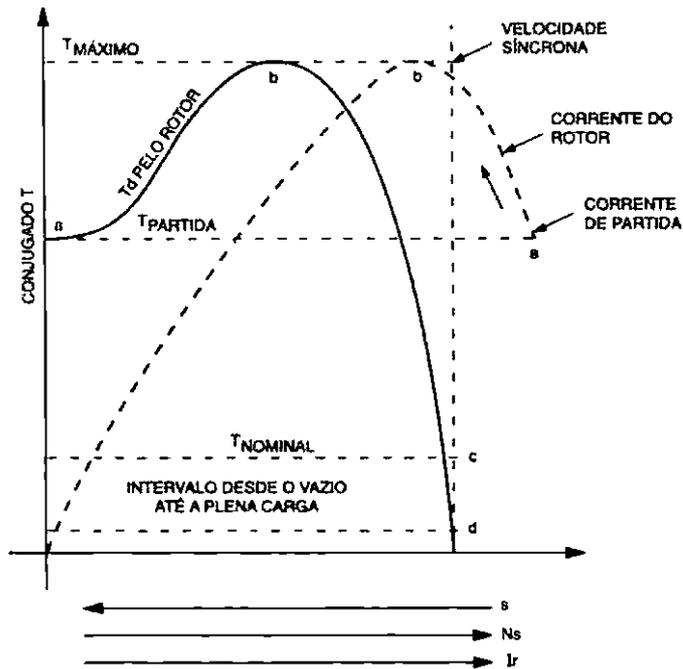


Figura 4.11

Pode-se observar que a velocidade do motor aumenta até que o valor do escorregamento seja bem pequeno, definido pelo conjugado ou torque resistente. Verifica-se que a velocidade quase não varia desde o vazio até a plena carga (corrente nominal) mostrados nos pontos c e d. Então, esta curva mostra a relação entre os torques de partida, máximo e nominal, desenvolvidos pelo motor em função da velocidade.

Observa-se, também, na figura 4.11, que a corrente no rotor, e em conseqüência a corrente no estator, assumem valores elevados.

#### 4.6 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO DE ROTOR BOBINADO

A construção do MIT de rotor bobinado difere do MIT de rotor gaiola, basicamente, no rotor, que é formado de um enrolamento trifásico conectado normalmente em estrela. Este enrolamento trifásico, devido ao seu fechamento interno, possui três terminais que são conectados aos anéis coletores existentes no eixo do rotor e que, através de contatos deslizantes (escovas), permitem ligações a resistores externos em série com o seu circuito.

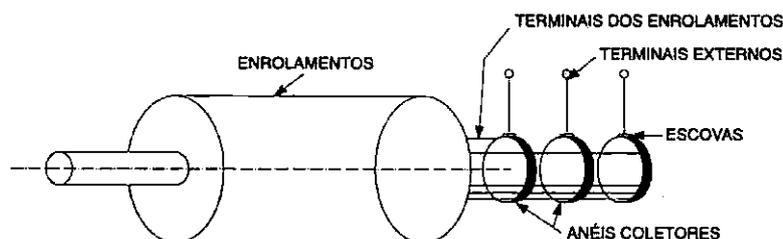


Figura 4.12 – Rotor bobinado de um MIT

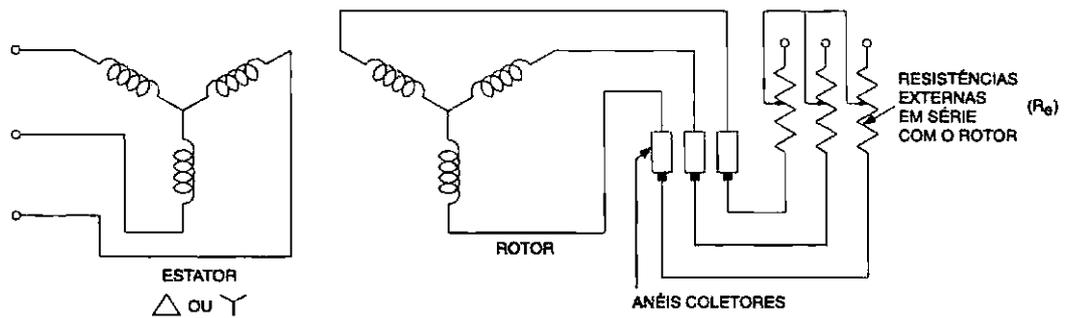


Figura 4.13 – Enrolamentos internos e externos de um MIT rotor bobinado

### Características Operacionais e de Funcionamento

Ao ligar o estator do MIT de rotor bobinado à rede trifásica, cria-se um campo magnético girante, que vai induzir no rotor bobinado um campo magnético, cuja tendência será acompanhar o campo do estator.

Como se percebe, o princípio de funcionamento é o mesmo do rotor gaiola. A diferença está na possibilidade de partir este motor com resistores acoplados em série com o rotor, com o objetivo de aumentar o torque de partida, diminuir sua rotação e sua corrente de partida.

O torque de partida deste motor será alterado com a variação de resistência em série com o rotor. De acordo com a equação do torque de partida, estudado anteriormente, tem-se:

$$T_P = \frac{K \cdot V^2 \cdot R_R}{R_R^2 + X_{bl}^2}$$

Ao adicionar uma resistência externa  $R_e$  à resistência do rotor  $R_R$ , o novo torque de partida e o fator de potência serão:

$$T_P = \frac{K \cdot V^2 \cdot (R_R + R_e)}{(R_R + R_e)^2 + X_{bl}^2} \quad \cos \theta = \frac{R_R + R_e}{\sqrt{(R_R + R_e)^2 + (S \cdot X_{bl})^2}}$$

Desse modo, se houver variação de resistência do rotor, as conseqüências serão as variações do fator de potência e do torque de partida. Porém, o torque de partida irá aumentar com o aumento de resistência em série até o limite do torque máximo; a partir daí o torque de partida irá diminuir, não mais compensando inserir resistores em série com o motor.

Na prática, é usual partir o MIT de rotor bobinado com resistores fixos em série com ele, e, através de contatores ou outras chaves, reduzir o valor dos resistores até o curto-circuito, ou seja, até ficar com o rotor bobinado curto-circuitado com apenas a resistência  $R_R$ .

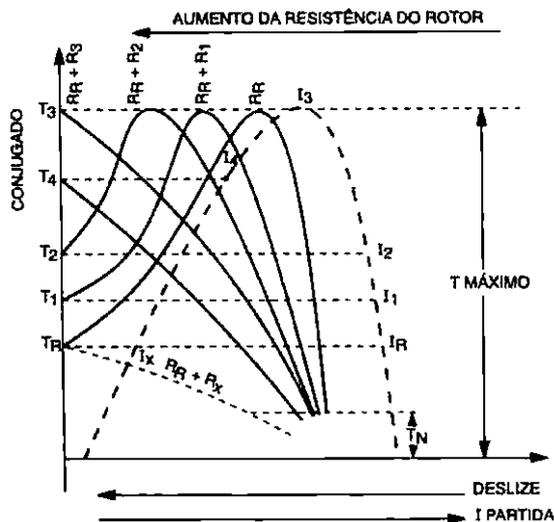


Figura 4.14

## 4.7 DIMENSIONAMENTO DE CIRCUITOS TERMINAIS, RAMAIS E ALIMENTADORES

O dimensionamento elétrico de circuitos de uma instalação elétrica deve levar em consideração as condições atuais necessárias à operação dos equipamentos e a previsão de expansão futura .

Em primeira análise, objetiva a determinação da seção dos condutores de fase e de neutro que constituem os circuitos terminais, bem como as características dos equipamentos de proteção e manobra.

Os elementos necessários para a especificação são:

- Diagrama unifilar;
- Tabela de cargas do circuito;
- A tabela de capacidade de corrente dos condutores;
- Tabelas de fator de correção para eletrodutos;
- Tabela de quedas de tensão em função da carga;
- Tabela de características gerais dos dispositivos de proteção.

A partir dos dados fornecidos é possível preparar o esboço de dimensionamento e daí reavaliar alguns aspectos como, quantidade de condutores, e redistribuição de cargas.

Dois critérios iniciais básicos devem ser obedecidos :

- Capacidade de corrente;
- Queda de tensão admissível.

Estes dois critérios estão contemplados em disposições de normas e em características técnicas dos materiais que os fabricantes garantem.

Em sistemas trifásicos, a corrente nominal de motores elétricos é estabelecida através de dados de placa, ou pela fórmula :

$$I = \frac{P ( CV ) \times 736}{\sqrt{3} \times V_n \times \cos(\varphi) \times \eta} \quad \text{ou} \quad I = \frac{P ( HP ) \times 746}{\sqrt{3} \times V_n \times \cos(\varphi) \times \eta}$$

onde : **P** é a potência mecânica nominal do motor em CV ou em HP;

**V<sub>n</sub>** é a tensão nominal de operação do motor;

**cos(φ)** é o fator de potência do motor a plena carga;

**η** é o rendimento do motor.

Conhecendo-se então a corrente do circuito, deve-se determinar a seção adequada dos condutores elétricos através da escolha do cabo em função da corrente suportável e da queda de tensão admissível.

Analogamente aos circuitos terminais, o dimensionamento do alimentador principal, leva em consideração a carga a ser atendida, os fatores de utilização das mesmas, e de simultaneidade, que envolvem a demanda de energia da instalação elétrica, o fator de potência e níveis de curto circuito.

Além dos alimentadores e dos circuitos terminais apresentarem suficiente capacidade de corrente para atender a sua carga, o suprimento deve ser feito respeitando-se limites adequados de tensão estabelecidos por normas.

O cálculo da queda de tensão ( $\Delta V$ ) num trecho de um circuito bifásico, por exemplo, pode ser previsto de modo aproximado pela fórmula :

$$\Delta V = I \times ( 2L ) \times ( R \times \cos(\varphi) + X \times \sin(\varphi) )$$

onde: **I** é a corrente passante no trecho considerado;

**L** é o comprimento do trecho no circuito;

**R** é a resistência do condutor por unidade de comprimento;

**X** é a reatância do condutor por unidade de comprimento;

**cos(φ)** é o fator de potência da carga a ser alimentada.

Devem ser também previstos os dispositivos de proteção elétrica de cada circuito terminal e dos alimentadores principais de modo que níveis de corrente que possam causar danos aos condutores sejam interrompidos em períodos adequados.

Há basicamente duas condições que devem provocar a atuação dos dispositivos de proteção: sobrecargas e curto-circuitos.

Os dispositivos de proteção são constituídos de fusíveis, relés térmicos, disjuntores termomagnéticos possuindo sua corrente nominal  $I_n$ , corrente que

assegura sua efetiva operação ( $I_2$ ) durante sobre cargas ou curto-circuitos, tempo de atuação do dispositivo ( $t$ ) quando ocorrem sobre cargas ou curto-circuitos.

Para se estabelecer os pontos de operação da proteção contra curto-circuito de disjuntores e fusíveis, deve-se levar em consideração 3 pontos que devem ser lançados nas curvas características de tempo inverso ( $i_{xt}$ ), a partir dos dados do equipamento a proteger.

No caso de motores, deve-se calcular a corrente de partida do mesmo ( $I_p$ ) a partir da letra código ou pela fórmula:

$$I_p = k \times I_n$$

onde  $k$  é lido do dado de placa  $I_p/I_n$

Os outros dados a serem computados são o tempo necessário para o motor atingir sua velocidade nominal, e o tempo máximo que o motor suporta com rotor bloqueado (travado).

Estes pontos devem ser lançados nas curvas dos fusíveis e/ou disjuntores e representaram o limite máximo ( \* ) em que a vida do equipamento será seriamente comprometida se a proteção falhar.

O dispositivo de proteção a ser escolhido então será aquele cuja curva é a imediatamente abaixo em valor deste ponto.

### Exemplo

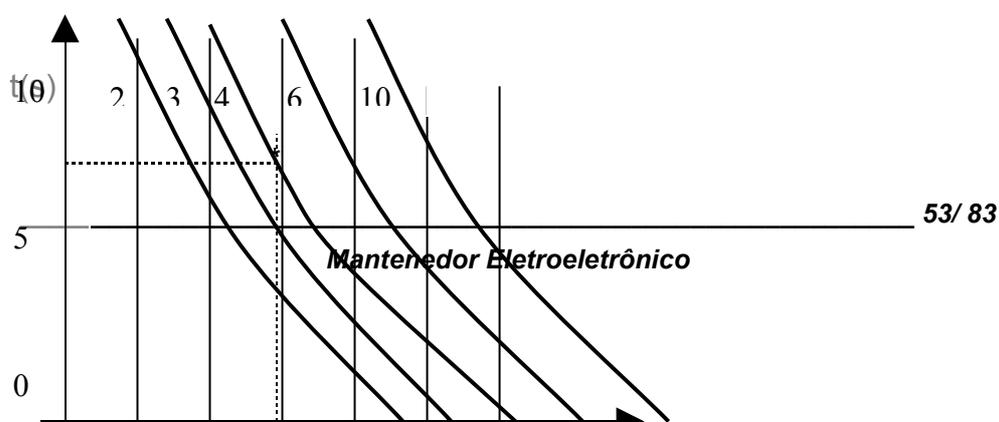
Motor ligado em estrela,  $P=1CV$ ,  $V_n=220V$ ,  $f=60Hz$ ,  $I_p/I_n = 5$ ,  $\cos(\varphi) = 0,8$ ,  $\eta = 82\%$ ,  $t_{max}$  rotor bloqueado = 8 s, tempo médio de partida 2 s.

$$I_n = \frac{1 \times 736 \text{ W}}{1,73 \times 220 \times 0,8 \times 0,82} = 2,95 \text{ A}$$

Como a corrente de linha é a mesma de fase, pois o motor está ligado em estrela, a corrente de partida será:

$$I_p = 5 \times 2,95 \text{ A} = 14,75 \text{ A}$$

A partir daí então este ponto e os de tempo são levados à curva do dispositivo de proteção por exemplo fusível diazed conforme o esboço abaixo:



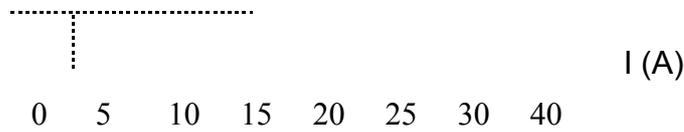


Figura 4.15

O fusível a ser escolhido para operar o motor acima deve ser o de 4 A , pois é o primeiro dispositivo cuja curva passa abaixo do ponto limite.

Em geral, na prática adota-se um calculo rápido para se saber a dimensão do dispositivo de proteção através da corrente  $I_n$  :

$I_d = K' \times I_n$  , onde  $K'$  é um valor entre 1,25 e 1,5 .

Para o motor acima seria  $I_d = 1,25 \times 2,95 = 3,68$  A e o padrão será 4A.

## 5. MOTOR DE INDUÇÃO - ROTOR DE DUPLA GAIOLA

Em resposta à grande demanda de um motor de construção simples, que pudesse arrancar diretamente ligado à linha e que não produzisse objetáveis flutuações na tensão daquela, desenvolveu-se o rotor de dupla gaiola.

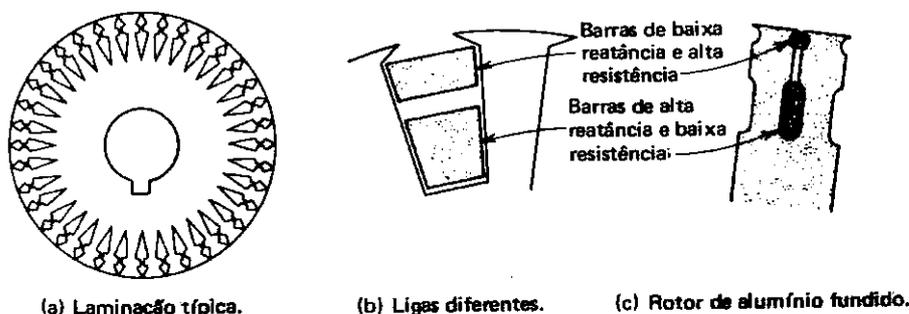


Figura 5.1 – Construção dupla gaiola do rotor

O rotor de dupla gaiola foi desenhado para que se conseguisse um melhor motor de indução de partida direta da linha. Na figura, observamos um rotor fundido correspondente a um motor de grande capacidade, no qual são usados dois conjuntos de barras do rotor de diferentes ligas, tendo seções transversais de mesma área ou de áreas diferentes. A barra de cima é construída de uma liga de cobre de alta resistência e a barra de baixo pode ser de alumínio fundido ou de uma liga de cobre de baixa resistência. As barras de cima estão próximas do campo magnético girante e estão engastadas em ferro, de maneira que, quando por elas circula a corrente, sua auto-indutância e sua reatância de dispersão são pequenas. As barras de baixo são engastadas profundamente nas ranhuras e estão separadas do ferro do estator por um grande entreferro magnético, produzindo uma elevada auto-indutância e uma grande reatância de dispersão.

Na partida, portanto, quando a frequência do rotor é grande e igual à da linha, a impedância do enrolamento de baixo é muito maior que a do enrolamento de cima. A maior parte da corrente do rotor é induzida, portanto, no enrolamento de cima, que é projetado de tal maneira que sua alta resistência iguale sua reatância durante a partida, desenvolvendo-se o torque máximo.

Conforme o motor acelera, entretanto, a frequência do rotor decresce e a impedância do enrolamento mais baixo ou mais interno também decresce, fazendo com que mais e mais corrente seja induzida nele. Para pequenos valores de escorregamento, portanto, quando o motor está na sua gama de funcionamento normal de plena carga, a maior parte da corrente circula pelo enrolamento de baixo de baixa resistência, levando a um alto rendimento (baixas perdas no cobre) e a uma boa regulação de velocidade (escorregamento proporcional à resistência).

## 6. MOTORES DE MÚLTIPLAS VELOCIDADES

São motores elétricos construídos para duas, três ou até quatro velocidades diferentes.

Esses motores podem ser:

- motor de dois enrolamentos para duas velocidades;
- motor de um enrolamento para duas velocidades.

### 6.1 MOTORES DE DOIS ENROLAMENTOS

Esse motor possui dois enrolamentos distintos, no mesmo estator. Por essa razão, apresenta também duas velocidades. É como se fossem dois motores em um.

Normalmente, os motores de dois enrolamentos são fabricados na relação de velocidade, ou de número de pólos na relação 1: 1,5, como por exemplo:

- motor para 6 e 4 pólos = 1.200/1.800rpm;
- motor para 12 e 8 pólos = 600/900rpm.

Há casos em que são fabricados na relação 1:2, porém em apenas situações especiais, pois esta relação é conseguida nos motores de 1 enrolamento, os motores Dahlander.

Os terminais de dois enrolamentos são apresentados de forma distinta. Cada enrolamento pode ter, por exemplo, seis terminais, e neste caso pode ser ligado nas tensões de estrela ou triângulo.

Uma precaução é necessária neste tipo de motor: sempre que se fecha um dos enrolamentos e o liga à rede, o outro deverá ficar aberto e isolado; caso contrário haverá tensão induzida no enrolamento ( mesmo efeito que acontece no transformador e acarretará, acidentalmente, circulação de corrente pelo enrolamento ).

### 6.2 MOTOR DAHLANDER

Possui um enrolamento especial, que poderá receber dois fechamentos distintos, denominados fechamentos Dahlander. Esse motor atende a situações que exigem duas velocidades, desde que seja uma o dobro da outra.

A ligação interna é feita em triângulo e seis terminais (pontas) são colocados na caixa de ligações. Apesar do número de terminais, esse motor poderá ser ligado em uma única tensão. Porém, possibilitam dois tipos de fechamentos:

- fechamento para baixa velocidade;
- fechamento para alta velocidade.

Em baixa velocidade, o fechamento é chamado de triângulo, isto é, o próprio fechamento triângulo, que é feito internamente no motor. Já para alta velocidade, o fechamento é a dupla estrela (YY).

Uma observação muito importante para os motores de múltiplas velocidades é que a potência varia de acordo com a velocidade, de tal forma que maior velocidade significa maior potência.

## 7. MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO

O motor síncrono é constituído por um estator, ligado à rede de CA e um rotor, alimentado por c.c. no estator forma-se um campo girante, o qual arrasta em seu movimento o rotor, em virtude de nele se ter formado um campo magnético pela passagem da c.c. em seus enrolamentos como se vê na figura dada a seguir.

O motor síncrono trifásico tem um estator semelhante ao estator de um motor de indução trifásico: a diferença fundamental é que o rotor é equipado com pólos salientes, que são excitados em geral por c.c.

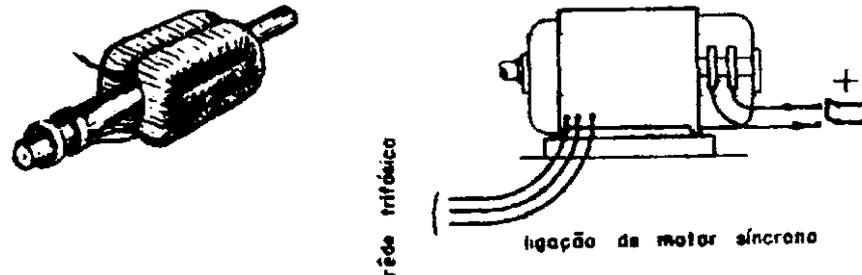


Figura 7.1

A velocidade com que gira o rotor é a mesma do campo e é expressa pela fórmula  $n = \frac{120 \times f}{p}$ .

onde: **f** é a frequência da rede elétrica;

**P** é a número de pólos;

**n** é a velocidade angular, em RPM.

O motor síncrono tem velocidade constante sob qualquer condição de carga. Outra característica importante do motor síncrono é que, para uma determinada potência, a corrente absorvida pelo motor depende da corrente de excitação, sendo esta dependência representada pelo gráfico.

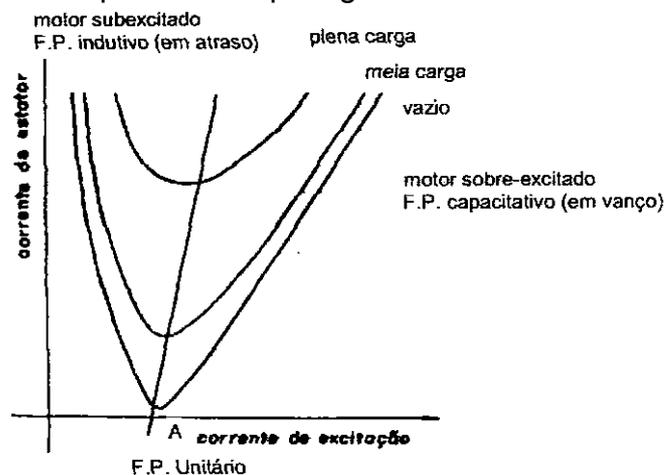


Figura 7.2

Estas curvas são chamadas curvas V. Como sabemos:

$$P = E \times I \times \cos \varphi$$

$$P = C^{te}$$

$$E = C^{te}$$

Apenas os valores de  $I$  e de  $\cos \varphi$  variam. Quando  $i_e$  é baixo  $I$  é grande e o  $\cos \varphi$  tem valor baixo, sendo a corrente atrasada da tensão. Quando se aumenta  $i_e$ , o valor de  $I$  diminui e cresce o valor de  $\cos \varphi$ , até que no ponto A,  $I$  passa por um mínimo e o  $\cos \varphi$  por um máximo. Isto é,  $\cos \varphi = 1$ ; a corrente está em fase com a tensão.

Aumentando-se ainda mais o valor de  $i_e$ , a corrente aumenta e adianta da tensão, diminuindo o  $\cos \varphi$ ; portanto o motor síncrono pode funcionar com qualquer fator de potência, sendo por isso, empregado para correção do  $\cos \varphi$ . (f . p)

Entretanto, o motor síncrono não tem arranque próprio, devendo-se empregar dispositivos especiais para iniciar o movimento.

Vários são os métodos empregados para a partida dos motores síncronos, entre os quais podem citar-se os seguintes:

- o emprego de um motor auxiliar ;
- fazendo-o funcionar inicialmente como motor de indução.

Além da desvantagem do arranque, o motor síncrono necessita de uma fonte de C.C. para excitar o campo; em virtude disso, os motores síncronos têm seu emprego restrito quase que exclusivamente à melhoria do fator de potência de uma instalação ou sistema de C. A .

## 8. MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

O motor CC é uma máquina que, ligada a uma tensão e corrente contínua, transforma a energia elétrica em energia mecânica e energia calorífica.

A construção do motor de corrente contínua é idêntica à do gerador CC.

### 8.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O funcionamento do motor de corrente contínua baseia-se no princípio do eletromagnetismo, que diz:

*“Todo condutor, percorrido por uma corrente elétrica, imerso num campo magnético, está sujeito a uma força magnética”.*

No motor CC, o condutor é cada fio que compõe a armadura. Todos os fios estarão alimentados por uma corrente contínua e imersos num campo magnético. O campo magnético pode ser produzido pelas bobinas de campo.

Cada condutor que constitui a armadura sofre uma força de intensidade:

$$F_m = B.I.l.\text{sen } \theta.$$

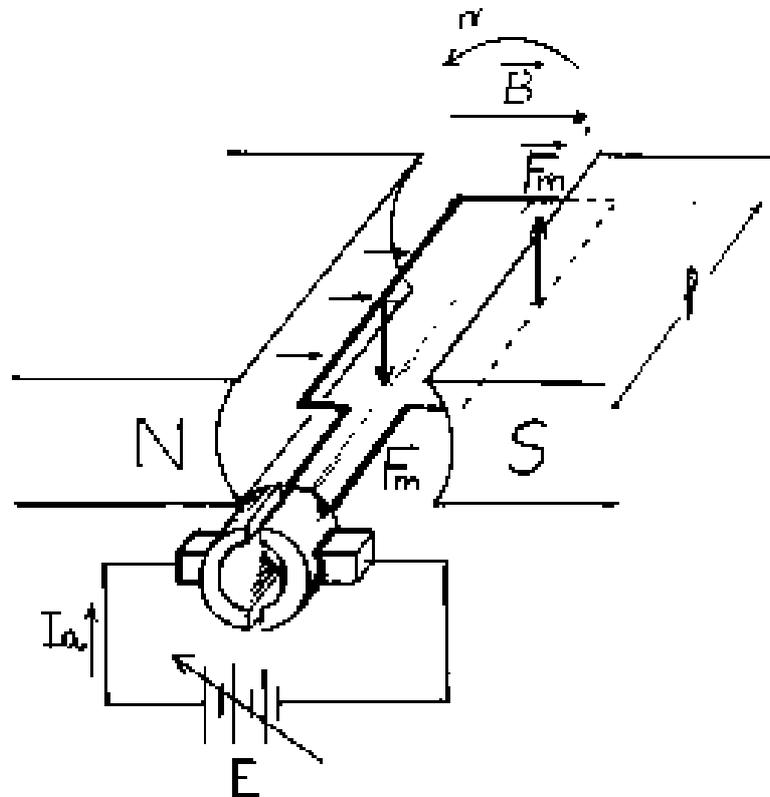


Figura 8.1 - O motor elementar, constituído de uma espira e um par de pólos

O sentido das forças, nos dois condutores, é determinado pela regra da mão esquerda, na qual os dedos indicadores, médio e polegar devem estar perpendiculares entre si, indicando: sentido do campo magnético, sentido da corrente na armadura e sentido do movimento, respectivamente.

Sob ação de cada uma dessas forças, a espira tende a se movimentar. Pode-se observar que as forças que surgem em toda a sua extensão útil produzem um conjugado ou torque, que é demonstrado por meio de sua equação fundamental:

$$T = K \cdot \phi \cdot I_a$$

onde: **T** é o torque ou conjugado;

**K** constante da máquina, refere-se à sua construção;

$\phi$  fluxo produzido pelo enrolamento do campo;

$I_a$  corrente de armadura.

### Comutação

O anel comutador desempenha papel muito importante no funcionamento do motor. Ele faz com que a corrente, na armadura, seja invertida no momento em que cessa a força magnética que o fez deslocar. Isto é, quando um condutor percorrido por uma corrente elétrica estiver dentro de um campo magnético, de acordo com a regra de Fleming da mão esquerda, ele irá se deslocar. O deslocamento do condutor, naquele sentido, será de  $180^\circ$ , conforme a figura a seguir. Após  $180^\circ$  a corrente será invertida neste condutor, o que fará com que ele se desloque novamente em sentido oposto, e a partir daí há uma seqüência de deslocamentos estabelecendo a rotação de motor.

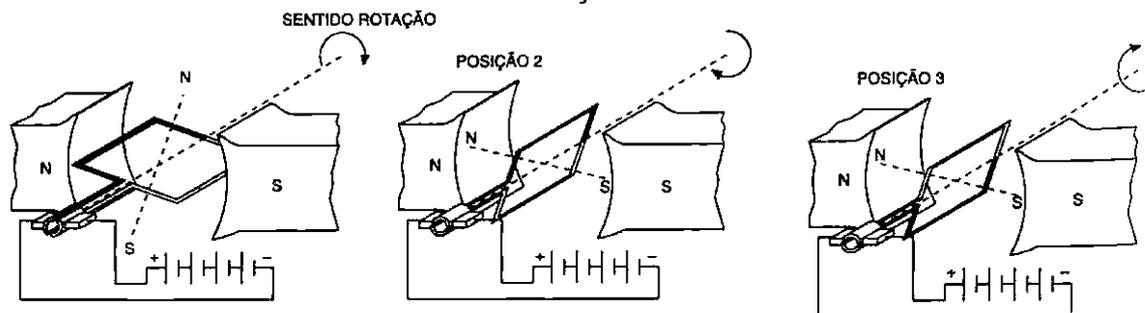
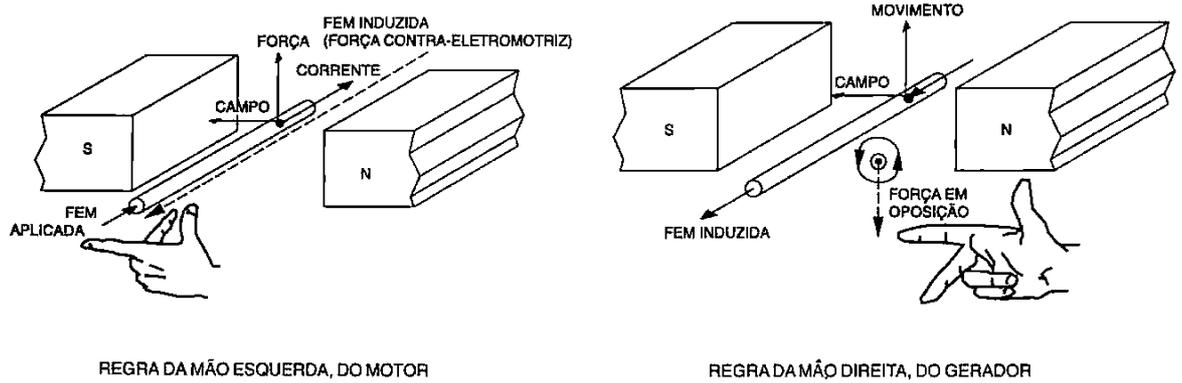


Figura 8.2

### Força Contra-Eletromotriz

A interação entre o fluxo magnético do campo principal e o fluxo magnético criado pela corrente, na armadura, faz surgir um conjunto de forças nos condutores do motor, originando o torque ou conjugado motor, que faz o motor girar.

O torque desenvolvido nos condutores faz com que o rotor se movimente dentro do campo magnético, resultando uma variação de fluxo concatenado em volta destes condutores, induzindo assim uma f.e.m. nos condutores do motor.



**Figura 8.3 - Sentido da f.e.m. induzida comprovado pela regra da mão direita para os mesmos sentidos do campo e movimento.**

Pode-se observar também, na figura, que a f.e.m. induzida no condutor opõe-se à corrente que criou a força ou movimento. Assim, esta f.e.m. induzida é chamada de força contra-eletromotriz. Nota-se que o desenvolvimento desta força contra-eletromotriz, representada como linha pontilhada na figura 8.3, é uma aplicação da Lei de Lenz.

Assim, quando quer que ocorra a ação motora, uma ação geradora é simultaneamente desenvolvida.

### Ação Motora x Ação Geradora

Se toda vez que ocorre a ação motora também se estabelece a ação geradora, pode-se questionar a possível ocorrência do caso inverso.

Na figura seguinte temos:

- $I_a$  é a corrente da armadura;
- $R_a$  é a resistência da armadura;
- $E_c$  é a força contra-eletromotriz;
- $V_{a(\text{motor})}$  é a tensão aplicada ao motor;
- $V_{a(\text{gerada})}$  é a tensão na saída do gerador;
- $E_g$  é a força eletromotriz gerada.

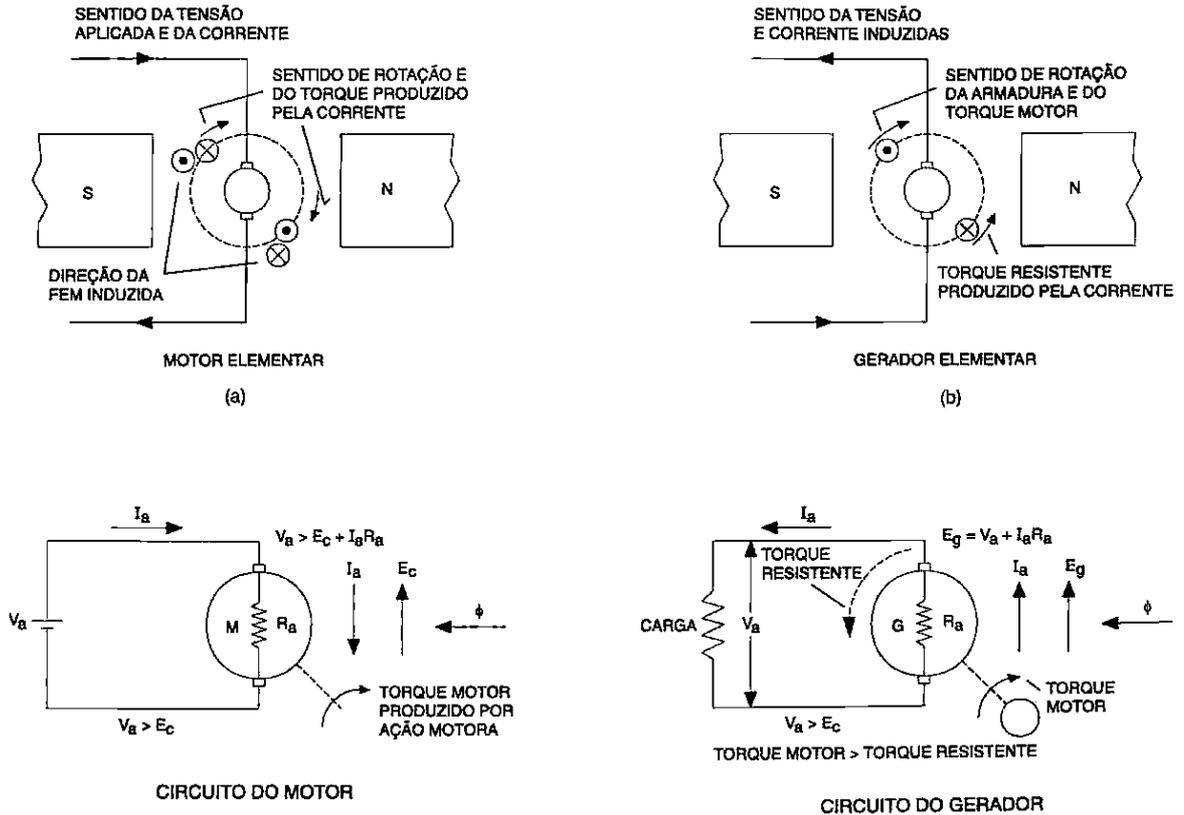


Figura 8.4 - Comparação do motor e do gerador elementar para o mesmo sentido de rotação e circuitos elétricos de cada um.

Esta figura é muito importante para a compreensão da conversão de energia.

Definido o sentido da corrente aplicada, a ação motora que resulta, produz uma força que gira os condutores da f.e.m. induzida; é também mostrado como oposto ao da tensão aplicada, conforme as figuras 8.4 a e 8.4c. Pode-se observar que, para que a corrente produza uma rotação no sentido horário e tenha o sentido mostrado na figura, é necessário que a tensão aplicada nos terminais da armadura  $V_a$  seja maior que a força contra-eletromotriz induzida  $E_c$ . Conclui-se, então, que: quando uma máquina CC é operada como motor, a força contra-eletromotriz  $E_c$  é menor que a tensão nos terminais que produz a ação motora e se opõe à corrente da armadura.

De acordo com a figura 8.4b, ao colocar o gerador em movimento no sentido horário, uma f.e.m. é induzida no sentido definido na figura. Quando o gerador é ligado a uma carga, como mostra a figura 8.4 d, a corrente que circula na armadura produzirá um torque resistente, conforme as duas figuras do gerador. Observa-se que, no circuito gerador da figura 8.4d, para os mesmos sentidos de rotação da armadura e do campo magnético, o sentido de circulação da corrente é invertido. Pode-se observar, também, que o torque resistente opõe-se ao torque motor da máquina primária (que está realizando o movimento). Assim, quando uma máquina está operando como gerador, a corrente de armadura tem o mesmo sentido da f.e.m., e esta tensão gerada  $E_g$  é maior que a tensão  $V_a$ , aplicada à carga.

Esta distinção entre gerador e motor, a tensão gerada na armadura tem mesmo sentido ou se opõe à corrente da armadura, respectivamente, dá lugar às equações básicas do circuito da armadura, mostrados na figura 4.4 e resumidos a seguir:

Para um motor:

$$V_a = E_c + I_a \cdot R_a$$

Para um gerador:

$$E_g = V_a + I_a \cdot R_a$$

onde:  $V_a$  é a tensão aplicada medida nos terminais da armadura;  
 $E_c$  é a f.e.m. gerada, desenvolvida na armadura do motor;  
 $E_g$  é a f.e.m. gerada, desenvolvida na armadura do gerador;  
 $I_a \cdot R_a$  é a queda de tensão no circuito da armadura.

### Diferença Entre Gerador e Motor CC

Na tabela a seguir estão listadas as diferenças entre o gerador e o motor de CC.

GERADOR	MOTOR
Transforma energia mecânica em elétrica.	Transforma energia elétrica em mecânica
A tensão gerada $E_g$ auxilia e produz $I_a$ .	A f.e.m. ( $E_c$ ) se opõe à corrente $I_a$ e a tensão $V_a$ .
$E_g = V_a + I_a \cdot R_a \Rightarrow V_a < E_g$	$V_a = E_c + I_a \cdot R_a \Rightarrow V_a > E_c$
O torque eletromagnético se opõe à rotação	O torque eletromagnético auxilia a rotação

Tabela 8.1

### Equação Fundamental da Velocidade

A corrente de partida de um motor CC depende da tensão que se aplica na armadura e da resistência elétrica do circuito da armadura.

À medida que acontece a ação motora, surge também, devida à ação geradora, a força contra-eletromotriz, que é expressa pela equação  $E_c = K \cdot \phi \cdot N$ .

Sabe-se que a força contra-eletromotriz  $E_c$  nunca se iguala à tensão aplicada  $V_a$ , pois a  $E_c$  depende de  $V_a$ .

Então, a corrente  $I_a$  no motor será:

$$I_a = \frac{V_a - (E_c + E_v)}{R_a}$$

onde:  $E_v$  é o somatório de todas as quedas de tensão internas ao circuito da armadura;  
 $R_a$  é a resistência equivalente da armadura.\_

Sabe-se que o somatório de todas as quedas de tensão internas ao circuito da armadura é de suma importância nos cálculos de motores CC. Mas com o objetivo de simplificar e verificar os valores mais relevantes, será sucumbido  $E_v$ .

Como se sabe:

$$E_c = K \cdot \phi \cdot N$$

$$I_a = \frac{V_a - K \cdot \phi \cdot N}{R_a}$$

Então

$$N = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K \cdot \phi}$$

Pode-se concluir que, se a tensão aplicada  $V_a$  e o fluxo  $\Phi$  permanecem constantes, a velocidade  $N$  do motor varia com a corrente da armadura, isto é, com a carga aplicada ao seu eixo. Então, se a carga aumenta, a velocidade do motor diminui, o que quer dizer que, se a carga aumenta, a corrente da armadura aumenta e a velocidade do motor diminui, proporcional com o decréscimo da  $E_c$ .

## 8.2 PARTIDA DOS MOTORES CC

Ao dar a partida em motor CC, deve-se atentar ao fato de que sua armadura está inerte. Então, a força contra-eletromotriz, neste instante, é nula. Por isto o valor da corrente na armadura é:

$$I_a = \frac{V_a}{R_a}$$

O valor da resistência do circuito da armadura  $R_a$  é muito pequeno; em consequência a corrente é elevada, o que reduz a vida útil do enrolamento e causa problemas aos circuitos de proteção.

Para evitar esta corrente elevada, coloca-se em série com a armadura um resistor, chamado de reostato de partida. Este reostato torna-se dispensável, se a fonte CC ajustável ou variável, pois o objetivo é variar a tensão que alimenta a armadura, aumentando gradativamente o seu valor na partida.

O fluxo magnético também é muito importante na partida de um motor CC, pois se ele for nulo o torque também será; então, não haverá f.e.m. e a corrente aumentará até a queima do motor. Portanto, durante a partida, recomenda-se

utilizar o fluxo magnético máximo, que pode ser controlado por meio de uma outra fonte variável ou simplesmente ou por um reostato em série com o circuito de excitação, chamado de reostato de campo.

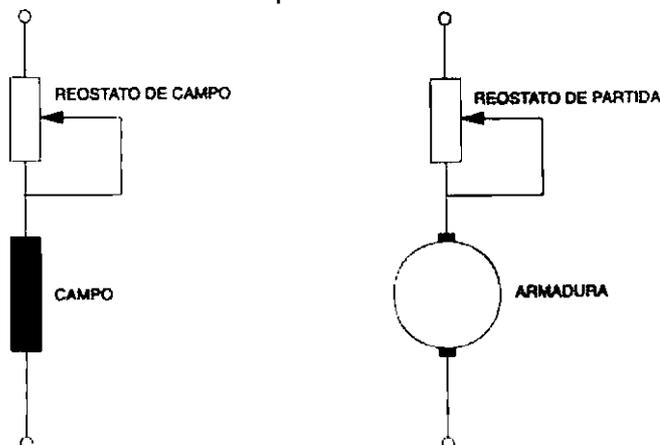


Figura 8.5 - Armadura com o reostato de partida e um enrolamento de campo ligado em série com um reostato

### 8.3 CARACTERÍSTICAS DE TORQUE DOS MOTORES CC

Para análise das características de torque dos motores CC será considerado que o motor teve sua partida realizada e possui em seus terminais, tanto de campo quanto da armadura, a tensão nominal. Será analisado, então o efeito da variação de carga sobre torques dos motores série, shunt e composto.

O estudo das características de torque e velocidade dos motores de corrente contínua tendo como objetivo apontar as grandezas responsáveis diretamente por estas características. Não é intenção usar as expressões como fórmulas diretas para calcular o torque e a velocidade dos motores CC.

#### 8.3.1 MOTOR SÉRIE

Como no motor série, o enrolamento de campo ligado em série com a armadura, conforme o diagrama de ligação a seguir.

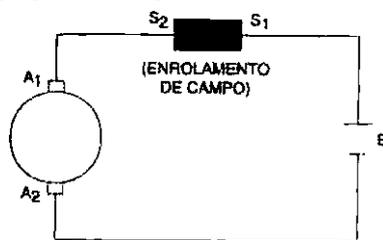


Figura 8.6 – Motor série

A corrente da armadura é responsável direta pelo fluxo magnético do enrolamento série. Quando a carga for pequena, o fluxo será menor, e quando a carga for grande, o fluxo também o será.

Na equação fundamental do torque, tem-se:

$$T = K \cdot \phi \cdot I_a$$

Como  $\phi$  é proporcional à corrente da armadura, temos:

$$\phi = K' \cdot I_a$$

Onde K representa uma constante de proporcionalidade.

Pode-se deduzir que:

$$T = K' \cdot K \cdot I_a \cdot I_a \Rightarrow T = K'' \cdot I_a^2$$

Pode-se observar que a relação entre o torque e a corrente da armadura é quadrática, desde que seja considerado o núcleo da máquina não – saturado.

### 8.3.2 MOTOR SHUNT

Na partida de um motor shunt, deve-se, em primeiro lugar, alimentar o campo para só depois alimentar a armadura, conforme o diagrama de ligação a seguir.

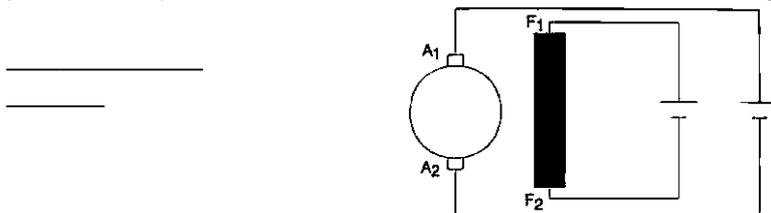


Figura 8.7 – Motor CC Shunt excitação independente

A equação fundamental do torque é:

$$T = K \cdot \phi \cdot I_a$$

Como o fluxo  $\Phi$  é constante:

$$\phi = K'$$

Pode-se deduzir que:

$$T = K \cdot K' \cdot I_a \Rightarrow T = K'' \cdot I_a$$

Pode-se observar que o torque varia diretamente com a corrente da armadura; então, o gráfico  $T \times I_a$  será uma reta.

### 8.3.3 MOTOR COMPOSTO

Como o motor composto tem os dois enrolamentos, série e shunt, o seu torque será, então, a combinação dos motores série e shunt, como mostra o diagrama a seguir:

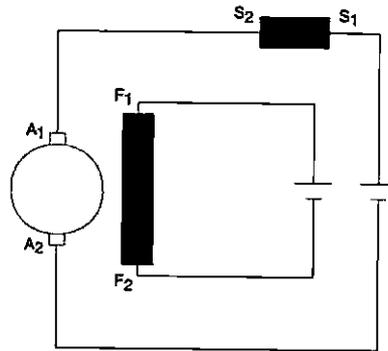


Figura 8.8 – Motor composto excitação independente

onde:  $\phi_f$  é o fluxo produzido pelo enrolamento do campo shunt;  
 $\phi_s$  é o fluxo produzido pelo enrolamento do campo série.

Então, da expressão:

$$T = K \cdot \phi \cdot I_a$$

Tem-se para o motor composto:

$$T = K \cdot (\phi_f + \phi_s) \cdot I_a$$

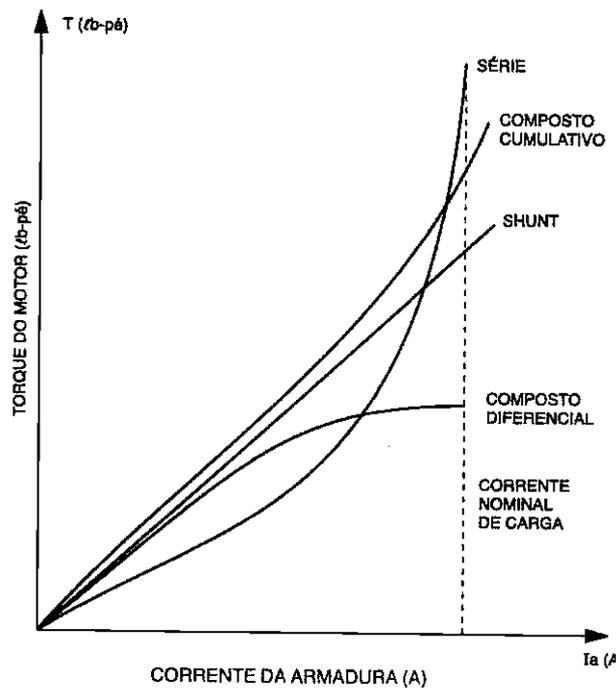


Figura 8.9 - Curvas de torque versus corrente para motores CC

## 8.4 CARACTERÍSTICAS DE VELOCIDADE DOS MOTORES CC

A análise das características de velocidade dos motores é feita de forma similar ao estudo das características do torque, ou seja, será considerado que os motores de corrente contínua já partiram e estão em funcionamento, inicialmente sem carga.

O estudo será feito por meio da equação fundamental da velocidade:

$$N = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K\phi}$$

Considerando  $K' = \frac{1}{K}$  tem-se:

$$N = \frac{K' \cdot (V_a - I_a \cdot R_a)}{\phi}$$

#### 8.4.1 MOTOR SÉRIE

Conforme o diagrama de ligação do motor série, observa-se que o fluxo produzido pelo enrolamento série é quantificado pela corrente da armadura, de tal forma que:

$$\phi \propto I_a \Rightarrow \phi = K'' \cdot I_a$$

Considerando, também, que a existência do circuito de armadura  $R_a$  foi adicionada de mais um enrolamento, tem-se:

$$N = k' \cdot \left( \frac{V_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{K'' \cdot I_a} \right)$$

Sendo

$$\frac{1}{K''} = K_a \text{ e } K_a \cdot K' = K_s', \text{ conclui-se que:}$$

$$N = K_s \cdot \left( \frac{V_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{I_a} \right)$$

De acordo com a expressão matemática, observa-se que a velocidade  $N$  varia com a carga, de forma inversa. Por isto, este motor CC é sempre operado acoplado à carga. Não pode ser ligado a vazio, pois a rotação tende a valores muito elevados. Com o aumento de carga, a velocidade diminui.

#### 8.4.2 MOTOR SHUNT

De acordo com o diagrama de ligação do motor shunt, observa-se que o fluxo produzido pela bobina de campo shunt é constante. Pela equação fundamental da velocidade  $N$ , tem-se:

$$N = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K \cdot \phi} \Rightarrow N = K' \cdot \left( \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{\phi} \right), \text{ considerando } K' = \frac{1}{K}$$

Pode-se observar que, quando aumenta a carga no eixo, a f.c.e.m. ( $V_a - I_a \cdot R_a$ ) decresce e a velocidade diminui proporcionalmente.

Comparando com o motor série e o composto, que variam sua velocidade de acordo com o numerador e o denominador da equação, conclui-se que este motor varia menos a sua velocidade que os demais; daí ser considerado motor de velocidade constante.

### 8.4.3 MOTOR COMPOSTO

Nos motores de excitação composta, o fluxo é produzido, em parte, pelo circuito de excitação shunt e o restante pelo circuito de excitação série.

A forma de ligar estes dois campos caracteriza o tipo de motor composto, que pode ser:

composto cumulativo: possuem fluxos no mesmo sentido e o fluxo resultante é obtido pela soma dos mesmos;

composto diferencial: possuem fluxos em sentido oposto e o fluxo resultante é obtido pela diferença entre eles.

Partindo da equação fundamental, a característica de velocidade do motor composto cumulativo será:

$$N = K' \cdot \left( \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{\phi} \right) \Rightarrow N = K' \cdot \left( \frac{V_a - I_a \cdot (R_a + R_s)}{\phi_s + \phi_f} \right)$$

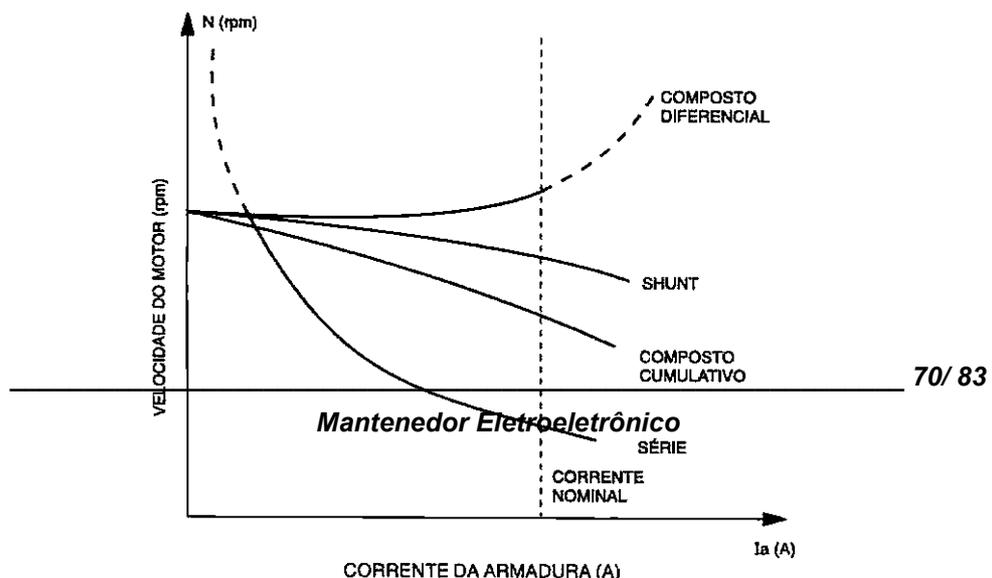


Figura 8.10 - Curvas de velocidade versus corrente para motores CC

## 8.5 POTÊNCIA MECÂNICA E RENDIMENTO DE UM MOTOR CC

De acordo com as equações anteriores, ficou comprovado que a força contra-eletromotriz é dada por :  $E_c = V_a - R_a \cdot I_a$  , não se esquecendo que  $R_a$  representa a resistência interna do circuito da armadura.

Esta f.c.e.m. varia de acordo com a tensão aplicada aos terminais da armadura a plena carga, desde 80% de  $V_a$  , para máquinas de pequena potência, a 95% de  $V_a$  , para máquinas de grande potência.

Multiplicando-se toda a equação citada por  $I_a$  , tem-se:

$$E_c \cdot I_a = V_a \cdot I_a - I_a^2 \cdot R_a$$

onde:  $E_c \cdot I_a$  representa potência mecânica desenvolvida pela armadura;

$V_a \cdot I_a$  determina a potência elétrica entregue pela rede à armadura do motor, para realizar a conversão;

$I_a^2 \cdot R_a$  é a potência elétrica transformada em calor por efeito joule, no circuito da armadura.

O rendimento de uma máquina CC é definido da mesma forma que nas outras máquinas e transformadores, ou seja, é a relação entre a potência de saída e a potência de entrada.

$$\eta(\%) = \frac{P_s}{P_e} \cdot 100 = \frac{E_c \cdot I_a}{V_a \cdot I_a} \cdot 100 = \frac{E_c}{V_a} \cdot 100$$

Pode-se concluir que, quanto maior for a força contra-eletromotriz  $E_c$  num motor, maior será o rendimento. Nas máquinas elétricas, em geral, o rendimento máximo ocorre quando há perdas fixas.

## 8.6 FORMAS DE CONTROLE DA VELOCIDADE DOS MOTORES CC

De acordo com a equação fundamental da velocidade  $N = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K \cdot \phi}$ , observa-se

que a corrente de armadura influencia, em pequena escala, a velocidade do motor; no entanto, a corrente da armadura é uma função da carga (do torque resistente) e nesta não se pode mexer para controlar a velocidade. Conclui-se, então, que a velocidade do motor CC pode ser controlada por meio de:

#### a) Controle de resistência da armadura

É feito pela variação de uma resistência externa inserida em série com o circuito da armadura; com a resistência  $R_a$ , que é baixa, o motor trabalha com rotação alta e, à medida que aumenta a resistência, a velocidade cai, podendo até parar. Apresenta o inconveniente da alta dissipação de calor no reostato de controle, pois este trabalha com a corrente nominal do motor.

#### b) Controle de tensão aplicada na armadura ( $V_a$ )

Reduzindo a tensão na armadura a zero o motor pára; à medida que aumenta a tensão, a rotação cresce proporcionalmente até atingir a velocidade-base (obtida com armadura e campo alimentados com tensão nominal);

#### c) Controle de fluxo dos pólos

A velocidade varia de maneira inversa às mudanças de fluxo. Com o fluxo pleno obtém-se a mínima rotação (velocidade base) e à medida que se reduz o fluxo, a velocidade cresce. É o método mais simples e econômico no controle de velocidade para os motores shunt e composto; já no motor série este método não é tão econômico, pois, para variar o fluxo, deve-se colocar resistor em paralelo com o enrolamento série ou com a armadura. Como os dois enrolamentos têm baixa resistência, apresentam perdas muito grandes pelo efeito Joule.

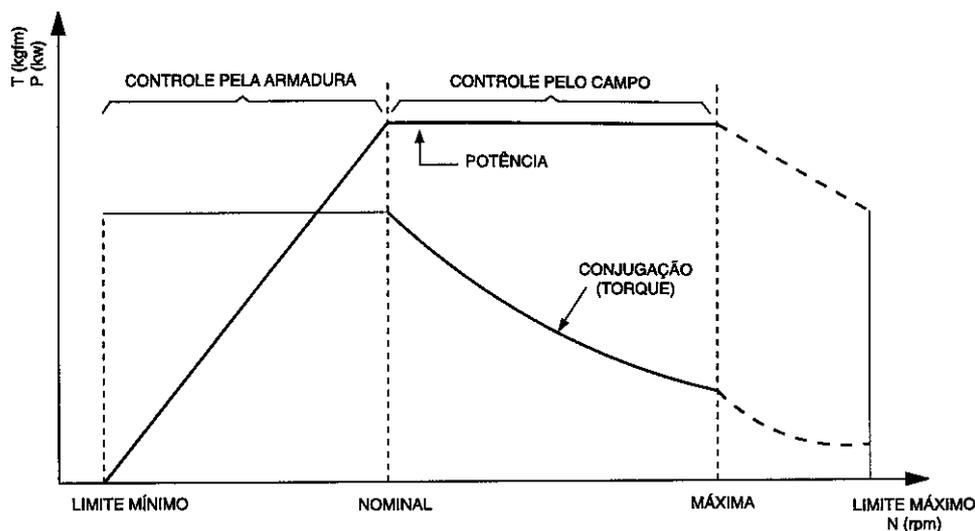


Figura 8.11 - Métodos de controle de velocidade, válido para o motor de excitação independente

De acordo com este gráfico, para se ter boa comutação e controle estável de velocidade, a corrente de armadura poderá ser normal somente até a velocidade máxima, a fim de não ocorrer uma sobrecarga térmica, pois o valor máximo da

corrente de armadura é definido pelo aquecimento da máquina e pela garantia de uma comutação perfeita.

Após a velocidade máxima do motor, enfraquecendo-se ainda mais o campo com o aumento da velocidade, tanto o torque quanto a potência devem diminuir.

O controle de velocidade pela variação da corrente da armadura é usado para acionamento de máquinas operatrizes, compressores, bombas a pistão etc.

O controle de velocidade através do campo é usado para acionamento de máquinas de corte periféricos, como em tornos, bobinadeiras, máquinas têxteis etc.

## 8.7 REAÇÃO DA ARMADURA

É a interação entre o fluxo magnético produzido pelo campo (indutor) e pela armadura (induzido) da máquina. Resulta uma distribuição de fluxo bastante diferente da distribuição a vazio.

Quando a máquina CC está funcionando a vazio, a corrente de armadura e por conseguinte o fluxo são pequenos; quando motor e quando gerador, esta corrente e o fluxo são zero.

Quando a corrente da armadura aumenta, cria-se um fluxo magnético que produzirá uma distorção no fluxo do campo.

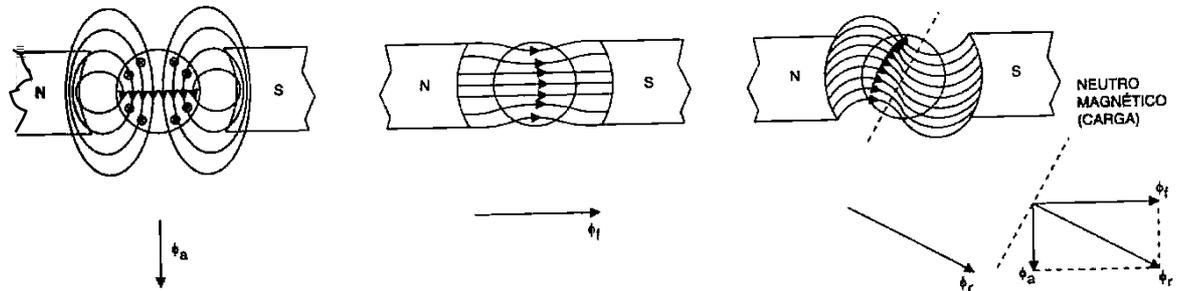


Figura 8.12 – Interação do fluxo polar e da armadura para deslocar o neutro magnético

### Compensação da Reação da Armadura

Não se pode manter uma posição e deslocar as escovas de acordo com variações de carga, pois de acordo com a sua utilização, seja motor ou gerador, o sentido tem de ser observado.

É necessário um método automático, no qual os efeitos da armadura sejam compensados ou os fatores que a causam, neutralizados. Existem alguns métodos de compensação para os efeitos da reação da armadura, sendo um deles a construção da máquina com uso de chapas chanfradas, com maior relutância nas extremidades, obrigando o fluxo de campo a ser confinado no centro de cada um dos pólos.

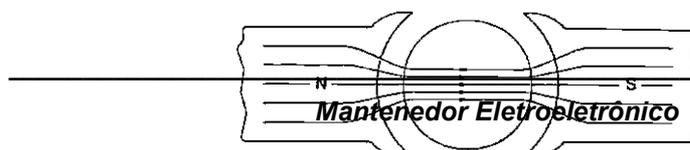


Figura 8.13 – Extremidades polares de alta relutância

Outra técnica para a compensação da reação de armadura é elétrica, com a utilização de enrolamentos que são instalados no estator e ligados em série com a armadura, chamados de interpólos ou enrolamentos de compensação.

## 8.8 ENROLAMENTOS

### Enrolamento de Interpolo

Os enrolamentos de interpólos, também chamados de pólos de comutação, são instalados entre os pólos principais da máquina CC, de tal forma que a corrente que circula na armadura seja a mesma que circula pelo interpolo. Desta forma, toda variação de corrente da armadura é também compensada pela variação de fluxo no estator da máquina.

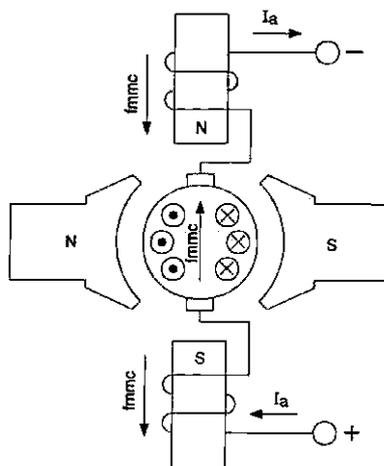
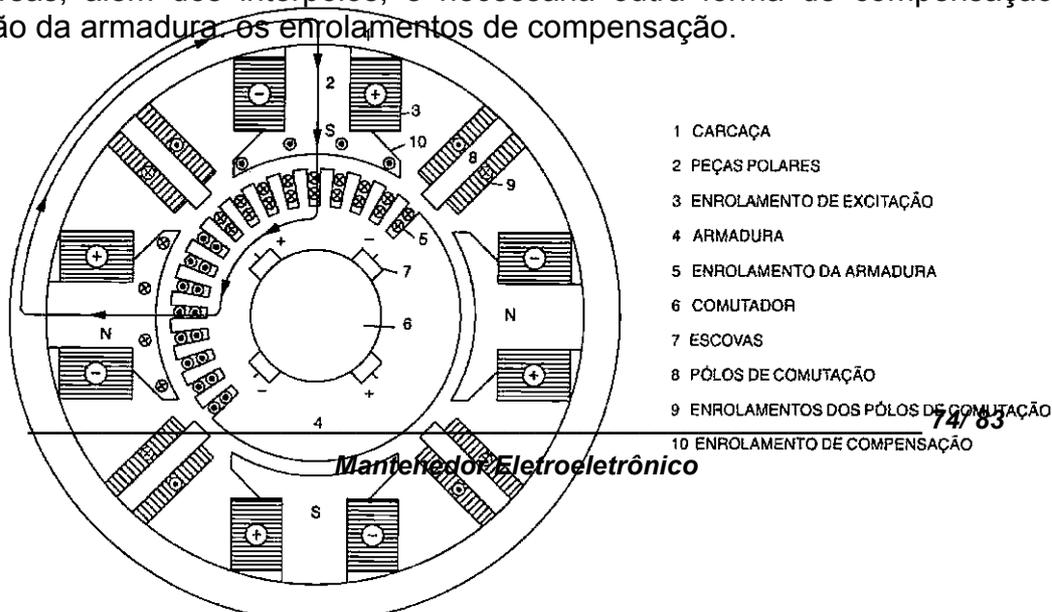


Figura 8.14 – Diagrama de máquina CC com o enrolamento de interpolo

### Enrolamento de Compensação

No caso de grandes motores sujeitos a pesadas sobrecargas e outras situações adversas, além dos interpólos, é necessária outra forma de compensação da reação da armadura, os enrolamentos de compensação.



**Figura 8.15 - São instalados em ranhuras existentes nas sapadas polares.**

Os enrolamentos de compensação também devem ser ligados em série com armadura e atravessados por correntes de sentido contrário à armadura. Disto resulta que a zona neutra fica estática e a distribuição de fluxo uniforme ao longo das faces polares, eliminando praticamente os problemas de comutação.

## 8.9 INVERSÃO DE ROTAÇÃO DO MOTOR CC

De acordo com a regra mão esquerda, de Fleming, o movimento de rotação é definido pelo sentido do fluxo magnético, e o sentido da corrente da armadura (convencional). Então, para inverter o sentido de rotação de qualquer motor CC, é necessário inverter o sentido do fluxo magnético ou sentido da corrente na armadura.

A inversão, em ambos os circuitos, manterá o mesmo sentido de rotação.

Pode parecer que a corrente  $I_a$  não seja a mais indicada para fazer a reversão, desde que o circuito da armadura carregue uma corrente maior. Porém, ao utilizar dispositivos automáticos de reversão, o circuito da armadura é o escolhido para a inversão em virtude de:

- a) O enrolamento de campo é um circuito altamente indutivo, e inversões freqüentes produzem elevadas tensões induzidas, desgastando (queimando) os contatos dos dispositivos de partidas;
- b) No motor composto é necessário fazer a inversão nos dois campos, senão passará de composto cumulativo para composto diferencial;
- c) Normalmente, os condutores da armadura estão abertos para fins dinâmicos, como, por exemplo, frenagem. E como essas conexões são normalmente disponíveis, podem ser usadas para fazer a reversão;
- d) Se o dispositivo de inversão estiver defeituoso e o circuito de campo não estiver ligado, o motor pode disparar.

## 8.10 FRENAGENS

### Frenagem Em Motor CC

A frenagem de um motor de corrente contínua se faz necessária de acordo com o processo industrial e quando não se quer utilizar apenas equipamento mecânico, devido ao grande desgaste. Distinguem-se três processos de frenagem para os motores CC:

- frenagem por contracorrente;
- frenagem dinâmica;
- frenagem regenerativa.

#### Frenagem por Contracorrente

Ocorre quando os terminais da armadura estão conectados à fonte para um sentido de rotação e invertem-se, instantaneamente, os terminais da fonte de alimentação, num tempo suficiente para que a ação de conjugados em sentidos contrários anulem as forças de inércia do motor, fazendo-o parar.

A corrente de armadura tem valores bastante elevados, sendo necessário conectar uma resistência adicional no circuito com o objetivo de limitar esta corrente.

#### Frenagem Dinâmica

A frenagem dos motores shunt e composto ocorre após desconectar a armadura do motor da rede e conectá-la a um resistor, permanecendo o campo conectado à rede. No caso do motor série, o enrolamento de campo é ligado em série com o resistor, invertendo a polaridade da armadura para evitar a desmagnetização da máquina.

A frenagem dinâmica ocorre quando um motor é desconectado da rede, por meio dos terminais da armadura, e, permanecendo o fluxo magnético, a máquina passa a trabalhar como gerador enquanto houver movimento. A energia cinética que se acumulou no motor e nos elementos móveis do equipamento acionado pelo motor se transforma em energia elétrica. Esta energia é dissipada em forma de calor. Devido à corrente elétrica que circula no gerador dentro do campo magnético, cria-se um conjugado contrário ao motor, fazendo a frenagem da máquina.

#### Frenagem Regenerativa

É semelhante à frenagem dinâmica, só que em vez da energia ser dissipada em forma de calor, num resistor, é devolvida à fonte.

## 8.11 CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR CC – CIRCUITO RLE

Em quaisquer circunstâncias, pode-se analisar o motor CC baseado no circuito Resistivo – Indutivo – Equivalente – RLE da armadura. As equações que seguem as tensões num motor CC são dadas pelo circuito equivalente, a seguir:

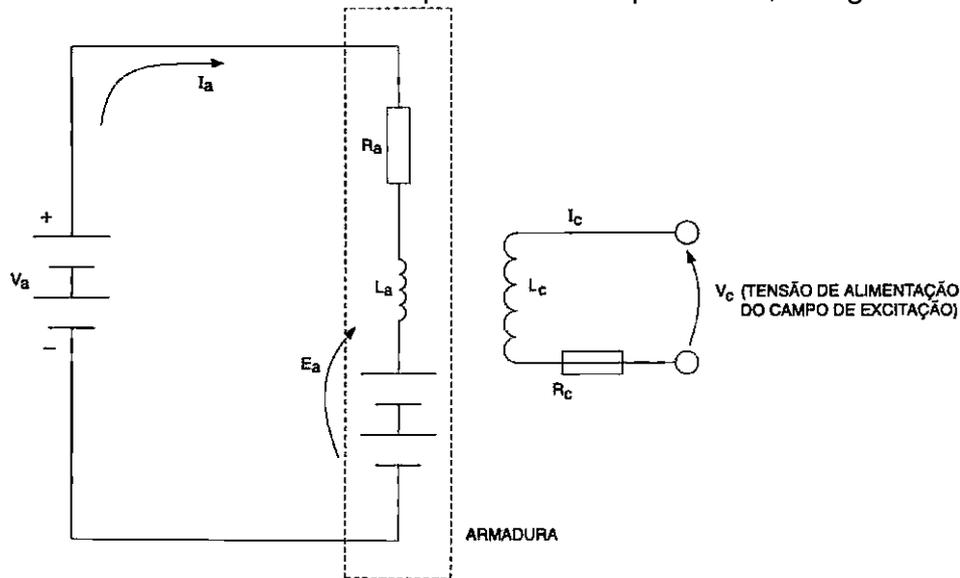


Figura 8.16

Percebe-se:

$$V_a - I_a \cdot R_a - L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} - E_c = 0$$

Como  $L_a \frac{dI_a}{dt} = 0$  para grande parte das aplicações, a equação torna-se:

$$V_a - I_a \cdot R_a - E_c = 0$$

Temos também que:

$$E_c = K_1 \cdot \phi_c \cdot N$$

$$\phi_c = K_2 \cdot I_c$$

onde:  $E_c$  é a força contra-eleromotriz, em volts;

$\phi$  é o fluxo magnético efetivo do campo, em Weber;

$N$  é a velocidade, em rpm;

$R_a$  é a resistência da armadura, em Ohm;

$K_1$  e  $K_2$  são constantes de ajustes das equações:

$$N = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K_1 \cdot \phi_c}$$

Se for mantida a corrente de campo constante, o fluxo de campo  $\Phi_c$  também o será. Assim, a velocidade  $N$  da máquina é função decrescente com  $I_a$ , ou seja, o aumento da carga no motor torna a velocidade menor.

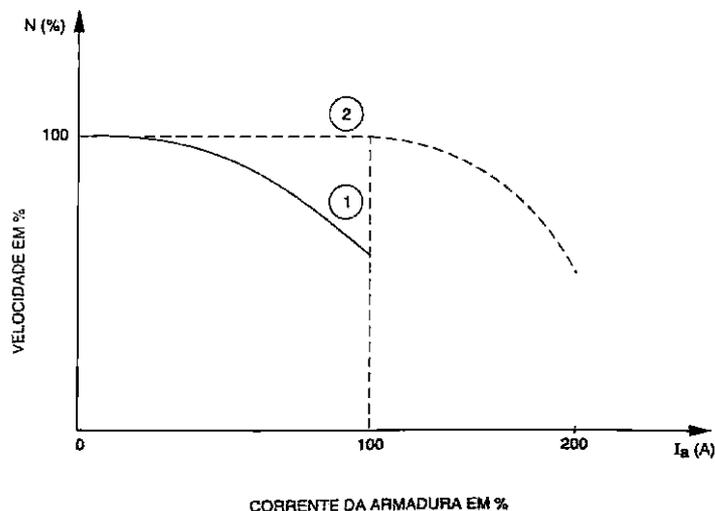


Figura 8.17 - Velocidade versus a corrente ( $N \times I_a$ )

A curva em linha contínua é a resposta real do motor, e a pontilhada, a resposta teórica obtida a partir da equação da velocidade. O desvio entre as duas é provocado pela indutância da armadura  $L_a$ , originalmente desprezada.

Por meio do modelo RLE pode-se compreender a aplicação do motor controlado por uma fonte (conversor) trifásica nos modos retificador e inversor.

No motor retificador o motor trabalha como carga e basicamente acelera sob o controle da fonte.

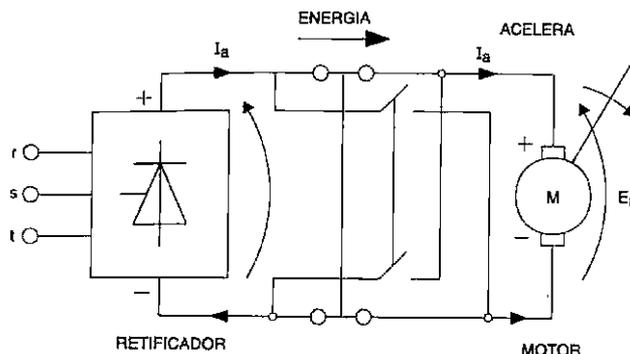


Figura 8.18 - Modo retificador

Durante o modo inversor, a energia armazenada no campo magnético da armadura é devolvida ao sistema através de contato, e a fonte, ativada como inversora para a regeneração de energia.

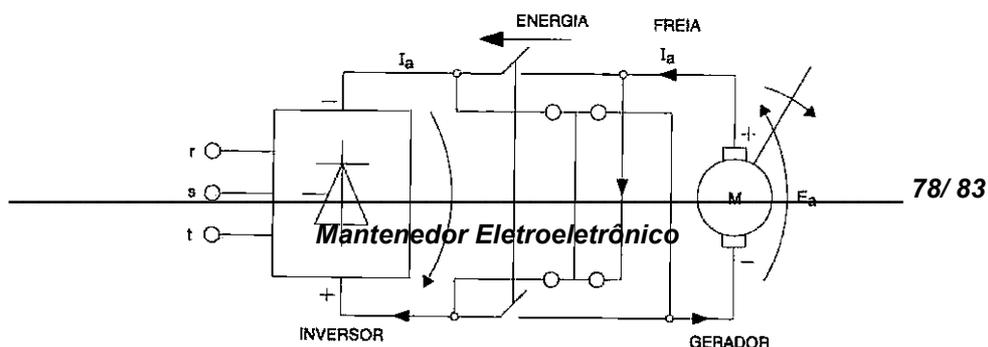


Figura 8.19

Observa-se que a armadura foi invertida pelos contatos. Quando for conectada a uma fonte única, e no instante que  $E_c = V_a$  e  $I_a = 0$ , o valor médio na saída do conversor será negativo e terá módulo constantemente diminuído. Desta forma, a energia flui do motor para a rede e o motor desacelera. Esta desaceleração é conhecida como frenagem regenerativa.

Quando se dispõe de duas fontes em antiparalelo, pode-se operar o motor em quatro quadrantes, como motor/gerador com possibilidade de inversão no sentido de giro. O item a seguir apresenta a operação em quatro quadrantes.

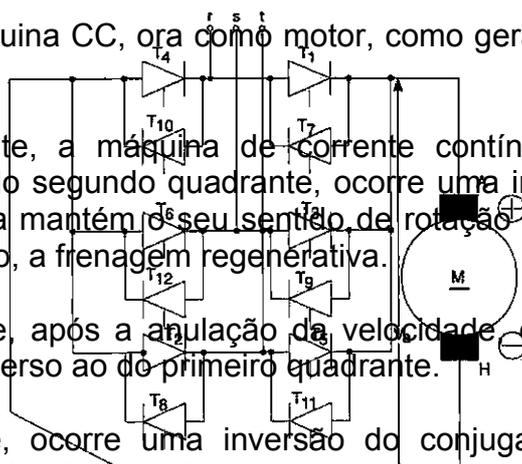
### Operação em Quatro Quadrantes

É a operação da máquina CC, ora como motor, como gerador, com o objetivo de fazer o acionamento.

No primeiro quadrante, a máquina de corrente contínua opera como motor tracionado à carga. No segundo quadrante, ocorre uma inversão no sentido do conjugado, a máquina mantém o seu sentido de rotação e passa a operar como gerador. Ocorre, então, a frenagem regenerativa.

No terceiro quadrante, após a anulação da velocidade o conjugado mantém o sentido de rotação inverso ao do primeiro quadrante.

No quarto quadrante, ocorre uma inversão do conjugado motor. A máquina mantém o seu sentido de rotação e passa a operar como gerador. Ocorre novamente a frenagem regenerativa.



Para facilitar a interpretação, a figura a seguir apresenta tiristores controlados em antiparalelo ligados a uma rede trifásica e máquina CC.

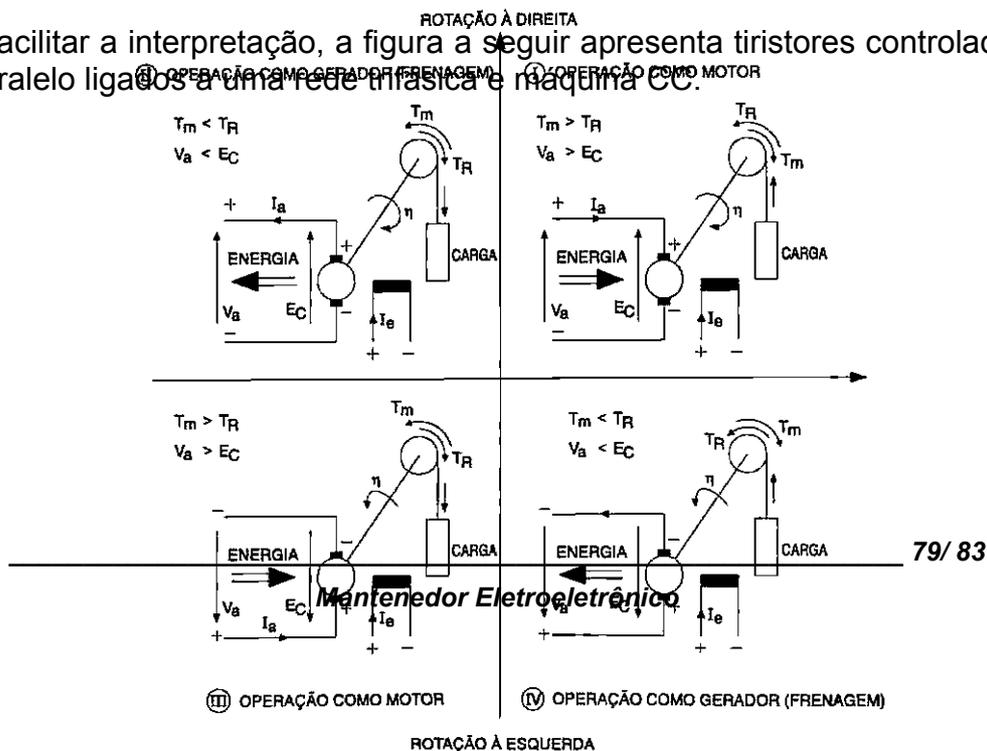


Figura 8.20

## 8.12 ESCOVAS ELÉTRICAS

Em 1869, o engenheiro eletricitista e inventor belga Zénobe-Théophile Gramme construiu um motor CC que também se comportava como gerador – a máquina CC. Utilizava fios de cobre dispostos em forma de feixe para fazer o contato entre a armadura, através do anel comutador e a caixa de ligação para fazer conexões.

Em função da semelhança desse feixe de fios com as escovas de limpeza, conhecidas na época, surgiu a denominação escovas.

Este material utilizado não era o mais adequado, pois além de se desgastarem rapidamente, agrediam a superfície do comutador. Como primeira evolução surgiram os contatos formados de tela de latão enrolada e prensada em forma paralelepípedo. Mais tarde desenvolveu-se um contato de carvão obtido pela

aglomeração de coque de retorta moída e cozida, que apresentou excelente resultado. Surgiram, assim, as escovas de carvão.

### 8.13 O CARBONO

O carbono é o mais refratário dos elementos que se conhece. Na sua forma cristalina é denominado grafite. Como característica deste material tem-se:

- sensibilidade total a choques térmicos;
- conservação das suas propriedades mecânicas a altas temperaturas;
- baixa densidade;
- facilidade de usinagem.

O emprego do grafite também é limitado devido a seu poder de oxidação, resiliência e irregularidade.

Com um tratamento à temperatura correta (gravitação) do aglomerado de carbono chamado de amorfo, obtém-se o material grafite com as propriedades desejadas.

#### Elaboração do Grafite

##### Matérias-primas:

1. Negros de fumo e de petróleo, que são formas divididas de carbono, obtidas por meio gasoso.
2. Coques metalúrgicos, de petróleo e retorta, que são resíduos da destilação ou da condensação.
3. Grafites naturais, procedentes de Madagascar e Ceilão.
4. Grafites artificiais, resultantes de materiais eletrografitados e remoídos.
5. Piche, breu, resinas fenólicas, que são materiais ligantes.

### 8.14 CLASSIFICAÇÃO DAS ESCOVAS

Há cinco grupos de escovas, do ponto de vista de fabricação e utilização. Os principais são:

- escovas duras ou amorfas;
- escovas de baquelite – grafite ou grafite especial;
- escovas de grafite natural, grafite ou carvão – grafite;
- escovas de eletrografite;

- escovas metálicas.

Escovas duras ou amorfas: são construídas, basicamente, de carbonos amorfos, tais como coque de petróleo e de negro fumo, misturadas e aglutinadas com piches ou resinas sintéticas; prensadas e depois cozidas em temperaturas de até 1200°C. As escovas resultantes são altamente polidoras e têm baixa capacidade térmica e elétrica.

Escovas de baquelite – grafite ou grafite especial: utiliza-se grafite natural ou artificial, que é moído e aglomerado com uma resina do tipo baquelite. Esta mistura é comprimida e polimerizada a uma temperatura conveniente. Têm alta resistência mecânica e elétrica e elevada queda de tensão por contato. Apresentam alta capacidade de comutação e geralmente são polidoras.

Escovas de grafite natural, grafite ou carvão grafite: são constituídas, basicamente, de grafite natural purificado, junto com resinas sintéticas, prensado e tratado termicamente por processos especiais a aproximadamente mil graus centígrados. Têm altas perdas elétricas, elevada resistência à abrasão térmica, e são polidoras.

Escovas de eletrografite: são preparadas como as amorfas, mas posteriormente eletrografitadas a uma temperatura aproximada de 2500°C. Tem boa condutibilidade térmica e elétrica, mediana queda de tensão, e capacidade de polimento menor que as amorfas. O eletrografite é um dos materiais mais utilizados em escovas elétricas.

Escovas metálicas: são misturadas em proporções convenientes de grafite e cobre, com eventual adição de pó de chumbo ou estanho. A mistura é comprimida e as placas cozidas em atmosfera e temperatura controladas. Estas escovas se caracterizam pelo peso elevado, baixo coeficiente de atrito e baixíssima queda de tensão por contato.

## Referências Bibliográficas:

1. APOSTILA – Máquinas Elétricas – Eletrotécnica Teoria e Prática Curso Eletricista de Manutenção - SENAI-MG 1998
2. APOSTILA – Fundamentos de Máquinas Elétricas e Comandos Elétricos SENAI – MG - 1999.
3. APOSTILA - Elétrica – Equipamentos e Sistemas Elétricos SENAI – ES 1997/CST.
4. MILASCH, Milan – Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante – 5ª reimpressão – editora Edgard Blücher Ltda
5. KOSOW, Irving L. – Máquinas Elétricas e Transformadores – 13ª edição – São Paulo – Editora Globo - 1998