

Curso de Técnico em Eletrotécnica

# Máquinas Elétricas

**Armando de Queiroz Monteiro Neto**  
Presidente da Confederação Nacional da Indústria

**José Manuel de Aguiar Martins**  
Diretor do Departamento Nacional do SENAI

**Regina Maria de Fátima Torres**  
Diretora de Operações do Departamento Nacional do SENAI

---

**Alcantaro Corrêa**  
Presidente da Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina

**Sérgio Roberto Arruda**  
Diretor Regional do SENAI/SC

**Antônio José Carradore**  
Diretor de Educação e Tecnologia do SENAI/SC

**Marco Antônio Dociatti**  
Diretor de Desenvolvimento Organizacional do SENAI/SC



Confederação Nacional das Indústrias  
Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Curso de Técnico em Eletrotécnica

## Máquinas Elétricas

Frederico Samuel de Oliveira Vaz

Florianópolis/SC  
2010

É proibida a reprodução total ou parcial deste material por qualquer meio ou sistema sem o prévio consentimento do editor. Material em conformidade com a nova ortografia da língua portuguesa.

Equipe técnica que participou da elaboração desta obra

**Coordenação de Educação a Distância**

Beth Schirmer

**Revisão Ortográfica e Normatização**

Contextual Serviços Editoriais

**Coordenação Projetos EaD**

Maristela de Lourdes Alves

**Design Educacional, Ilustração,  
Projeto Gráfico Editorial, Diagramação**

Equipe de Recursos Didáticos  
SENAI/SC em Florianópolis

**Autor**

Frederico Samuel de Oliveira Vaz

Ficha catalográfica elaborada por Luciana Effting CRB14/937 - Biblioteca do SENAI/SC Florianópolis

V393m

Vaz, Frederico Samuel de Oliveira

Máquinas elétricas / Frederico Samuel de Oliveira Vaz. – Florianópolis :  
SENAI/SC, 2010.

99 p. : il. color ; 28 cm.

Inclui bibliografias.

1. Máquinas elétricas. 2. Transformadores elétricos. 3. Motores elétricos  
de corrente contínua. 4. Energia. I. SENAI. Departamento Regional de Santa  
Catarina. II. Título.

CDU 621.313

SENAI/SC — Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Rodovia Admar Gonzaga, 2.765 – Itacorubi – Florianópolis/SC

CEP: 88034-001

Fone: (48) 0800 48 12 12

www.sc.senai.br



# Prefácio

Você faz parte da maior instituição de educação profissional do estado. Uma rede de Educação e Tecnologia, formada por 35 unidades conectadas e estrategicamente instaladas em todas as regiões de Santa Catarina.

No SENAI, o conhecimento a mais é realidade. A proximidade com as necessidades da indústria, a infraestrutura de primeira linha e as aulas teóricas, e realmente práticas, são a essência de um modelo de Educação por Competências que possibilita ao aluno adquirir conhecimentos, desenvolver habilidade e garantir seu espaço no mercado de trabalho.

Com acesso livre a uma eficiente estrutura laboratorial, com o que existe de mais moderno no mundo da tecnologia, você está construindo o seu futuro profissional em uma instituição que, desde 1954, se preocupa em oferecer um modelo de educação atual e de qualidade.

Estruturado com o objetivo de atualizar constantemente os métodos de ensino-aprendizagem da instituição, o **Programa Educação em Movimento** promove a discussão, a revisão e o aprimoramento dos processos de educação do SENAI. Buscando manter o alinhamento com as necessidades do mercado, ampliar as possibilidades do processo educacional, oferecer recursos didáticos de excelência e consolidar o modelo de Educação por Competências, em todos os seus cursos.

É nesse contexto que este livro foi produzido e chega às suas mãos. Todos os materiais didáticos do SENAI Santa Catarina são produções colaborativas dos professores mais qualificados e experientes, e contam com ambiente virtual, mini-aulas e apresentações, muitas com animações, tornando a aula mais interativa e atraente.

Mais de 1,6 milhões de alunos já escolheram o SENAI. Você faz parte deste universo. **Seja bem-vindo e aproveite por completo a Indústria do Conhecimento.**



SERGIO ROBERTO ARRUDA  
Diretor Regional SENAI/SC



# Sumário

## Conteúdo Formativo 9

## Apresentação 11

### 14 Unidade de estudo 1 Transformadores Monofásicos

- 15 **Seção 1** - Princípios de funcionamento
- 17 **Seção 2** - Circuito equivalente
- 18 **Seção 3** - Perdas no transformador
- 19 **Seção 4** - Cálculo do rendimento
- 19 **Seção 5** - Ensaios

### 22 Unidade de estudo 2 Transformadores Trifásicos

- 23 **Seção 1** - Introdução
- 23 **Seção 2** - Aspectos construtivos
- 23 **Seção 3** - Grau de proteção
- 25 **Seção 4** - Operação de transformadores trifásicos em paralelo
- 25 **Seção 5** - Divisão de cargas entre transformadores
- 26 **Seção 6** - Determinação da tensão nominal
- 26 **Seção 7** - Polarização do transformador

- 26 **Seção 8** - Ligação em transformadores trifásicos
- 28 **Seção 9** - Ensaios em transformadores trifásicos
- 28 **Seção 10** - Placa de identificação

### 30 Unidade de estudo 3 Outros Transformadores

- 31 **Seção 1** - Autotransformadores
- 33 **Seção 2** - Transformador de potencial
- 33 **Seção 3** - Transformador de corrente

### 36 Unidade de estudo 4 Geradores de Corrente Alternada

- 37 **Seção 1** - Introdução
- 37 **Seção 2** - Princípios de funcionamento
- 39 **Seção 3** - Aspectos construtivos
- 39 **Seção 4** - Geração de corrente trifásica
- 40 **Seção 5** - Ligações no sistema trifásico
- 41 **Seção 6** - Tensão nominal múltipla
- 43 **Seção 7** - Comportamento do gerador vazio e sob carga

- 45 **Seção 8** - Características dos rotores de geradores
- 45 **Seção 9** - Reatância síncrona
- 46 **Seção 10** - Regulação de tensão
- 46 **Seção 11** - Perdas e eficiência
- 46 **Seção 12** - Potência em máquinas de pólos salientes
- 47 **Seção 13** - Sincronização

### 48 Unidade de estudo 5 Motor Síncrono

- 49 **Seção 1** - Introdução
- 49 **Seção 2** - Operação e funcionamento
- 51 **Seção 3** - Servomotor

**52 Unidade de estudo 6**  
Motores Trifásicos  
de Indução de  
Corrente Alternada

- 53 **Seção 1** - Introdução
- 54 **Seção 2** - Visão geral
- 55 **Seção 3** - Aspectos construtivos
- 57 **Seção 4** - Princípios de funcionamento
- 58 **Seção 5** - Velocidade síncrona ( $n_s$ )
- 58 **Seção 6** - Escorregamento
- 59 **Seção 7** - Circuito equivalente
- 61 **Seção 8** - Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente
- 63 **Seção 9** - Equações gerais
- 65 **Seção 10** - Características eletromecânicas
- 66 **Seção 11** - Métodos de partida

**70 Unidade de estudo 7**  
Motores  
monofásicos

- 71 **Seção 1** - Introdução
- 71 **Seção 2** - Princípios de funcionamento
- 72 **Seção 3** - Partida e funcionamento normal de motores monofásicos de indução
- 75 **Seção 4** - Ensaaios em motores monofásicos

**78 Unidade de estudo 8**  
Geradores de  
Corrente Contínua

- 79 **Seção 1** - Introdução
- 79 **Seção 2** - Princípios de funcionamento
- 80 **Seção 3** - Aspectos construtivos
- 81 **Seção 4** - Excitação de campo
- 82 **Seção 5** - Circuito equivalente do gerador CC
- 83 **Seção 6** - Equações da tensão no gerador e regulação de tensão
- 84 **Seção 7** - Perdas e eficiência de uma máquina

**86 Unidade de estudo 9**  
Motores de Corrente  
Contínua

- 87 **Seção 1** - Introdução
- 87 **Seção 2** - Princípios de funcionamento
- 87 **Seção 3** - Torque
- 87 **Seção 4** - Forças contra-eletromotriz
- 88 **Seção 5** - Circuito equivalente do motor CC
- 89 **Seção 6** - Velocidades de um motor
- 89 **Seção 7** - Tipos de motores
- 91 **Seção 8** - Requisitos de partida dos motores

**92 Unidade de estudo 10**  
Geração de Energia

- 93 **Seção 1** - Energia
- 93 **Seção 2** - Potência
- 93 **Seção 3** - Geração de energia
- 93 **Seção 4** - Cogeração de energia
- 94 **Seção 5** - Sistema de geração

**Finalizando** 97

**Referências** 99



# Conteúdo Formativo

## Carga horária da dedicação

- Carga horária: 60h

## Competências

- Analisar o funcionamento e o comportamento das máquinas elétricas em instalações industriais e prediais.

## Conhecimentos

- Características construtivas e funcionais de máquinas elétricas: motores síncronos, assíncronos, corrente contínua, servomotores e transformadores.
- Eficiência energética.
- Sistemas de geração de energia elétrica: fontes alternativas e tradicionais de energia elétrica.

## Habilidades

- Aplicar normas técnicas para dimensionamento de componentes e máquinas.
- Identificar as fontes alternativas de energia, aplicando e substituindo fontes de energia tradicionais.
- Avaliar as características ambientais e econômicas frente a sistemas tradicionais de geração de energia elétrica.
- Identificar materiais, dispositivos e máquinas de instalações elétricas.
- Aplicar técnicas de medição e ensaios elétricos (em máquinas elétricas) para a melhoria da qualidade de serviços.
- Aplicar técnicas de montagem em máquinas elétricas.
- Selecionar máquinas para geração de energia elétrica.
- Interpretar procedimentos básicos de operação de dispositivos de manobras em baixa e alta tensão.
- Interpretar normas técnicas de saúde, segurança no trabalho e meio ambiente.
- Aplicar técnicas para correção do fator de potência.

## Atitudes

- Zelo no manuseio dos equipamentos e instrumentos.
- Cuidados no manuseio de componentes eletroeletrônicos.
- Aplicar normas técnicas de saúde, segurança no trabalho e meio ambiente.
- Responsabilidade socioambiental.





# Apresentação

Prezado aluno, seja bem vindo à unidade curricular de Máquinas Elétricas.

O objetivo deste conteúdo é apresentar a teoria de funcionamento, a aplicação e a análise das máquinas elétricas, proporcionando a você informações e subsídios práticos que servirão de suporte para a atuação na área de eletrotécnica, bem como de referência para o seu desenvolvimento profissional futuro.

É muito importante o conhecimento na área de máquinas elétricas para a sua atuação como técnico em eletrotécnica, pois tais equipamentos estão presentes em praticamente todos os segmentos de mercado onde você poderá atuar.

Saiba que um maior enfoque será dado aos transformadores, geradores e motores, que são as máquinas mais empregadas na indústria, tais máquinas estarão agrupadas por características visando otimizar e facilitar o entendimento.

Então? Pronto para transitar por estes caminhos do conhecimento?

Bons estudos!

 Professor Frederico Samuel de Oliveira Vaz

Frederico Samuel de Oliveira Vaz é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Santa Catarina e pós-graduado em Projeto e Análise de Máquinas Elétrica Girantes pelo Centro Universitário de Jaraguá do Sul. Atuou entre os anos 2002 e 2009 na área de fabricação de motores elétricos na WEG Equipamentos Elétricos S.A. Atualmente, é professor dos cursos técnicos e tecnológicos do SENAI Jaraguá do Sul.



# Unidade de estudo 1

## Seções de estudo

- Seção 1 - Princípios de funcionamento
- Seção 2 - Circuito equivalente
- Seção 3 - Perdas no transformador
- Seção 4 - Cálculo do rendimento
- Seção 5 - Ensaio

# Transformadores Monofásicos

## SEÇÃO I

### Princípios de funcionamento

Você sabia que o transformador é um equipamento utilizado em diversas aplicações e está presente em praticamente todos os ramos de atividade dos diferentes setores da economia moderna?

Dentre as principais aplicações, pode-se citar a transferência de energia de um circuito elétrico a outro com o ajuste do nível de tensão, o acoplamento entre sistemas elétricos, objetivando o casamento de impedância e isolamento e a eliminação de corrente CC entre dois ou mais circuitos. Agora você conhecerá o funcionamento do transformador.

Basicamente, um transformador é um equipamento capaz de realizar a alteração no nível de tensão por meio da transferência de fluxo magnético entre dois ou mais enrolamentos acoplados por um núcleo (NASCIMENTO JR., 2008).

A partir da conexão de uma tensão alternada de entrada no enrolamento primário, o fluxo gerado é conduzido pelo núcleo magnético e é enlaçado pelo enrolamento

secundário, induzindo no mesmo uma tensão cuja sua amplitude estará em função do fluxo magnético e do número de espiras do secundário.

A amplitude do fluxo produzido pelo primário está em função do número de espiras e da tensão de entrada (amplitude e frequência).

A base de funcionamento de um transformador necessita da existência de um fluxo comum, variável no tempo e que seja enlaçado por dois ou mais enrolamentos, conforme você pode observar na figura a seguir:

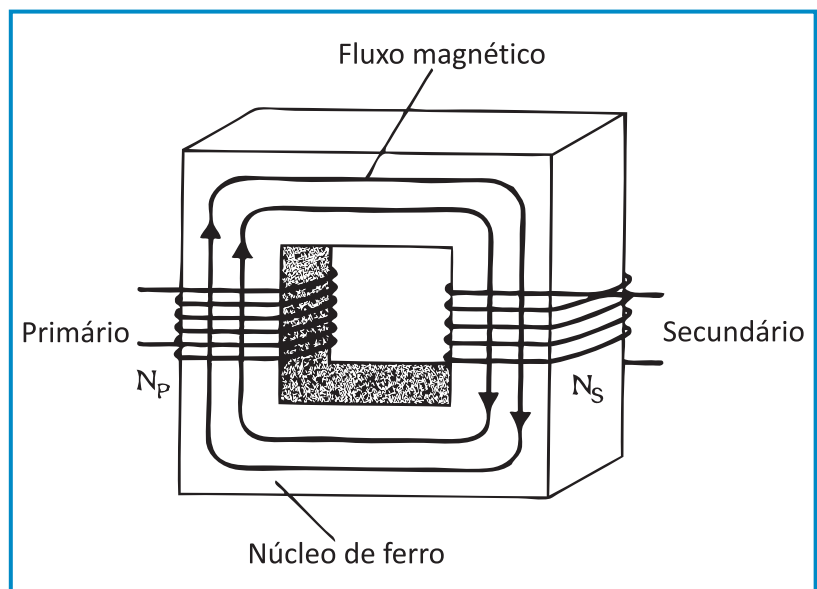


Figura 1 - Fluxo Magnético

Fonte: Nascimento Jr. (2008, P. 36).

Veja que determinando a relação adequada entre o número de espiras do primário e do secundário, obtemos a relação entre tensões desejada.

Acompanhe:

- $U_1$  = tensão aplicada na entrada (primária);
- $N_1$  = número de espiras do primário;
- $N_2$  = número de espiras do secundário;
- $U_2$  = tensão de saída (secundário).

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Equação 1

A tensão gerada no secundário em decorrência do fluxo magnético variável gerado pelo primário é denominada tensão induzida.

Se no primário do transformador for aplicada uma corrente contínua, não será gerada tensão no secundário, pois o fluxo magnético não será variável ao longo do tempo.

A relação entre correntes e o número de espiras entre enrolamento primário e enrolamento secundário é dada por:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Equação 2

Continue acompanhando:

- $I_1$  = corrente no primário;
- $I_2$  = corrente no secundário;
- $N_1$  = número de espiras do primário;
- $N_2$  = número de espiras do secundário.

Você pode perceber aqui, a partir das relações apresentadas, que no enrolamento de maior tensão circulará a menor corrente, assim, quanto menor o número de espiras maior será a corrente.

Você verá na figura a seguir uma forma de ligar o transformador.

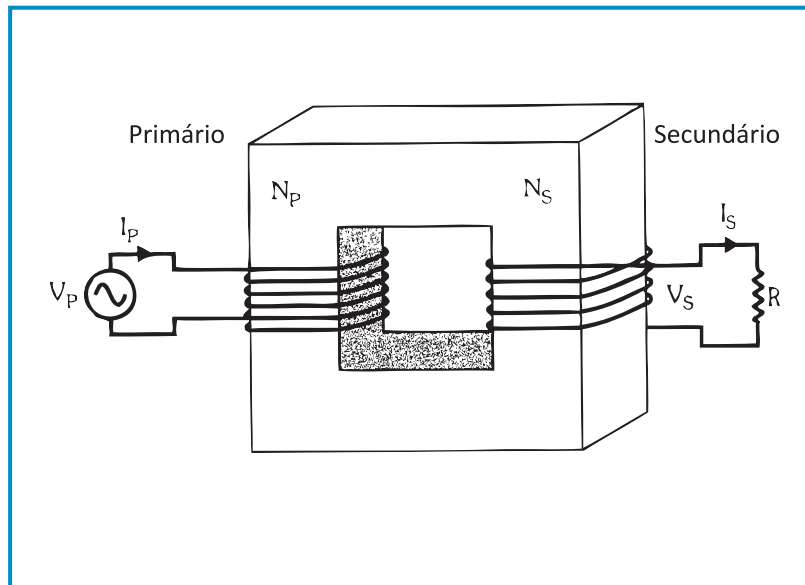


Figura 2 - Ligação de um Transformador  
Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 38)

Preste atenção agora nos exemplos:

### Exemplo 1

Determine o número de espiras do primário de um transformador com 180 espiras no secundário e uma relação de tensão de 120/12 V.

Aplicando a equação:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Temos:

$$\frac{120}{12} = \frac{N_1}{180}$$

$$N_1 = 1800 \text{ espiras}$$

### Exemplo 2

Para uma carga de 800 W, determine as correntes nos enrolamentos do transformador citado no exemplo anterior.

$$\text{Sendo: } P_2 = U_2 \cdot I_2$$

$$I_2 = \frac{800}{12} = 66,67A$$

A partir da equação:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$

$$I_1 = \frac{180}{1800} \cdot 66,67 = 6,67A$$

Que tal, o que está achando do assunto? Vamos para a próxima seção!

## SEÇÃO 2

### Circuito equivalente

Embora acoplado pelo núcleo de ferro, uma pequena porção de fluxo disperso ( $\Phi_1$  e  $\Phi_2$ ) é gerada nos enrolamentos do transformador.

No primário, o fluxo disperso  $\Phi_1$  gera uma reatância indutiva  $X_1$  e no secundário o fluxo disperso  $\Phi_2$  gera uma reatância indutiva  $X_2$ .

Os parâmetros apresentados no circuito equivalente determinam o funcionamento correto do transformador (NASCIMENTO JR., 2008). Observe a figura a seguir.

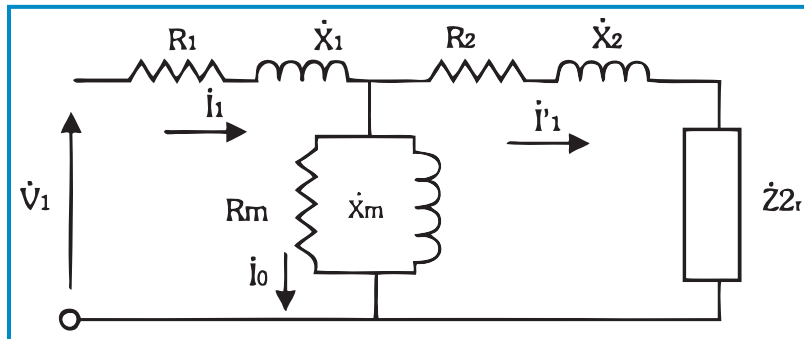


Figura 3 - Circuito Elétrico Equivalente

Fonte: Filippo Filho (2000, p. 13).

Conheça cada um desses parâmetros:

- $X_m$  = reatância indutiva de magnetização;
- $R_m$  = resistência de magnetização que retrata as perdas do ferro;
- $R_1$  = resistência do enrolamento primário;
- $X_1$  = reatância indutiva do enrolamento primário;
- $R_2$  = resistência do enrolamento secundário;
- $X_2$  = reatância indutiva do enrolamento secundário.

Os valores das impedâncias refletidas são tais que as potências ativa e reativa são iguais quando sujeitas à corrente  $I'_1$ , sendo assim, temos as seguintes relações:

$$R_{2r} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2$$

Equação 3

$$X_{2r} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot X_2$$

Equação 4

$$Z_{2r} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot Z_2$$

Equação 5

Na prática você pode utilizar o circuito em que  $X_{2r}$  são agrupados à  $R_1$  e  $X_1$ . O erro que se comete com essa simplificação é aceitável para efeito de análise do transformador.

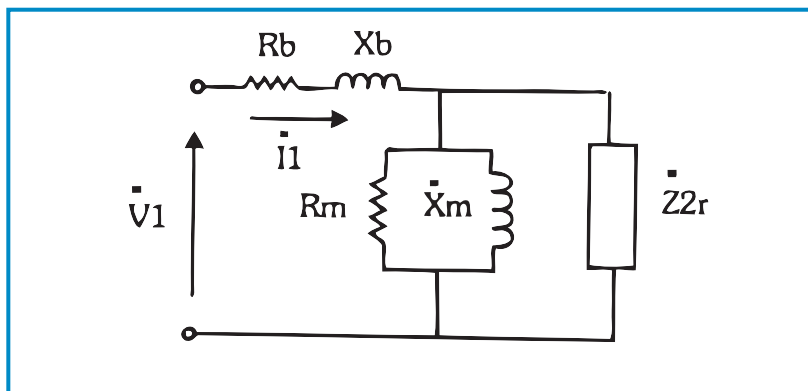


Figura 4 - Circuito Elétrico Equivalente Aproximado

Fonte: Filippo Filho (2000, p. 14).

Com o conhecimento dos parâmetros do transformador, é possível utilizar os ensaios para a determinação da grandeza dos mesmos.

Vamos adiante? O assunto é bastante curioso, certo?

## SEÇÃO 3

### Perdas no transformador

Agora vamos conhecer algumas perdas?

#### ➤ Perdas no cobre

As perdas no cobre podem ser divididas em:

- **perdas na resistência ôhmica dos enrolamentos** – são decorrentes da passagem de uma corrente  $I$  pelo condutor que apresenta uma determinada resistência  $R$ , esta perda é representada pela expressão  $I^2R$ ;
- **perdas parasitas no condutor dos enrolamentos** – são geradas pelas correntes parasitas induzidas nos condutores do enrolamento, dependem da grandeza da amplitude da corrente e da geometria dos condutores das bobinas.

As perdas no cobre assim como o valor da resistência, da reatância indutiva dos enrolamentos e o fator de potência são determinados a partir do ensaio de curto. Podemos utilizar as seguintes equações:

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{cc}}$$

Equação 6

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

Equação 7

$$\cos \varphi = \frac{P_{cc}}{U_{cc} \times I_{cc}}$$

Equação 8

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}$$

Equação 9

#### ➤ Perdas no ferro (núcleo magnético)

As perdas no ferro podem ser divididas em:

- **perdas por histerese** – são causadas pelas propriedades dos materiais ferromagnéticos de apresentarem um atraso entre a indução magnética ( $b$ ) e o campo magnético ( $h$ );
- **perdas por correntes parasitas** – são geradas pela circulação de correntes parasitas causadas pelo fluxo variável induzido no material ferromagnético.

O fluxo magnético variável no tempo responsável pela tensão induzida no secundário produz correntes induzidas no núcleo constituído de material ferromagnético. Essas correntes são indesejadas, pois geram perdas no transformador. Visando reduzir essas perdas, o núcleo magnético é construído de várias chapas finas de material ferromagnético, isoladas eletricamente uma das outras. Assim, a circulação de corrente induzida é reduzida, tendo como consequência a diminuição do aquecimento do equipamento.

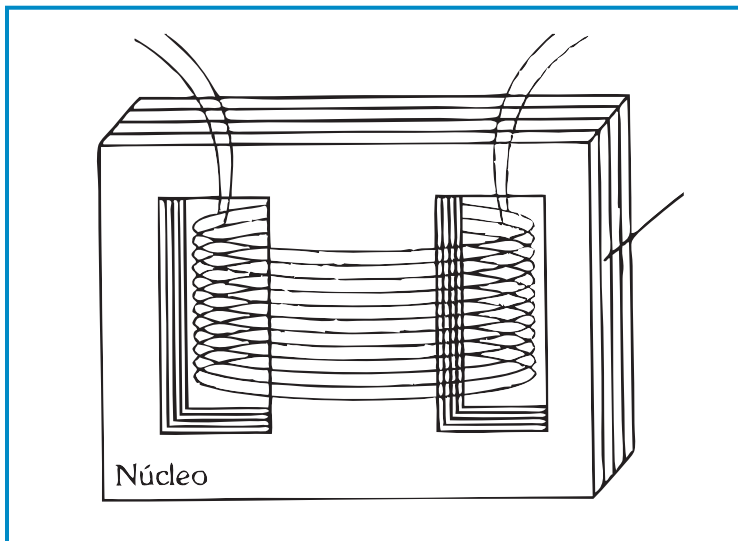


Figura 5 - Núcleo Magnético  
Fonte: Carvalho (2008, p. 38).

## SEÇÃO 4

### Cálculo do rendimento

Segundo Nascimento Jr. (2008, p. 48),

“[...] para o transformador o rendimento é a relação entre a potência entregue no secundário e a potência absorvida no primário.”

À temperatura de 20 °C o rendimento é dado por:

$$Rend = \frac{U_s \times I_s}{U_s \times I_s + P_{CU} + P_{FE}}$$

Equação 10

Refleta sobre as considerações do autor.

## SEÇÃO 5

### Ensaios

Nesta seção você conhecerá os ensaios principais a que são submetidos os transformadores, são eles:

- verificação de isolamento;
- determinação da relação de transformação;
- ensaio a vazio;
- ensaio de curto-circuito.

Os instrumentos e equipamentos necessários são: amperímetro, voltímetro, wattímetro, megôhmetro e osciloscópio.

Agora você conhecerá a aplicabilidade de cada um desses ensaios.

### ➤ Verificação de isolamento

É realizado aplicando-se uma tensão contínua entre os enrolamentos e o núcleo ou entre enrolamentos diferentes.

As correntes geradas nos materiais dielétricos em consequência

da aplicação dessa tensão dão uma noção sobre as condições do sistema de isolamento.

A interpretação dessas condições é dada pelos valores obtidos pelo megôhmetro, que indica o valor da resistência de isolamento em megohms.

Pode-se utilizar como referência a seguinte regra prática: 1 KΩ por volt.

Acompanhe o roteiro para a realização do ensaio:

1. utilizando o megôhmetro, meça a resistência de isolamento entre o primário e a carcaça;
2. meça a resistência de isolamento entre o secundário e a carcaça;
3. meça a resistência de isolamento entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário do transformador;
4. calcule o valor mínimo para a resistência de isolamento do transformador avaliado e compare com os valores obtidos no ensaio.

Os megôhmetros mais frequentemente utilizados são para 1.000, 2.500 e 5.000 volts.



Figura 6 - Megôhmetro

## ➤ Determinação da relação de transformação

Pode ser realizada pela leitura direta, com o auxílio do voltímetro, das tensões nos enrolamentos primário e secundário.

Para se determinar a relação de transformação, acompanhe qual roteiro podemos seguir:

1. identificar os enrolamentos;
2. impor ao enrolamento primário uma tensão reduzida e medir com o auxílio de um voltímetro a tensão no secundário, determinando a relação de transformação.

## ➤ Ensaio a vazio

Este ensaio permite obter os dados necessários para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente do transformador e determinar as perdas no ferro. A obtenção destes parâmetros permite prever o comportamento do transformador em condições de carga além das condições que caracterizam as condições normais de trabalho. (NASCIMENTO JR., 2008, p. 51).

Conecte os instrumentos de medição conforme o circuito apresentado na figura a seguir. Observe que o enrolamento secundário deverá estar aberto, a vazio. Acompanhe mais um roteiro para a realização do ensaio:

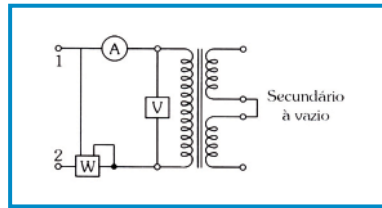


Figura 7- Ensaio a Vazio

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 51)

1. alimentar o enrolamento primário com suas tensões e frequência nominais, anote o valor da tensão aplicada;
2. a partir da leitura do wattímetro, anote o valor da potência absorvida;
3. a partir da leitura do amperímetro, anote o valor da corrente no primário.

Para a determinação dos parâmetros do transformador utilizamos as seguintes relações:

$$\cos \phi = \frac{P_o}{V_o \times I_o}$$

$$I_{Rm} = I_o \times \cos \phi$$

$$I_m = I_o \times \sin \phi$$

$$Z_m = \frac{V_o}{I_o}$$

$$R_m = \frac{V_o}{I_{Rm}}$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_m}$$

$$Q_{var} = \frac{V_o^2}{X_m}$$

$$X_m = \frac{V_1^2}{Q_{var}}$$

Equações 11, 12, 13, 14, 15, 15, 17 e 18

## ➤ Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto-circuito permite determinar as perdas no cobre nos enrolamentos primário e secundário.

Deve-se tomar cuidado com a tensão aplicada no primário do transformador, a fonte de tensão deverá estar desligada para que seja conectado o amperímetro para a medição da corrente no secundário, o posicionamento dos equipamentos de medição com relação ao equipamento a ser ensaiado deve ser conforme apresentado na figura a seguir. (NASCIMENTO JR., 2008, p. 52).

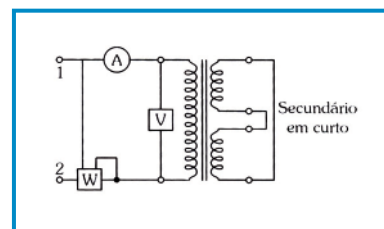


Figura 8 - Ensaio de Curto-Circuito

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 53).

Você já está compreendendo cada um desses ensaios? Então conheça mais um roteiro segundo (NASCIMENTO JR., 2008).

1. Alimente o transformador com uma tensão alternada através dos terminais 1 e 2, partindo de 0 V (fonte de tensão ajustável).



2. Eleve gradualmente o nível de tensão imposta ao primário até o ponto no qual a corrente no primário seja equivalente à corrente nominal do transformador.

3. Com as informações medidas, potência  $P_{cc}$ , tensão  $V_{cc\phi}$  e corrente, determine os parâmetros do circuito equivalente utilizando as seguintes equações:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}}$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

$$\cos \phi = \frac{P_{cc}}{V_{cc} \times I_{cc}}$$

$$R_{cc} = r1 + r2$$

Equação 19

$$r1 = r2 \times \frac{Np}{Ns}$$

Equação 20

E considerando a condição

$$r1 = r2$$

Equação 21

O total das perdas no cobre pode ser dado por:

$$P_{cu} = r1 \times I_1^2 + r2 \times I_2^2$$

Equação 22

4. Calcule a impedância percentual e a corrente de curto no secundário a partir das seguintes equações:

$$Z_{\%} = \frac{V_{cc}}{V_p} \times 100$$

Equação 23

$$I_{cc} = \frac{100}{Z_{\%}} \times I_N$$

Equação 24

5. Calcule o rendimento do transformador a 20 °C:

$$Rend = \frac{V_S \times I_S}{V_S \times I_S + P_{CU} + P_{FE}}$$

Equação 25

### Exemplo 1

O transformador de tensão nominal 440/220 V, 3,0 kVA, 60 Hz apresentou os seguintes resultados nos ensaios: curto-circuito (18 W, 24 VAR) e a vazio (36 W e 24 VAR). Calcule os valores dos parâmetros do circuito equivalente aproximado referente ao primário.

$$X_m = \frac{V_1^2}{Q_a}$$

$$X_m = \frac{440^2}{24} = 8,07K\Omega$$

$$R_m = \frac{V_1^2}{P_a}$$

$$R_m = \frac{440^2}{36} = 5,38K\Omega$$

$$X_b = \frac{Q_a}{I_1^2}$$

$$X_b = \frac{24}{\left(\frac{3000}{440}\right)^2} = 0,52\Omega$$

$$R_b = \frac{P_a}{I_1^2}$$

$$R_b = \frac{18}{\left(\frac{3000}{440}\right)^2} = 0,39\Omega$$

Chegamos ao final da primeira unidade de estudos, todas as informações que você recebeu se referem à utilização do transformador monofásico, seus princípios, como calcular o rendimento, as perdas do transformador e aplicabilidade dos ensaios.



# Unidade de estudo 2

## Seções de estudo

- Seção 1 - Introdução
- Seção 2 - Aspectos construtivos
- Seção 3 - Grau de proteção
- Seção 4 - Operação de transformadores trifásicos em paralelo
- Seção 5 - Divisão de cargas entre transformadores
- Seção 6 - Determinação da tensão nominal
- Seção 7 - Polarização do transformador
- Seção 8 - Ligação em transformadores trifásicos
- Seção 9 - Ensaio em transformadores trifásicos
- Seção 10 - Placa de identificação

# Transformadores Trifásicos

## SEÇÃO 1

### Introdução

Você sabia que o transformador trifásico é utilizado em grande escala nos sistemas de transmissão, distribuição e na indústria em geral?

Após a geração de energia os transformadores trifásicos são utilizados para elevar a tensão nos pontos iniciais das linhas de transmissão com a subsequente utilização para a redução das tensões para a distribuição e utilização final da energia elétrica trifásica.

## SEÇÃO 2

### Aspectos construtivos

Podemos definir um transformador trifásico como um grupo com três transformadores monofásicos no qual os três primários e os três secundários estarão operando simultaneamente, observe na figura :

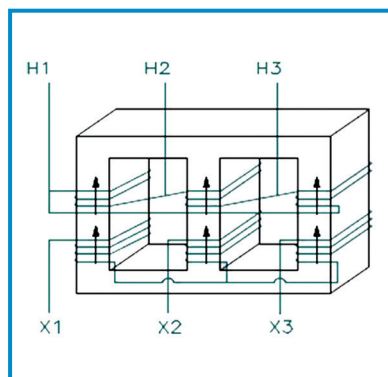


Figura 9 - Transformador Trifásico  
Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 57).

Para o transformador apresentado, existem diversas formas de ligação que serão descritas ao longo desta unidade. Para a realização das ligações, estes equipamentos possuem caixas de ligação e placas de bornes. Para a identificação dos terminais do primário será utilizado o número do terminal precedido da letra “H” e para os terminais do secundário, o número precedido da letra “X”.

Um aspecto muito importante para garantir o correto funcionamento do transformador é uma boa eficiência na dissipação do calor gerado pelo mesmo. Existem várias formas de se dissipar o calor gerado pelo equipamento, geralmente em transformadores com maiores potências. Os enrolamentos estão submersos em óleo isolante que melhoram a condução de calor e em contato com as aletas aumentam a eficiência do sistema de dissipação, em transformadores de menores potências os enrolamentos estão em contato direto com o ar.



Figura 10 - Transformador Trifásico  
Fonte: Weg S.A. ([200-?]).

## SEÇÃO 3

### Grau de proteção

Conforme as condições e características do local em que será instalado o equipamento elétrico e de sua acessibilidade, deve ser determinado o grau de proteção. Sendo assim, um equipamento que seja instalado em um local aberto onde pode ocorrer o gotejamento de água sob diversos ângulos do equipamento, o mesmo deve possuir um invólucro que garanta o seu funcionamento sem que ocorra a penetração de água (WEG S.A. [200-?]).

Os graus de proteção para equipamentos elétricos são definidos pela NBR 6146 por meio das letras características IP, seguidas por dois algarismos. Conheça a seguir.

1º Algarismo	
Algarismo	Indicação
0	Sem proteção
1	Corpos estranhos de dimensões acima de 50 mm
2	Corpos estranhos de dimensões acima de 12 mm
3	Corpos estranhos de dimensões acima de 2,5 mm
4	Corpos estranhos de dimensões acima de 1,0 mm
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor
6	Totalmente protegido contra poeira

Quadro 1 - Graus de proteção contra a penetração de objetos sólidos estranhos indicados pelo primeiro numeral característico

2º Algarismo	
Algarismo	Indicação
0	Sem proteção
1	Pingos de água na vertical
2	Pingos de água até a inclinação de 15° com a vertical
3	Água de chuva até a inclinação de 60° com a vertical
4	Respingos de todas as direções
5	Jatos de água de todas as direções
6	Água de vergalhões
7	Imersão temporária
8	Imersão permanente

Quadro 2 - Graus de proteção contra a penetração de água indicados pelo segundo numeral característico

A associação desses dois algarismos, ou seja, entre os critérios de proteção estão apresentados no quadro a seguir.

<b>IP00</b>	Não tem	Não tem	2º Algarismo
<b>IP02</b>	Não tem	Não tem	2º Algarismo
<b>IP11</b>	Toque acidental com a mão	Corpos sólidos estranhos de dimensões de 50 mm	2º Algarismo
<b>IP12</b>	Não tem	Não tem	2º Algarismo
<b>IP13</b>	Não tem	Não tem	2º Algarismo
<b>IP21</b>	Toque com os dedos	Corpos sólidos estranhos de dimensões de 12 mm	2º Algarismo
<b>IP22</b>	Não tem	Não tem	2º Algarismo
<b>IP23</b>	Não tem	Não tem	2º Algarismo
<b>IP44</b>	Toque com ferramenta	Corpos estranhos sólidos de dimensões acima de 1 mm	2º Algarismo
<b>IP54</b>	Proteção completa contra toque	Proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	2º Algarismo
<b>IP55</b>	Proteção completa contra toque	Proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	2º Algarismo
<b>IP(W)55</b>	Proteção completa contra toque	Proteção contra acúmulo de poeiras nocivas	2º Algarismo

Quadro 3 - Grau de proteção

## SEÇÃO 4

### Operação de transformadores trifásicos em paralelo

Em sistemas de potência para o fornecimento de energia, a operação paralela de transformadores se faz necessária para a elevação da potência fornecida e para suprir uma eventual pane em um dos transformadores, mesmo à carga reduzida.

Dois ou mais transformadores estarão em paralelo quando ligados ao mesmo sistema, tanto no primário quanto no secundário (paralelismo de rede e barramento).

Veja que algumas condições são necessárias para a operação em paralelo de transformadores (WEG S.A., [200-?], p. 178):

1. igualdade na defasagem angular para que não ocorra curto-circuito decorrente da diferença de potencial gerada entre as mesmas fases de transformadores diferentes;
2. igualdade na impedância percentual para que não ocorra perda de potência em consequência de um equipamento enxergar o outro como uma carga.

## SEÇÃO 5

### Divisão de cargas entre transformadores

A potência fornecida individualmente pelos transformadores operando em um mesmo sistema e a tensão média de curto-circuito (%) são dadas pelas expressões (WEG S.A., [200-?], p. 179):

$$P_{Fn} = \frac{P_{Nn} \cdot EM \cdot P_c}{\sum_1^n P_{Nn} \cdot E_{1n}}$$

Equação 26

$$EM = \frac{\sum_1^n P_{Nn}}{\sum_1^n \left( \frac{P_{Nn}}{E_n} \right)}$$

Equação 27

Acompanhe a descrição das expressões:

$P_{Nn}$  = potência fornecida à carga pelo n-ésimo transformador;

$P_{Nn}$  = potência nominal do n-ésimo transformador;

$EM$  = tensão média de curto-circuito (%);

$E_n$  = tensão de curto-circuito do n-ésimo transformador (%);

$P_c$  = potência solicitada pela carga (KVA).

### Exemplo

Calcular as potências fornecidas individualmente pelos transformadores, PN1 = 750 kVA, PN2 = 500 kVA, PN3 = 1.000 kVA, cujas tensões de curto-circuito são: E1 = 4,7%, E2 = 4,9%, E3 = 5,3% e a potência solicitada pela carga é de 2.250 kVA.

$$EM = \frac{750 + 500 + 1000}{\frac{750}{4,7} + \frac{500}{4,9} + \frac{1000}{5,3}} = 4,997\%$$

$$P_{F1} = \frac{750}{750 + 500 + 1000} \cdot \frac{4,997}{4,7} \cdot 2250 \quad P_{F1} = 797,4\text{kVA}$$

$$P_{F2} = \frac{500}{750 + 500 + 1000} \cdot \frac{4,997}{4,9} \cdot 2250 \quad P_{F2} = 509,9\text{[kVA]}$$

$$P_{F3} = \frac{1000}{750 + 500 + 1000} \cdot \frac{4,997}{5,3} \cdot 2250 \quad P_{F3} = 942,8\text{kVA}$$

Observe que o transformador de 750 kVA está sobrecarregado, enquanto o transformador de 1.000 kVA, que possui a maior impedância, está operando abaixo da sua potência nominal.

Prepara-se para a próxima seção!

## SEÇÃO 6

### Determinação da tensão nominal

Para aplicação industrial poderemos ter até quatro níveis de tensão, da seguinte forma:

#### Subestações de entrada:

primário = 72,5 kV e 138 kV  
secundário = 36,2 kV, 24,2 kV ou 13,8 kV

#### Subestações de distribuição:

primário = 36,2 kV - 24,2 kV ou 13,8 kV  
secundário = 440/254 V, 380/220 V ou 220/127 V

Para potências maiores do que 3 MVA é indicado baixar a tensão para um nível intermediário (6,9 kV, 4,16 kV ou 2,4 kV), pois o equipamento para a redução de potência de 3 MVA para tensões de uso final possui um custo consideravelmente elevado (deve suportar altas correntes).

A determinação da tensão do secundário depende de alguns fatores, dentre os principais podemos citar:

- econômicos** – a tensão de 380/220 V requer seções menores dos condutores para uma mesma potência;
- segurança** – a tensão de 220/127 V é mais segura com relação a contatos acidentais.

De uma forma geral, podemos dizer que para instalações nas quais equipamentos como motores, bombas, máquinas de solda e outras máquinas constituem a maioria da carga, deve-se usar

380/220 V, e para instalações de iluminação e força de residências, deve-se adotar 220/127 V (WEG S.A., [200-?], p. 150).

Na NBR 5440 da ABNT encontramos a padronização das tensões primárias e secundárias.

Pronto para seguir adiante?

## SEÇÃO 7

### Polarização do transformador

Polarizar o transformador consiste em distribuir as bobinas de modo que as mesmas tenham a polaridade determinada eliminando o risco de subtração de tensão entre elas.

Entre os métodos mais utilizados para a execução da polarização, podem-se citar: polarização CA e polarização por golpe indutivo.

O método mais simples é a polarização por golpe indutivo, é aplicado separadamente em cada um dos três enrolamentos do transformador, consiste na aplicação de uma tensão contínua no primário e na observação do galvanômetro no secundário, o mesmo padrão de resposta deve ser dado em todos os enrolamentos do secundário (NASCIMENTO JR., 2008, p. 61).

Para a polarização CA é necessária apenas uma fonte de tensão CA ajustável, esse método consiste em alimentar um dos enrolamentos com baixa tensão e ligar os demais enrolamentos em série até que se tenha a soma das tensões em cada enrolamento.

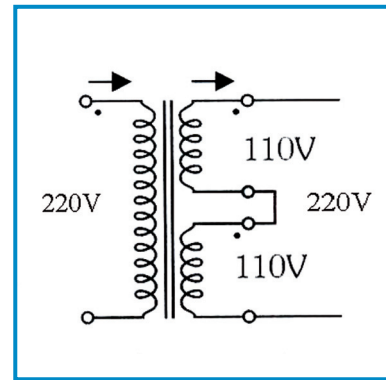


Figura 11 - Polarização do Transformador

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 61).

Pela figura apresentada você pode verificar que se as polaridades forem ligadas em série invertidas, a somatória das tensões seria 0 V.

## SEÇÃO 8

### Ligação em transformadores trifásicos

Os transformadores trifásicos geralmente recebem identificação nos terminais de alta tensão iniciando com a letra “H” e os terminais de baixa tensão recebem identificação iniciando com a letra “X”. A identificação das fases é normalizada da seguinte forma:

Fase R → (1;4) e (7;10);  
Fase S → (2;5) e (8;11);  
Fase T → (3;6) e (9;12).

Para equilibrar a corrente, o transformador de distribuição tem seu enrolamento primário conectado em triângulo. A seguir você conhecerá as ligações padrões estrela e triângulo.

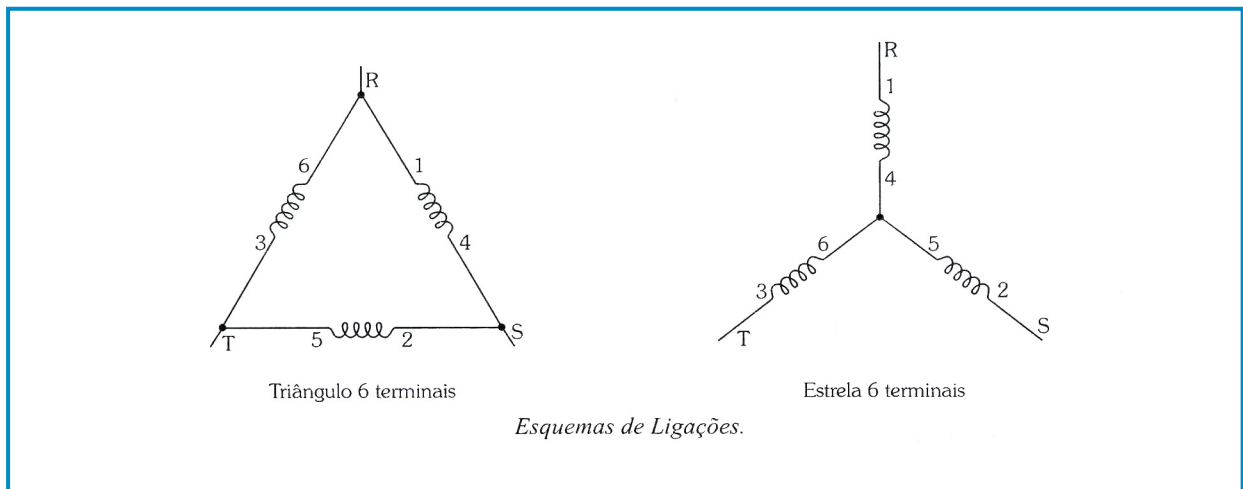


Figura 12 - Esquema de Ligação

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 63).

As ligações devem ser realizadas sempre respeitando os padrões normalizados e a numeração nos terminais. Para transformadores com doze terminais temos ainda as seguintes ligações:

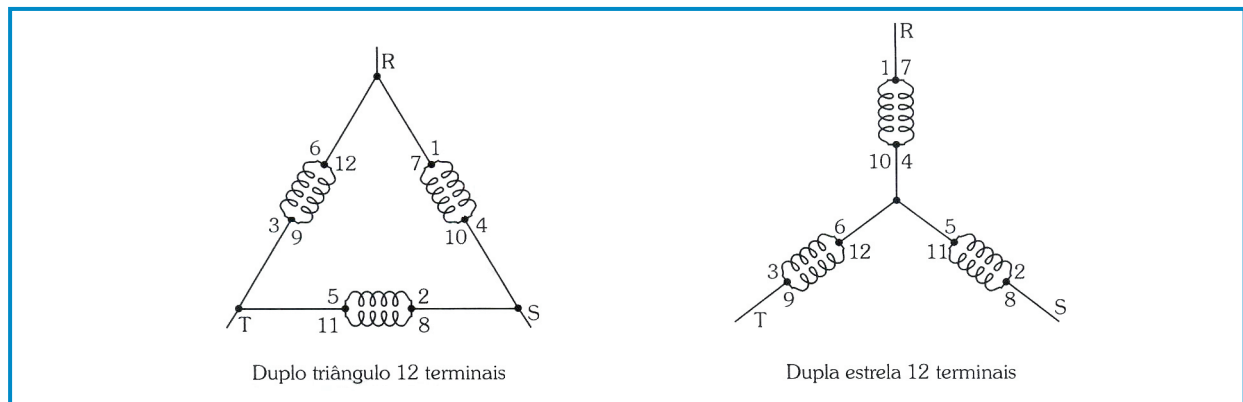


Figura 13 - Ligações  $\Delta\Delta$  e  $YY$ : 12 Cabos

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 63).

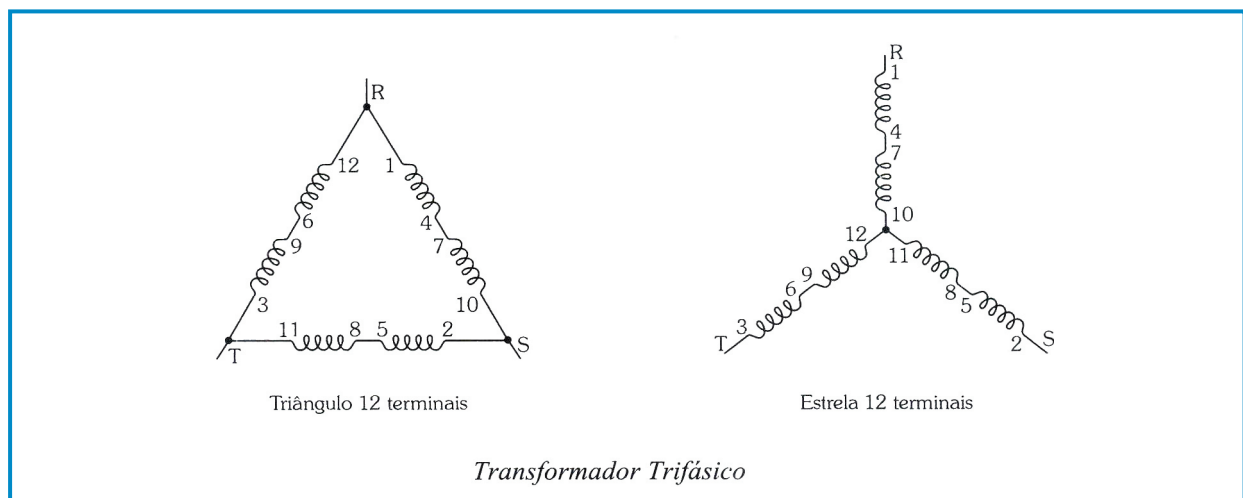


Figura 14 - Circuito Interno de Faróis de um Veículo

Fonte: Revista Carros (2006, p. 23).

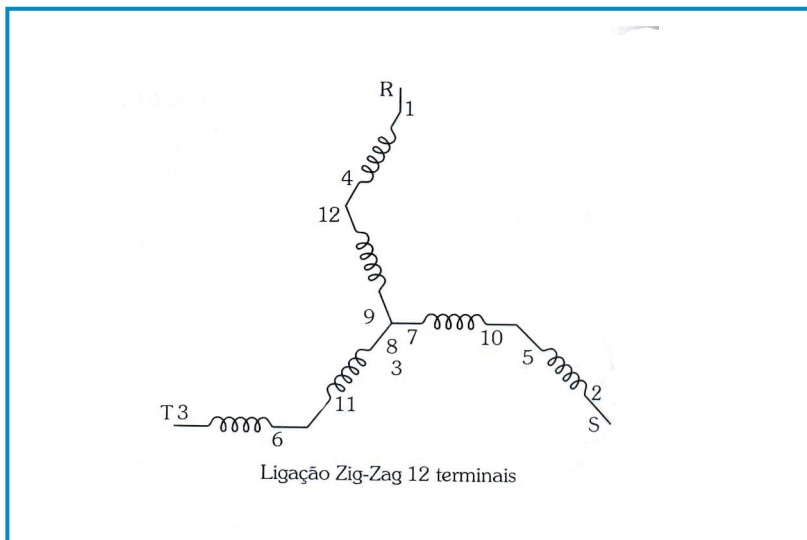


Figura 15 - Esquema de Ligações: 12 Terminais  
 Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 64).

## SEÇÃO 9

### Ensaio em transformadores trifásicos

Você já ouviu falar em ensaio de polarização por golpe indutivo?

O ensaio do golpe indutivo é o ensaio mais simples para a determinação da polaridade das bobinas, no entanto, exige que se tenha um galvanômetro para que seja indicado o sentido da corrente e uma fonte de corrente CC com um botão de pulso em série para que possibilite a aplicação de um pulso de tensão no primário.

É importante salientar que o pulso de tensão deve ser aplicado no lado de alta para o lado de baixa tensão, pois caso contrário existe o risco de descarga elétrica. Após aplicado o golpe, o sentido da corrente indicado no galvanômetro deve ser o mesmo para todos os enrolamentos no lado de menor tensão e os terminais de mesmo potencial devem ser identificados. Observe na figura a seguir:

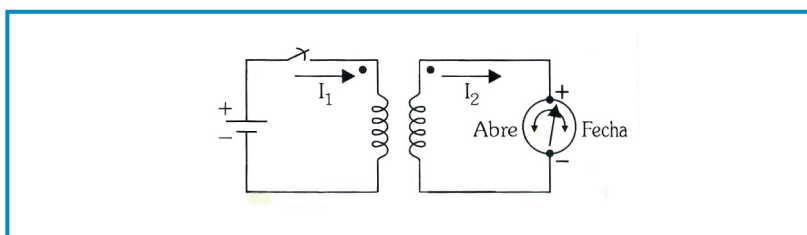


Figura 16 - Ensaio de Polarização por Golpe Indutivo  
 Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 72).

## SEÇÃO 10

### Placa de identificação

As principais características dos equipamentos elétricos estão contidas na placa de identificação. As informações que deverão constar na placa de identificação são importantes para a correta manutenção, instalação e manobra do equipamento e são normalizadas pela NBR 5356.

O material da placa poderá ser alumínio ou aço inoxidável.

Na figura a seguir encontramos um exemplo de placa de identificação de um transformador trifásico, triângulo-estrela (Dy).

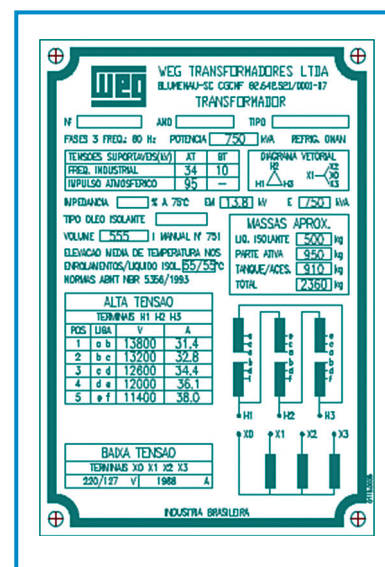


Figura 17 - Placa de Identificação  
 Fonte: Weg S.A. (2000, p. 201).



Segundo a Weg S.A. ([200-?]), as informações contidas na placa são normalizadas (NBR 5356) e representam um resumo das características do equipamento. Nela encontramos:

- a. nome e demais dados do fabricante;
- b. número da série de fabricação;
- c. mês e ano de fabricação;
- d. potência do transformador em KVA;
- e. norma utilizada para fabricação;
- f. impedância de curto-circuito em percentagem;
- g. tipo de óleo isolante;
- h. tensões nominais do primário e do secundário;
- i. correntes nominais do primário e do secundário;
- j. diagrama de ligação dos enrolamentos do primário e do secundário com identificação das derivações;
- k. identificação do diagrama fasorial quando se tratar de transformadores trifásicos e polaridade, quando monofásico;
- l. volume total do líquido isolante do transformador em litros;
- m. massa total de um transformador em Kg;
- n. número da placa de identificação;
- o. tipo para identificação.

Em transformadores maiores que 500 KVA, ou quando o cliente exigir, a placa de identificação deverá conter outros dados como:

- a. informações sobre transformadores de corrente, se os tiver;
- b. dados de perdas e corrente de excitação;
- c. pressão que o tanque suporta;
- d. qualquer outra informação que o cliente exigir.

Os caminhos do conhecimento são inesgotáveis, sua aprendizagem nesta unidade proporcionou conhecimento em detalhes sobre o funcionamento do transformador trifásico. Na próxima unidade novos conteúdos despertarão sua atenção.

# Unidade de estudo 3

## Seções de estudo

- Seção 1 - Autotransformadores
- Seção 2 - Transformador de potencial
- Seção 3 - Transformador de corrente



# Outros Transformadores

## SEÇÃO I

### Autotransformadores

Você já conhece algo sobre os autotransformadores?

Os autotransformadores são equipamentos muito parecidos com transformadores monofásicos, apresentam como grande diferencial seu sistema de bobinas, pois no autotransformador não temos mais as bobinas do primário e as bobinas do secundário com dois enrolamentos separados, o mesmo enrolamento atuará como primário e secundário.

Um fator determinante para a grande utilização dos autotransformadores é o seu custo reduzido em relação ao transformador monofásico, pois exige menos cobre e menos ferro, no entanto possui um ponto negativo que é a perda da isolação elétrica entre a entrada e a saída, pois os caminhos de entrada e saída são os mesmos (SENAI, 1980).

Conheça a seguir um esquema simplificado do autotransformador.

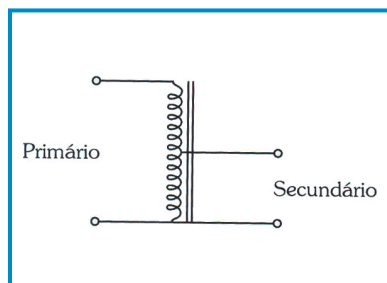


Figura 18 - Esquema do Autotransformador Simples

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 75).

De acordo com a figura você pode observar que nas seções do mesmo enrolamento não circulam correntes de mesma grandeza, já que a corrente gerada por indução no segmento do secundário  $I_2$  sobe, somando-se com a corrente  $I_1$  que desce proveniente do enrolamento superior do primário, e ambas passam pela carga retornando à fonte pelo fio comum.

Portanto, há uma corrente  $I_1$  que vem do primário, partindo de R (L1), passa pelos pontos A e B, pela carga, pelo ponto C e segue ao ponto S (L2) e é a corrente que passa pela carga, por condução.

A corrente  $I_2$  circula de C até B, passa pela carga e vai a C novamente e é a corrente induzida. O seu circuito é restrito à bobina e à carga. Ela não chega a R ou S.

Os autotransformadores são indicados para aplicações nas quais não seja exigida a isolação elétrica entre primário e secundário e que a diferença entre as tensões do primário e do secundário não ultrapasse 50%. Uma aplicação muito comum para autotransformadores são as chaves compensadoras utilizadas nas partidas de motores (SENAI, 1980).

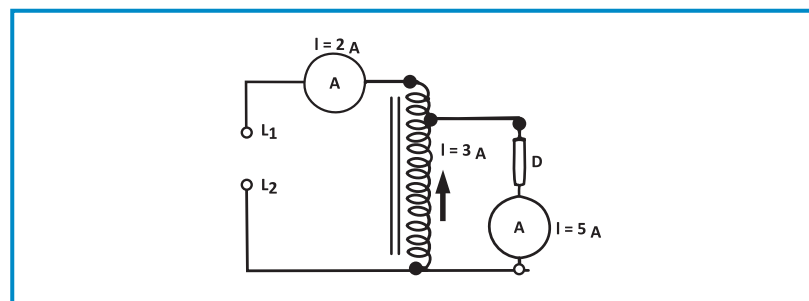


Figura 19 - Autotransformador

Fonte: SENAI (1980, p. 19).

### Exemplo 1

Se a corrente que entra for de 2 A, o autotransformador poderá induzir uma corrente de, por hipótese, 3 A. Assim, a corrente na carga (D) conforme a figura a seguir será de 5 A. A corrente da carga é a soma de  $I_1 + I_2$  ou  $2A + 3A = 5A$ .

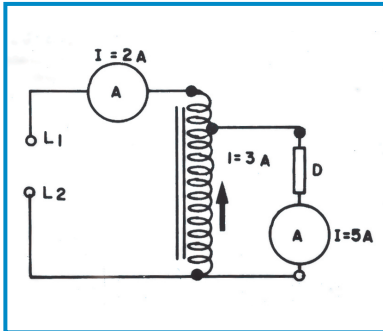


Figura 20 - Comportamento da Corrente no Autotransformador

Fonte: SENAI (1980, p. 45).

Nesse exemplo, a corrente foi mais que dobrada. Mas foi necessária apenas uma bobina, por isso, o núcleo deve ter capacidade apenas para a **corrente induzida**. Num transformador comum, seria necessário o dobro de secção do núcleo para a mesma carga. Daí o fato de esse transformador ser econômico quanto ao emprego de materiais (SENAI, 1980).

### Exemplo 2

Se a bobina tem no primário 200 espiras para 100 V, e você deseja no secundário 50 V, observando a figura a seguir, o número de espiras no secundário pode ser calculado da seguinte forma:

Calculando:

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} \rightarrow \frac{100}{200} = \frac{50}{x}$$

$$x = \frac{50 \cdot 200}{100} \rightarrow x = 100 \text{ espiras}$$

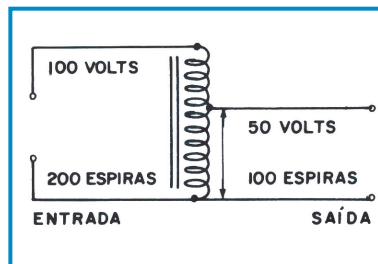


Figura 21: Autotransformador

Fonte: SENAI (1980, p. 47).

Portanto, para obter a tensão desejada (50 V) no secundário, deve-se ter uma derivação com 100 espiras (SENAI, 1980).

## SEÇÃO 2

### Transformador de potencial

O transformador de potencial não difere dos transformadores comuns com núcleos de ferro, seu enrolamento primário é projetado para operar sob condições de tensão e frequência específicas onde será instalado e geralmente seu enrolamento secundário é projetado para tensões nominais de 115 V.

O transformador de potencial é muito utilizado em sistemas de proteção para sistemas de potência, nessa aplicação ele tem a função de abaixar o nível de tensão para que o voltímetro possa ser utilizado para monitoramento de tensão. Também é aplicado nos sistemas de proteção para o acionamento da bobina de gatilho de disjuntores de alta tensão para que os mesmos não sejam comandados em alta tensão (NASCIMENTO JR., 2008).

Apresentam correntes em vazio consideravelmente maiores do que os transformadores de potência e geralmente a defasagem entre corrente e tensão no secundário é muito pequena em decorrência da natureza ôhmica da impedância das cargas (instrumentos de medição).

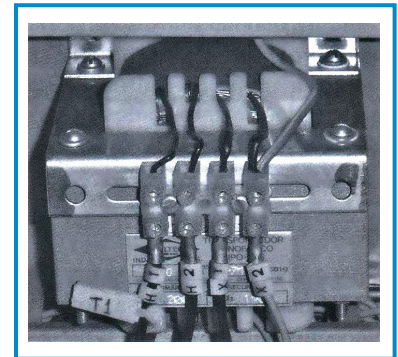


Figura 22 - Transformador de Potencial  
Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 78).

## SEÇÃO 3

### Transformador de corrente

O transformador de corrente opera com seu enrolamento primário intercalado em série com um condutor de um sistema de potência, apresenta algumas especialidades que exige algumas considerações complementares em relação aos transformadores de potencial.

O transformador de potencial tem o comportamento de uma fonte de tensão, já o transformador de corrente se comporta como uma fonte de corrente, a existência de um transformador de corrente em um condutor do sistema praticamente não altera a corrente  $I_p$  conforme apresentado na figura a seguir, independentemente da sua carga (instrumento de medição) (JORDÃO, 2002).

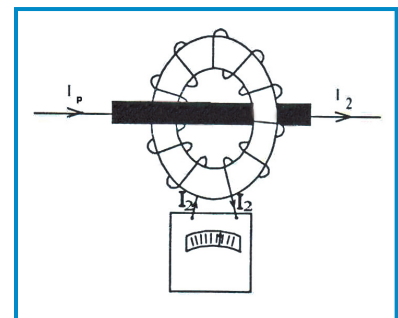


Figura 23 - Transformador de Corrente  
Fonte: Jordão (2002, p. 12).

Diferentemente dos transformadores de potencial, o transformador de corrente não pode operar com seus secundários em circuito aberto, pois caso ocorra, toda a corrente  $I_p$  passaria a atuar como corrente magnetizante, gerando altos valores de induções e causando excessivas perdas e altas temperaturas no ferro, tendo como consequência a degradação do material isolante do equipamento.

As principais aplicações para o transformador de corrente são: proteção e medição de corrente.

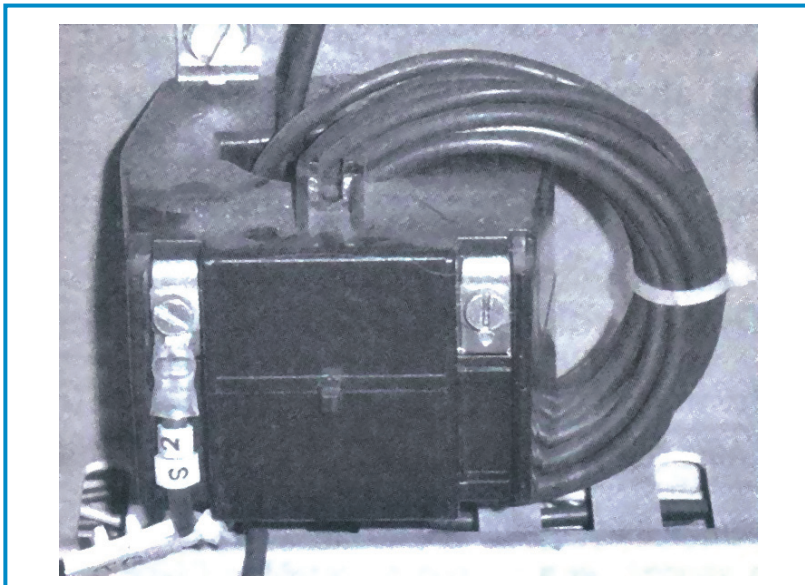


Figura 24 - Transformador de Corrente para Medição  
Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 79).

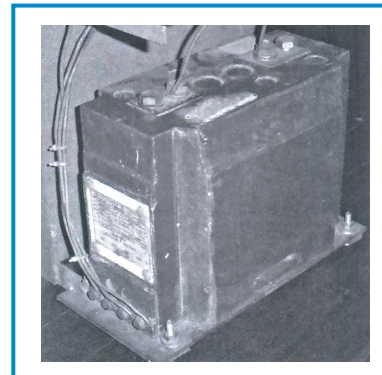


Figura 25 - Transformador de Corrente para Proteção  
Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 79).

Existem diversas relações de transformação como, por exemplo, em um sistema no qual a corrente é da ordem de 1.000 A e pode ser reduzida para 10 A, essa corrente será proporcional à corrente do sistema. Os fabricantes de TC disponibilizam equipamentos com diversas relações de transformação.

A figura a seguir apresenta um modelo matemático para o TC.

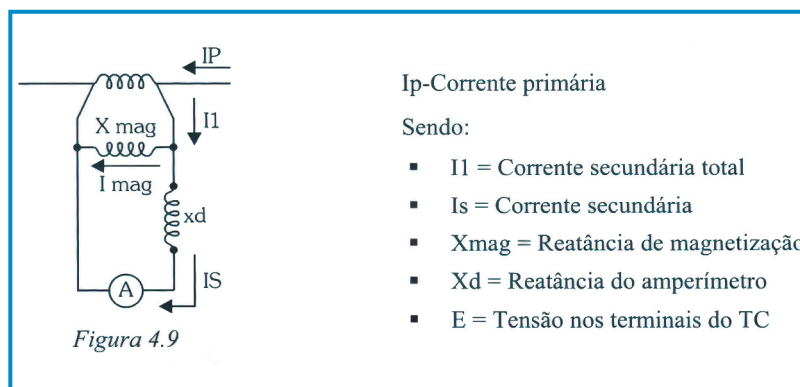


Figura 26 - Transformador de Corrente  
Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 79).

$I_p$ -Corrente primária

Sendo:

- $I_1$  = Corrente secundária total
- $I_s$  = Corrente secundária
- $X_{mag}$  = Reatância de magnetização
- $X_d$  = Reatância do amperímetro
- $E$  = Tensão nos terminais do TC

Acompanhe com atenção o exemplo.

### Exemplo 3

Considerando um TC instalado com uma corrente de 1.000 A, com corrente no secundário de 10 A (relação de 1.000/10 A). Monitorando as correntes temos o seguinte resultado:

$$E = 20 \text{ V}, I_{\text{mag}} = 0,2 \text{ A}, I_s = 9,8 \text{ A, lido no amperímetro.}$$

$$\text{Calculando, temos: } X_t = X_d // X_{\text{mag}} = E / I_s = 2,04 \Omega.$$

O instrumento de medição de corrente ligado ao TC deve ser instalado de acordo com a figura a seguir, sendo o botão b1 responsável pelo direcionamento da corrente para o amperímetro, possibilitando a sua leitura. O amperímetro também pode ser diretamente ao TC e essa conexão deve ser realizada com o equipamento desligado (JORDÃO, 2002).

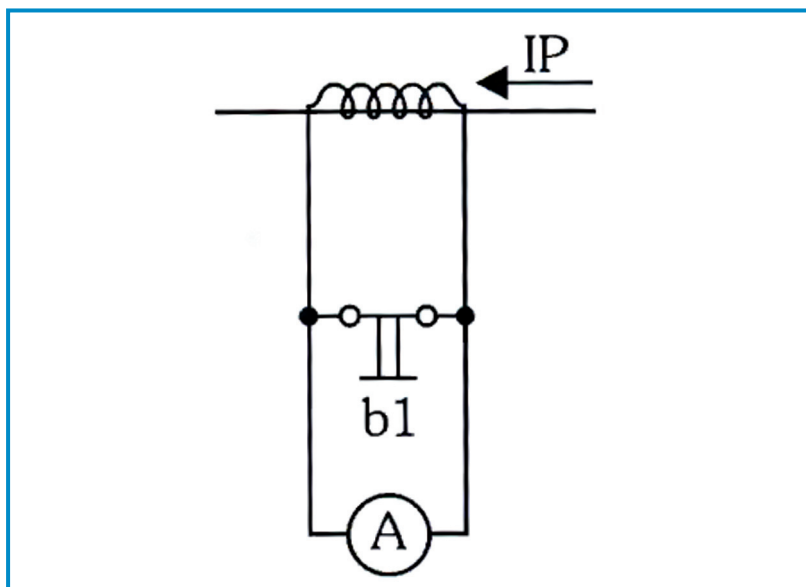


Figura 27 - Instrumento de Medição Conectado ao Transformador

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 80).

Essa unidade trouxe informações importantíssimas sobre transformadores e autotransformadores, suas aplicações por meio de exemplos. Isso significativamente transforma sua aprendizagem, garantido aplicabilidade segura na sua área de atuação profissional.



# Unidade de estudo 4

## Seções de estudo

- Seção 1 - Introdução
- Seção 2 - Princípios de funcionamento
- Seção 3 - Aspectos construtivos
- Seção 4 - Geração de corrente trifásica
- Seção 5 - Ligações no sistema trifásico
- Seção 6 - Tensão nominal múltipla
- Seção 7 - Comportamento do gerador vazio e sob carga
- Seção 8 - Características dos rotores de geradores
- Seção 9 - Reatância síncrona
- Seção 10 - Regulação de tensão
- Seção 11 - Perdas e eficiência
- Seção 12 - Potência em máquinas de pólos salientes
- Seção 13 - Sincronização



# Geradores de Corrente Alternada

## SEÇÃO 1 Introdução

A característica principal de um gerador elétrico é transformar energia mecânica em elétrica. Uma máquina síncrona é uma máquina CA na qual sua velocidade é proporcional à frequência de sua armadura. O seu rotor em conjunto com o campo magnético criado giram na mesma velocidade ou sincronismo que o campo magnético girante. Os geradores de corrente alternada também são chamados de alternadores e praticamente toda energia elétrica consumida nas residências e indústrias é fornecida pelos alternadores das usinas que produzem energia elétrica. Agora você conhecerá como é o funcionamento de um gerador CA. Vamos em frente?

## SEÇÃO 2 Princípios de funcionamento

Visando simplificar a análise do funcionamento de um gerador CA, também chamado de alternador, analisaremos inicialmente o modelo simplificado composto por uma única espira que se encontra imersa em um campo magnético gerado por um ímã permanente, conforme apresentado na figura a seguir (JORDÃO, 2002).

Com o movimento relativo da bobina em relação ao campo magnético é gerado um valor instantâneo da força eletromotriz (**f.e.m**) induzida no condutor, conectado a dois anéis ligados ao circuito externo por meio de escovas.

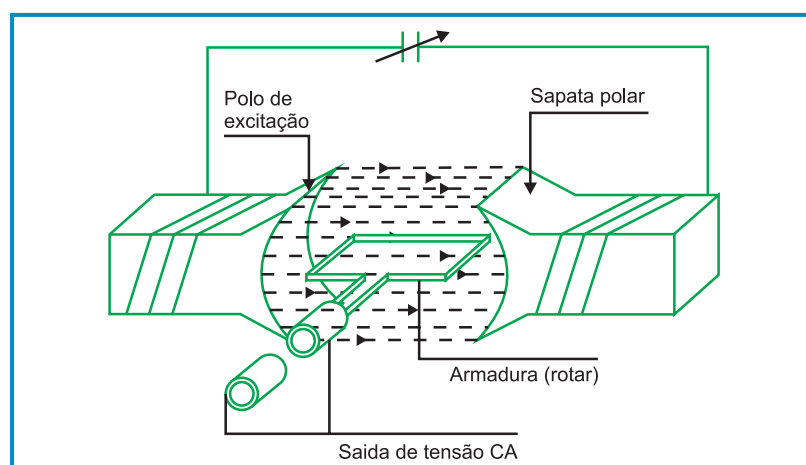


Figura 28 - Esquema de Funcionamento de um Gerador Elementar (Armadura Girante)

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 45).

Considerando que a bobina gire com uma velocidade constante dentro do campo magnético “B” com velocidade “V”, o valor da f.e.m. induzida no condutor dado pela Segunda Lei de Indução de Faraday é tida como:

$$e = B.l.v.\text{sen}(\theta)$$

Equação 28

Sendo:

- $e$  = força eletromotriz;
- $B$  = indução do campo magnético;
- $l$  = comprimento de cada condutor;
- $v$  = velocidade linear;
- $\theta$  = ângulo formado entre  $B$  e  $v$ .

Para um equipamento composto por  $N$  espiras temos:

$$e = B.l.v.\text{sen}(\theta).N$$

Equação 29

Com um formato conveniente da sapata polar, pode-se conseguir uma distribuição senoidal das induções e, dessa forma, a f.e.m. também terá um comportamento senoidal ao longo do tempo. A figura a seguir apresenta um lado da bobina no campo magnético em doze posições diferentes, variação angular de  $30^\circ$  e na mesma figura ainda podemos analisar o comportamento das induções em relação à posição angular (JORDÃO, 2002).

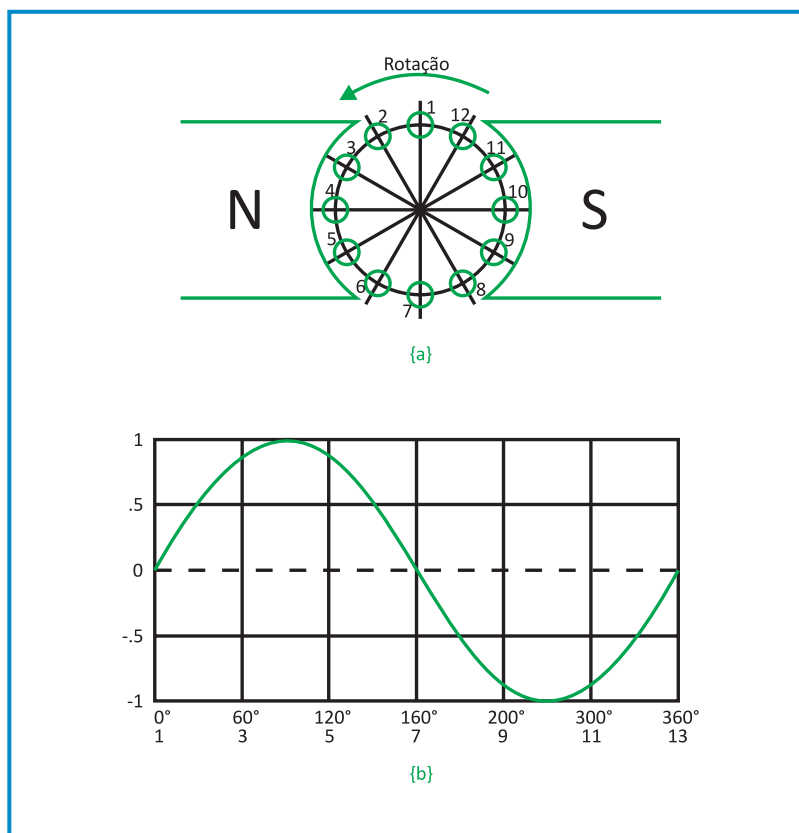


Figura 29 - Distribuição da Indução Magnética sob um Polo

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 46).

Na figura a seguir você tem o esquema de funcionamento de um gerador elementar com armadura fixa, no qual a tensão de armadura é extraída do enrolamento de armadura sem passar pelas escovas. Geralmente para geradores com esta forma construtiva a potência de excitação gira em torno de 5% da potência nominal.

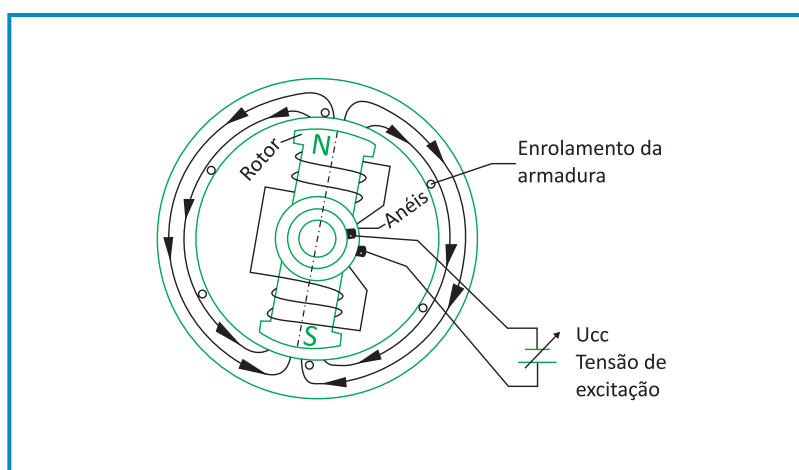


Figura 30 - Esquema de Funcionamento de um Gerador Elementar (Armadura Fixa)

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 46).

As máquinas podem ser projetadas com um enrolamento composto por um ou mais pares de polos que serão sempre distribuídos alternadamente (um norte e um sul). Considerando uma máquina com um par de polos, a cada giro das espiras temos um ciclo (JORDÃO, 2002).

A frequência de uma máquina síncrona em ciclos por segundo (hertz) é dada por:

$$f = \frac{p \cdot n}{120} [\text{Hz}]$$

Sendo:

- $f$  = frequência (Hz);
- $p$  = número de polos;
- $n$  = rotação síncrona (rpm).

Equação 30

Para que se tenha a formação de pares de polos, o número de polos terá de ser sempre par. Na tabela a seguir são apresentadas as velocidades síncronas em função das polaridades e das frequências mais usuais.

Tabela 1: Velocidades síncronas

Número de polos	60 Hz	50 Hz
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750
10	720	600

Os assuntos nesta unidade precisam muito da sua atenção para que você possa compreender como funciona um gerador CA, preparado para continuar? Então vamos juntos.

## SEÇÃO 3

### Aspectos construtivos

No gerador CA podemos ter uma bobina rotacionada dentro de um campo magnético ou podemos ter o elemento responsável pela excitação (gerador de campo magnético) sendo rotacionado e fazendo com que surja uma tensão induzida na bobina fixa no estator do gerador. Os contatos responsáveis pela conexão entre a parte girante do gerador e a parte fixa são feitos por meio de escovas. O contato entre as escovas e os anéis, que são fixos no eixo, é contínuo e o número de conjuntos anéis/escovas é equivalente ao número de fases geradas. O detalhamento dos anéis você pode observar na figura a seguir.

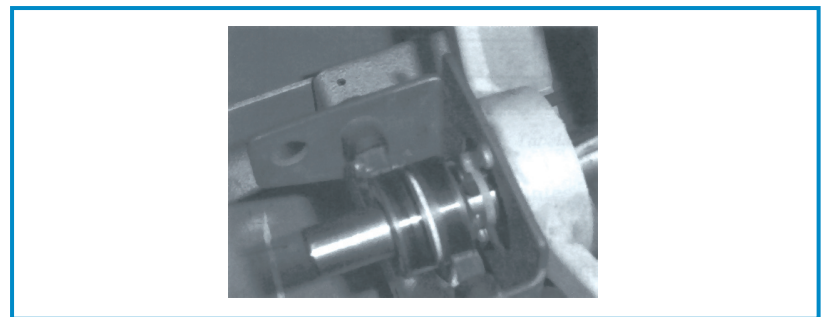


Figura 31 - Conjunto de anéis/escovas

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 168).

## SEÇÃO 4

### Geração de corrente trifásica

Você sabia que a associação de três sistemas monofásicos com uma defasagem entre si de 120° compõe um sistema trifásico? Observe a figura:

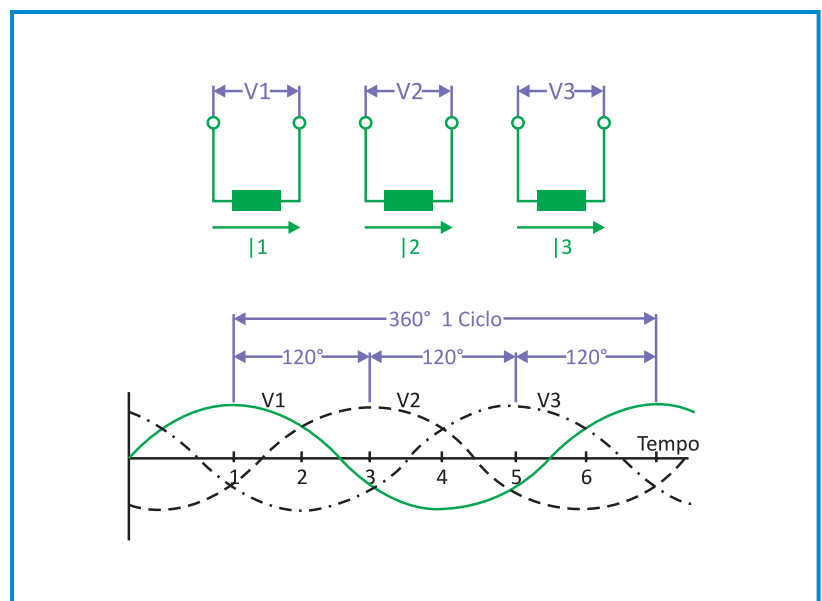


Figura 32 - Sistema Trifásico

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 47).

Para se obter o equilíbrio do sistema, ou seja,  $V_{L1} = V_{L2} = V_{L3}$ , cada bobina deverá ser composta de número de espiras igual.

Existem duas formas usuais de se obter um sistema trifásico composto por três sistemas monofásicos, os esquemas de ligação estrela e ligação triângulo, os quais você estudará em detalhes na sequência.

## SEÇÃO 5

### Ligações no sistema trifásico

#### ➤ Ligação triângulo

As tensões e correntes de fase são as tensões e correntes de cada um dos sistemas monofásicos analisados e são representadas por  $V_F$  e  $I_F$ . Ligando os sistemas monofásicos conforme a figura a seguir teremos as tensões e correntes entre quaisquer duas fases denominadas de tensões e correntes de fase e são representadas por  $V_L$  e  $I_L$ .

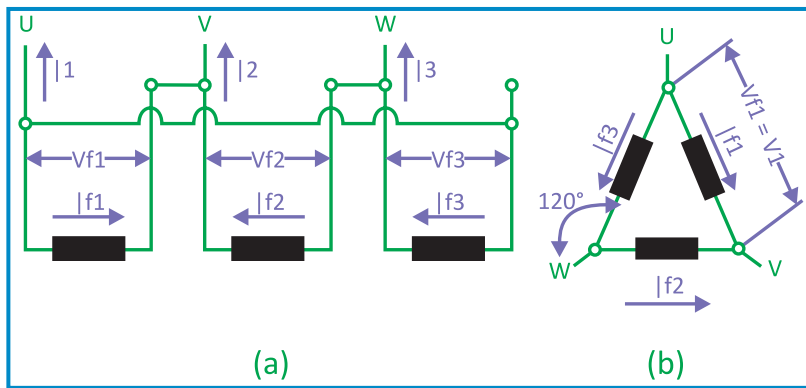


Figura 33 - Ligação triângulo  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 48).

Segundo a Weg S.A. ([200-?], p. 45), analisando o esquema da figura anterior, percebemos que:

- a tensão de linha  $V_L$  é imposta na carga e a mesma é igual a  $V_F$  que a tensão do sistema monofásico correspondente, ou seja,  $V_L = V_F$ ;
- a somatória das correntes das duas fases é igual à própria corrente de linha, ou seja,  $I_L = I_{F1} + I_{F3}$

Em decorrência da defasagem das correntes, a soma entre as mesmas deverá ser feita graficamente e chega-se à seguinte expressão:

$$I_L = I_F \cdot \sqrt{3} = 1,732 \cdot I_F$$

Equação 31

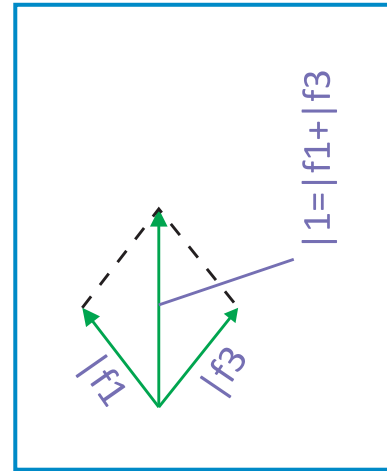


Figura 34: Resultante da Soma das Correntes

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 48).

#### Exemplo 1

Um sistema trifásico com tensão nominal de 380 V, com corrente de linha  $I_L$  medida de 6 A é ligado a uma carga trifásica ligada em triângulo. Considerando o sistema equilibrado e as cargas iguais, determine a tensão e a corrente nas mesmas.

Em cada uma das cargas a tensão será:

$$V_F = V_L = 380 \text{ V}$$

A corrente em cada uma das cargas será:

$$I_L = 1,732 \times I_F$$

$$I_F = 0,577 \times I_L = 0,577 \times 6 = 3,46 \text{ A}$$

#### ➤ Ligação estrela

Conectando-se os três sistemas monofásicos a um ponto comum, os três cabos restantes formam um sistema trifásico em estrela como na próxima figura. Podemos ainda ter um sistema trifásico em estrela a “quatro fios”, considerando o neutro que é ligado ao ponto comum às três fases.

As definições de tensão e corrente de linha são as mesmas já citadas na ligação triângulo (WEG S.A., [200-?]).

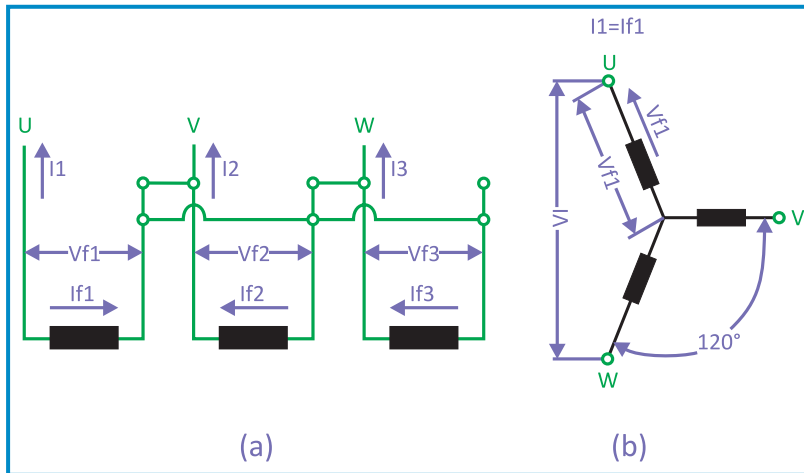


Figura 35 - Ligação estrela

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 49).

Analisando o esquema da figura apresentada anteriormente, você perceberá que:

- as correntes de linha  $I_L$  e as correntes de fase  $I_F$  em cada cabo conectados são iguais, ou seja,  $I_L = I_F$ ;
- a tensão entre dois cabos quaisquer do sistema trifásico é a soma gráfica das tensões das fases nas quais os cabos estão conectados, ou seja:

$$V_L = V_F \cdot \sqrt{3} = 1,732 \cdot V_F$$

Equação 32

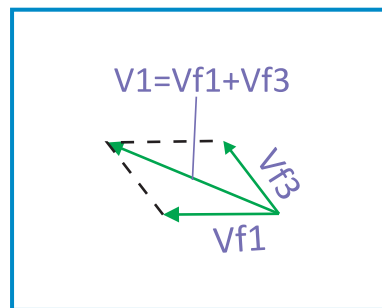


Figura 36 - Tensão Entre dois Cabos Quaisquer do Sistema Trifásico

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 49).

### Exemplo 2

Considerando uma carga trifásica composta por três cargas iguais ligadas a uma tensão de 127 V consumindo uma corrente de 8,0 A, determine a tensão nominal e a corrente de linha que alimentam essa carga.

Em cada uma das cargas a corrente será:

$$I_L = I_F = 8,0 \text{ A}$$

A tensão em cada uma das cargas será:

$$V_F = 127 \text{ V (nominal de cada carga)}$$

$$V_L = 1,732 \times 127 \text{ V} = 220 \text{ V}$$

## SEÇÃO 6

### Tensão nominal múltipla

Você sabia que existem ligações que possibilitam o funcionamento do gerador síncrono em mais de uma tensão?

Portanto, é necessário que o equipamento tenha disponível os terminais para a alteração na conexão. Para o funcionamento do equipamento em mais de uma tensão, os seguintes tipos de ligação são utilizados. Acompanhe.

## ➤ Ligação série-paralela

Dividindo-se cada fase do enrolamento em duas partes, as mesmas são ligadas em série ficando cada uma com a metade da tensão de fase nominal. Se as duas metades da fase forem ligadas em paralelo, a tensão da máquina será a mesma da tensão anterior de forma que a tensão aplicada em cada bobina não é alterada. Confira na figura a seguir os esquemas de ligação com exemplos numéricos. (WEG S.A., [200-?]).

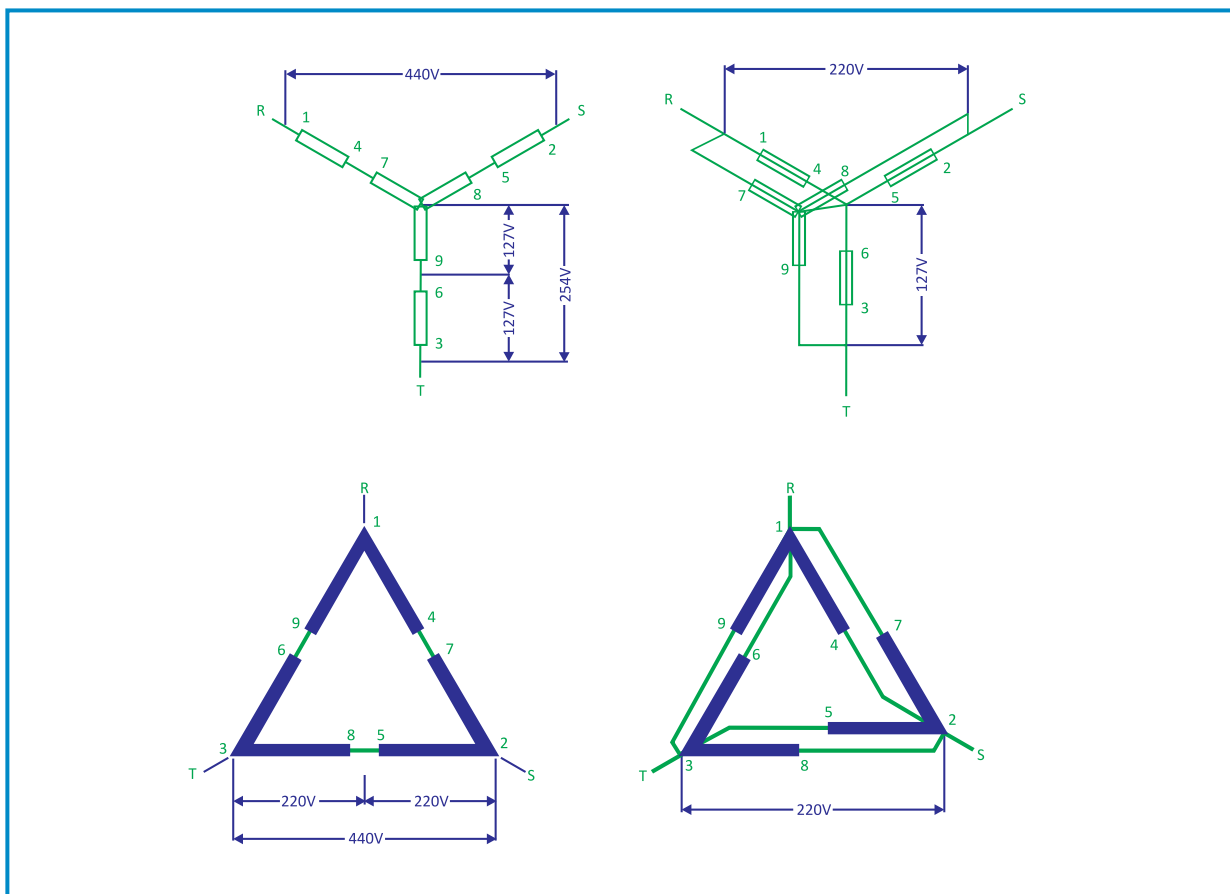


Figura 37 - Tensão Nominal Múltipla

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 50).

É comum em geradores o fornecimento em três tensões 220/380/440 V. Para a obtenção da tensão de 380 V, deve-se ligar o gerador em 440 V e mudar a referência do regulador de tensão, dessa forma podemos obter as três tensões mais utilizadas na ligação Y.

Ligação	Tensão de linha	Corrente de linha	Potência
Y	$V_L = V_F \cdot \sqrt{3}$	$I_L = I_F$	$P = 3 \cdot V_F \cdot I_F$
$\Delta$	$V_L = V_F$	$I_L = I_F \cdot \sqrt{3}$	$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$

Quadro 4 - Relação entre Tensões (linha/fase) Correntes (linha/fase) e Potência em um Sistema Trifásico

## ➤ Ligação estrela-triângulo

A ligação estrela-triângulo exige que a máquina síncrona possua seis terminais acessíveis e possibilita que o equipamento trabalhe com duas tensões nominais como, por exemplo: 220/380 V - 380/660 V - 440/760 V.

Ligando-se as três fases em triângulo cada uma das fases estará sob a tensão de linha 220 V. Ligando-se as três fases em estrela o equipamento pode ser ligado a uma linha de 380 V de forma que a tensão nos enrolamentos continue com 220 V (WEG S.A., [200-?]).

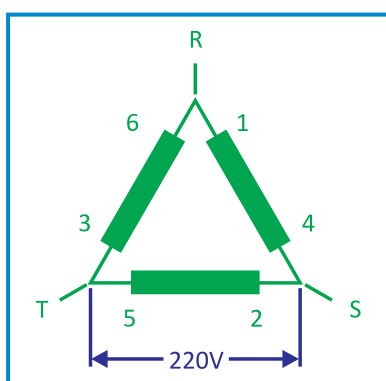


Figura 38 - Ligação Triângulo Manual  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 51).

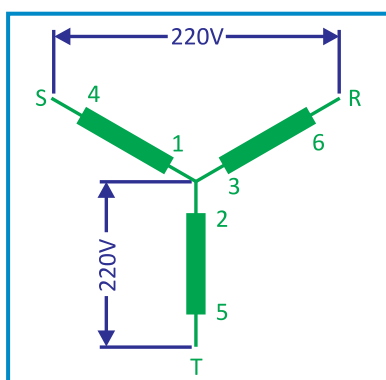


Figura 39 - Ligação Estrela  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 51).

Preparado para mergulhar no próximo tema?

## SEÇÃO 7 Comportamento do gerador em vazio e sob carga

Em rotação constante (a vazio) a tensão na armadura depende da corrente que circula no enrolamento de campo, para essa condição o estator não é percorrido por corrente, sendo nula a reação da armadura.

O comportamento da tensão gerada em relação à corrente de excitação é apresentado na figura a seguir e essa relação é denominada de característica a vazio.

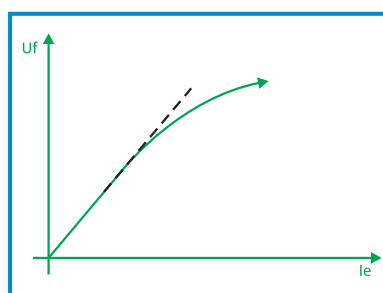


Figura 40 - Característica a Vazio  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 52).

Quando uma carga é imposta ao gerador, um campo magnético é criado pela corrente que passa nos condutores da armadura fazendo com que a intensidade e a distribuição do campo magnético sejam alteradas e essas alterações variam conforme as características da carga, que a seguir vamos conhecer juntos.

### ➤ Carga puramente resistiva

Na alimentação de uma carga puramente resistiva é criado um campo magnético próprio gerado pela corrente de carga. Para um gerador bipolar, conforme figura a seguir, são gerados dois polos

com uma defasagem de  $90^\circ$  em relação aos polos principais, e estes exercem sobre os polos induzidos uma força contrária ao sentido de giro, consumindo uma parte da potência (a potência mecânica) para que o motor permaneça girando (WEG S.A. [200-?]).

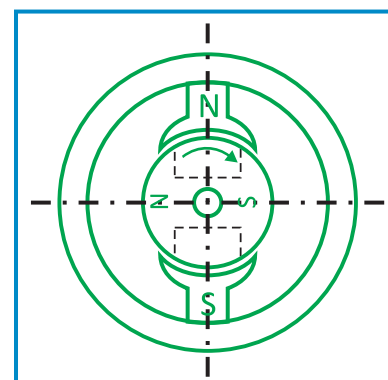


Figura 41 - Gerador Bipolar  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 53).

A variação do fluxo principal em vazio em relação ao fluxo de reação da armadura é apresentada no gráfico a seguir. Para que seja mantida a tensão nominal, devido à perda de tensão, faz-se necessária a elevação da corrente de excitação.

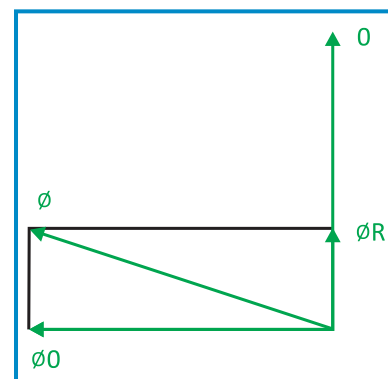


Figura 42 - Carga Puramente Resistiva  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 53).

Sendo:

- fluxo principal em vazio  $\phi_0$ ,
- fluxo de reação da armadura  $\phi_R$ .

## ➤ Carga puramente indutiva

Na alimentação de uma carga indutiva a corrente de carga está defasada de  $90^\circ$  em atraso com relação à tensão. A direção do campo principal e do campo de reação da armadura será a mesma, no entanto, com polaridade oposta, observe na figura a seguir.

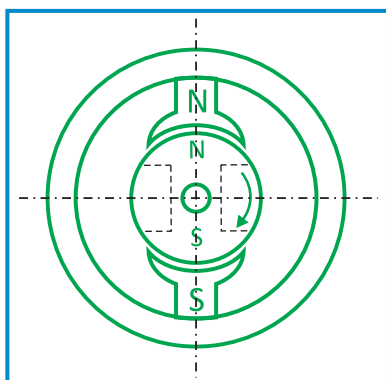


Figura 43 - Polaridades opostas

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 53).

O efeito da carga indutiva é desmagnetizante, conforme observamos na figura a seguir. Em decorrência desse efeito desmagnetizante, é necessário um aumento da corrente de excitação para manter o nível de tensão nominal. Cargas indutivas têm como característica o armazenamento de energia, que é devolvida ao gerador, não exercendo conjugado frenante sobre o induzido (WEG S.A., ([200-?])).

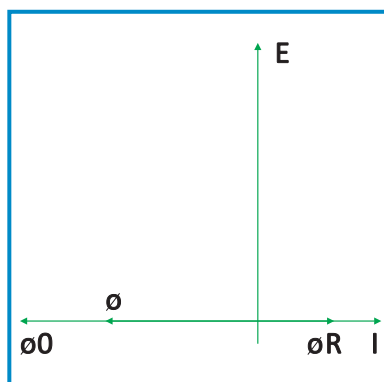


Figura 44 - Carga Puramente Indutiva

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 53).

## ➤ Carga puramente capacitiva

Para a carga puramente capacitiva a corrente de armadura possui uma defasagem de  $90^\circ$  em adiantamento em relação à tensão. A direção do campo principal e a direção do campo da reação da armadura são as mesmas e possuem a mesma polaridade, para este caso, o campo induzido tem um efeito magnetizante. Acompanhe nas figuras a seguir:

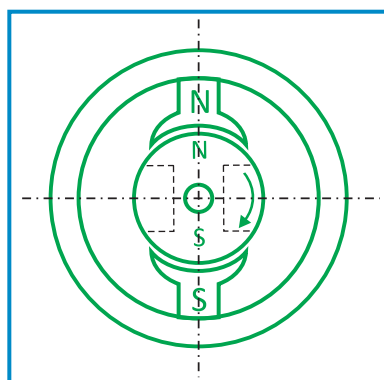


Figura 45 - Polaridades Alinhadas

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 53).

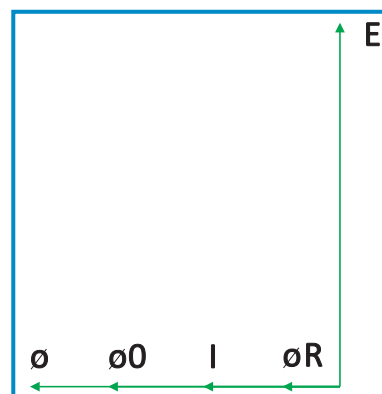


Figura 46 - Carga Puramente Capacitiva

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 53).

Nas cargas capacitivas ocorre o acúmulo de energia em seu campo elétrico, que é devolvida ao gerador, não exercendo conjugado frenante sobre o induzido, assim como nas cargas indutivas. Em decorrência do efeito magnetizante, é necessária uma redução da corrente de excitação para manter o nível de tensão nominal, conforme apresentado na figura a seguir (WEG S.A., [200-?]).



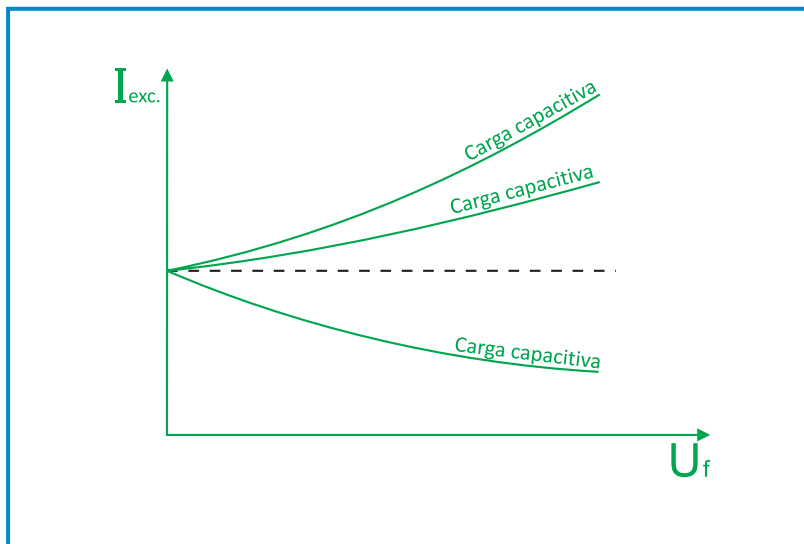


Figura 47 - Variação da corrente de excitação para manter a tensão de armadura constante  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 54).

### ➤ Cargas intermediárias

Na prática, o que encontramos são cargas com defasagem intermediária com características resistivas e capacitivas ou com características resistivas e indutivas, o efeito magnetizante ou desmagnetizante deverá ser compensado alterando a corrente de excitação (WEG S.A., [200-?]).

## SEÇÃO 8

### Características dos rotores de geradores

Os rotores dos geradores síncronos podem ser de polos lisos ou polos salientes. Você estudará suas características a seguir.

- 1. Polos lisos:** são rotores nos quais o entreferro é constante ao longo de toda a periferia do núcleo de ferro.

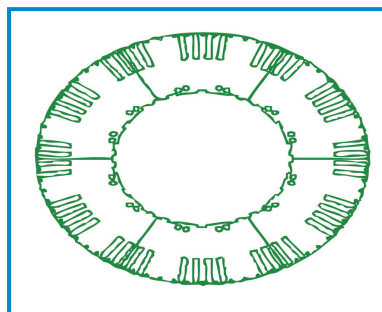


Figura 48 - Rotor de Polos Lisos  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 55).

- 2. Polos salientes:** são rotores que apresentam uma descontinuidade no entreferro ao longo da periferia do núcleo de ferro. Nesses casos, existem as chamadas regiões interpolares onde o entreferro é muito grande, tornando a saliência dos polos visível.

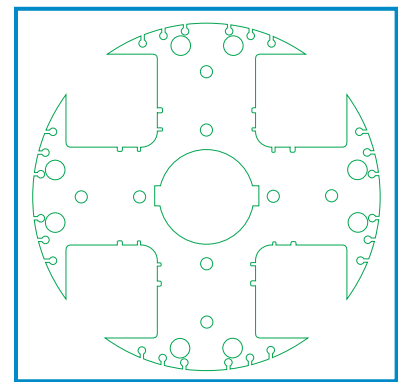


Figura 49 - Rotor de Polos Salientes  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 56).

Podemos seguir em frente?

## SEÇÃO 9

### Reatância síncrona

Após o período de transitório a reatância é dada por (WEG S.A., [200-?]):

$$x_d = \frac{E}{I}$$

Sendo:

- E = valor eficaz da tensão fase a neutro nos terminais do gerador antes do curto-circuito;
- I = valor eficaz da corrente de curto-circuito.

Equação 33

O conhecimento da grandeza da reatância é importante, uma vez que o valor da corrente no estator após a ocorrência de um curto-circuito nos terminais da máquina estará em função do valor da reatância.

## SEÇÃO 10

### Regulação de tensão

Segundo Gussow (1985), a regulação de tensão de um gerador CA representa o aumento percentual na amplitude da tensão no terminal à medida que a carga vai diminuindo da corrente especificada da carga máxima até zero, e é dada por:

$$\text{Regulação de Tensão} = \frac{\text{tensão sem carga} + \text{tensão com carga máxima}}{\text{tensão com carga máxima}}$$

Equação 34

#### Exemplo

Um gerador sem carga opera com uma tensão de 120 V. Quando se impõe uma carga ao mesmo, sua tensão de saída é reduzida para 115 V. Calcule sua regulação de tensão sabendo que sua corrente de campo não é alterada (GUSSOW, 1985).

$$\text{Regulação de Tensão} = \frac{\text{tensão sem carga} + \text{tensão com carga máxima}}{\text{tensão com carga máxima}}$$

$$\text{Regulação de Tensão} = \frac{120 - 115}{115} = \frac{5}{115} = 0,0043 = 4,3\%$$

O próximo assunto é muito importante, prepare-se!

## SEÇÃO 11

### Perdas e eficiência

As perdas existentes no gerador são constituídas por: perdas no cobre na excitação de campo, perdas no cobre da armadura e perdas mecânicas. E a eficiência  $E_F$  é dada pela razão entre a potência útil de saída e a potência total de entrada (GUSSOW, 1985).

$$E_F = \frac{\text{potência útil de saída}}{\text{potência total de entrada}}$$

Equação 35

#### Exemplo

Um gerador possui uma demanda de carga de 5,5 kW e tem como propulsor um motor de 10 hp. Determine a eficiência do gerador.

potência total de entrada =

$$10\text{hp} \cdot \frac{746\text{W}}{\text{hp}} = 7460\text{W}$$

potência útil de saída =

$$5,5\text{kW} = 5.500\text{W}$$

$$E_F = \frac{\text{potência útil de saída}}{\text{potência total de entrada}} =$$

$$\frac{5.500}{7.460} = 73,7\%$$

## SEÇÃO 12

### Potência em máquinas de polos salientes

Para Gussow (1985), a potência em máquinas de polos salientes pode ser dada em função do ângulo de carga entre os fasores de tensão de fase  $U_F$  e a força eletromotriz induzida  $E_0$  e é dada por:

$$P = m \cdot U_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi$$

Sendo:

- $m$  = número de fases;
- $U_F$  = tensão de fase;
- $I_F$  = corrente de fase.

Equação 36

Um diagrama de tensão para o gerador síncrono de polos salientes é apresentado na figura a seguir, sendo que “ $x_d$ ” e “ $x_q$ ” são respectivamente a reatância do eixo direto e em quadratura.

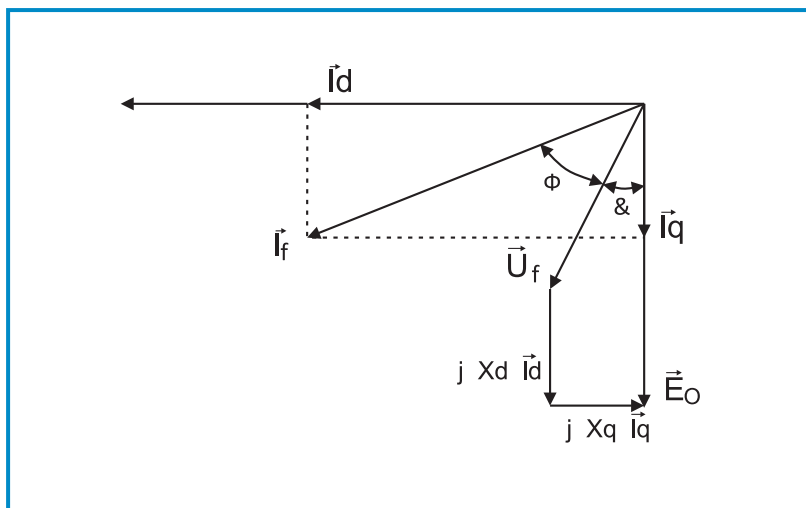


Figura 50 - Diagrama de Tensão  
 Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 60).

## SEÇÃO 13

### Sincronização

Você sabia que no Brasil grande parte da energia disponível no setor de distribuição é proveniente de várias fontes?

Essas fontes devem estar interligadas entre si para garantir que toda a demanda do sistema seja atendida.

Para que sejam interconectadas, fontes geradoras diferentes devem estar sob a mesma tensão, frequência e em concordância de fase e quando esse conjunto de fatores é atendido, chama-se de sincronismo. Na figura a seguir você pode observar um exemplo de conexão entre duas fontes geradoras em sistema trifásico. Se as lâmpadas indicadas estiverem apagadas, estarão mostrando que os sistemas possuem mesmo nível de tensão e frequência e estão em fase, se não houver sincronismo entre os geradores, o funcionamento da lâmpada será intermitente.

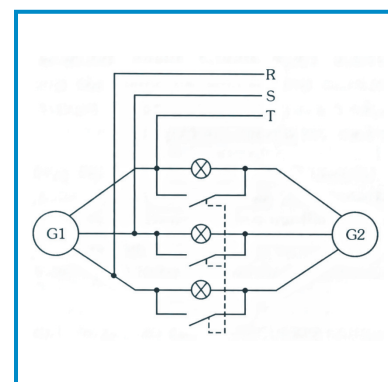


Figura 51 - Fontes Geradoras em Sistema Trifásico  
 Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 172).

Para Nascimento Jr. (2008), a execução da sincronização com base na figura anterior deve ter o seguinte procedimento:

1. ajustar o nível de tensão;
2. corrigir a sequência de fase e eventual defasagem/frequência.

Para a realização da correção de fase é necessário que duas fases sejam invertidas. Para a correção da defasagem, deve-se corrigir a velocidade do motor que fornece força motriz. Uma vez em sincronismo com a rede, o gerador fica amarrado eletromagneticamente à mesma e caso ocorra alteração na força motriz, a frequência não será mais afetada, afetando apenas a potência cedida à rede.

Você finalizou mais uma etapa de estudos, os conhecimentos aprendidos contribuirão muito para sua experiência profissional.

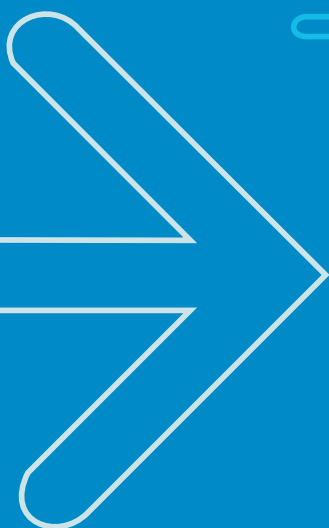
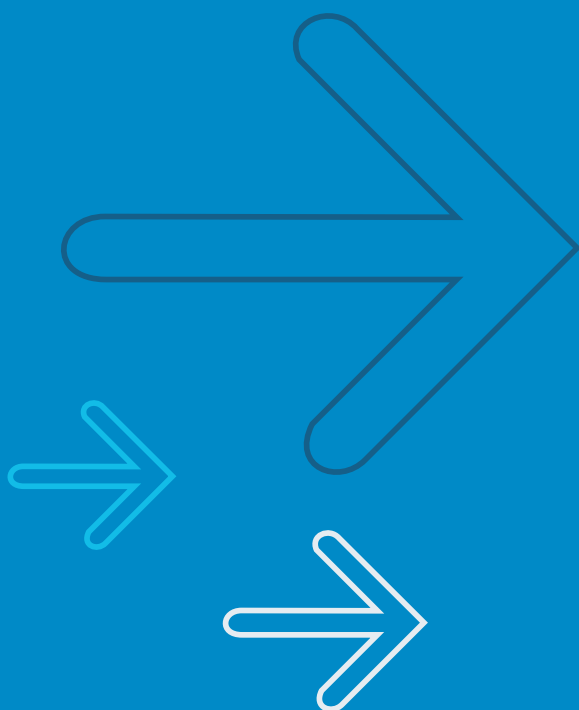
# Unidade de estudo 5

## Seções de estudo

Seção 1 – Introdução

Seção 2 – Operação e funcionamento

Seção 3 – Servomotor



# Motor Síncrono

## SEÇÃO 1

### Introdução

Um motor síncrono tem como uma de suas aplicações o controle do fator de potência, absorvendo potência reativa da rede, e tem a vantagem de simultaneamente poder acionar uma carga no eixo. Caracteriza-se por ter a mesma velocidade de rotação do campo girante da armadura em regime permanente e por não possuir conjugado de partida (NASCIMENTO JR., 2008).

Na prática, é comum realizar a partida de um motor síncrono como se fosse um motor assíncrono e posteriormente excitar o indutor, alimentando o enrolamento de campo com corrente contínua de forma a sincronizá-lo.

## SEÇÃO 2

### Operação e funcionamento

Esta máquina síncrona possui dois tipos de enrolamento, o enrolamento trifásico no estator e o enrolamento com corrente contínua no rotor. Para o funcionamento como motor temos que aplicar uma tensão trifásica ao estator, responsável pela geração de um campo girante que possui velocidade de acordo com o número de polos do enrolamento e com a frequência de alimentação (NASCIMENTO JR., 2008).

No enrolamento do rotor é aplicada uma tensão CC para que seja gerado um campo magnético constante que acompanhará o campo magnético girante, conforme você pode observar na figura a seguir.

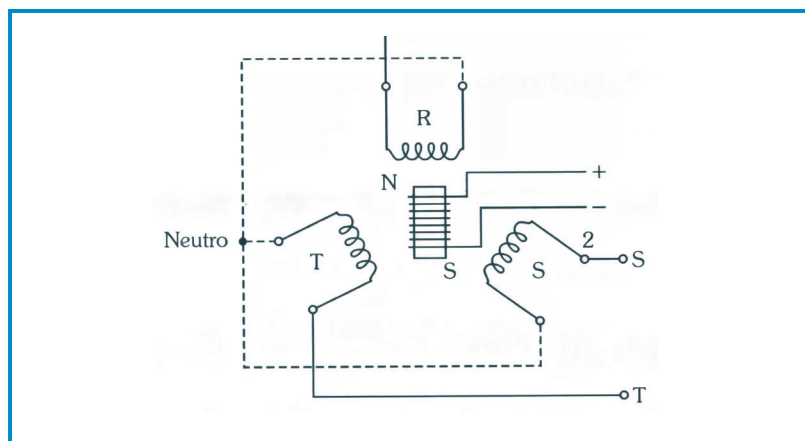


Figura 52 - Operação e Funcionamento

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 21).

Como você estudou anteriormente, o motor síncrono é incapaz de atingir a velocidade síncrona partindo da inércia, sob carga, sem procedimentos auxiliares para a partida, pois os dois polos formados no rotor não conseguem acompanhar a velocidade do campo magnético girante trifásico no estator (NASCIMENTO JR., 2008).

Uma forma de solucionar o problema da limitação do motor síncrono na partida é realizar o acoplamento junto ao motor auxiliar e realizar o desacoplamento a 90% da velocidade do campo girante, pois a partir desse momento o motor síncrono conseguirá buscar a sincronia com o campo magnético no estator.

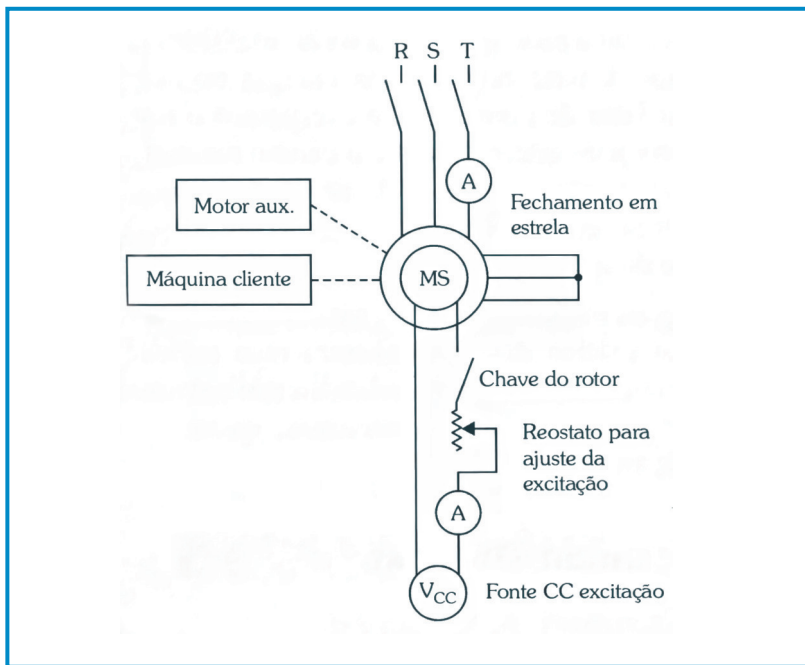


Figura 53 - Limitação na Partida

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 211).

O fornecimento de potência reativa capacitiva à rede (capacitor) é realizado elevando a corrente de excitação do rotor de forma que o campo gerado nele seja maior do que o necessário para que o rotor acompanhe o campo girante (NASCIMENTO JR., 2008).

Para que seja absorvida a potência reativa indutiva da rede (indutor), o motor síncrono deve ser subexcitado, já que necessitará desse tipo de potência para manter o rotor em sintonia com campo girante.

Podemos utilizar como exemplo o triângulo das potências, em que potência reativa capacitiva é fornecida por capacitores e a potência reativa indutiva é gerada pelas máquinas indutivas. Confira na figura a seguir.

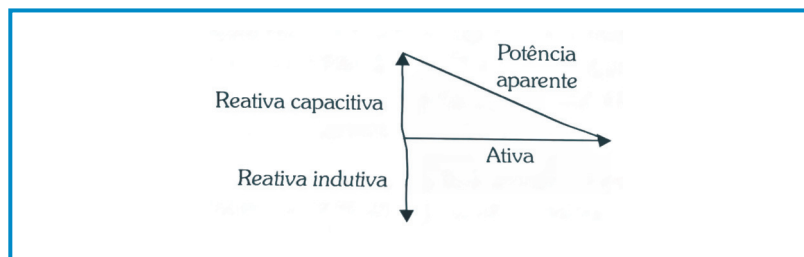


Figura 54 - Triângulo das Potências

Fonte: Nascimento Jr. (2008, p. 211).

A potência aparente é resultado da soma vetorial da potência ativa com a reativa e pode ser determinada multiplicando a corrente medida com a tensão aplicada.

## SEÇÃO 3

### Servomotor

#### ➤ Introdução

Um servomotor é uma máquina síncrona com características especiais de torque, velocidade e posicionamento.

Apresenta ótimas características de torque e excelente possibilidade de posicionamento, sendo utilizado em aplicações nas quais seja necessário o controle da rotação/posicionamento do eixo.

#### ➤ Princípio de funcionamento e características

O servomotor possui um enrolamento trifásico no rotor especialmente projetado para conferir características especiais de velocidade, torque e posicionamento, não sendo possível ligar esse enrolamento a uma rede trifásica convencional, apresenta também uma configuração diferente das demais máquinas síncronas (NASCIMENTO JR., 2008).

O rotor é composto de diversos ímãs permanentes e em uma de suas extremidades é instalado um gerador de sinais que tem o objetivo de fornecer parâmetros para a velocidade e o posicionamento. Para o acionamento do servomotor é necessária a utilização de um servoconversor, painel eletrônico e controle/ajustes de variáveis do servomotor (NASCIMENTO JR., 2008).

O circuito elétrico que pode ser utilizado como referência para a instalação de um servomotor é apresentado na figura a seguir:

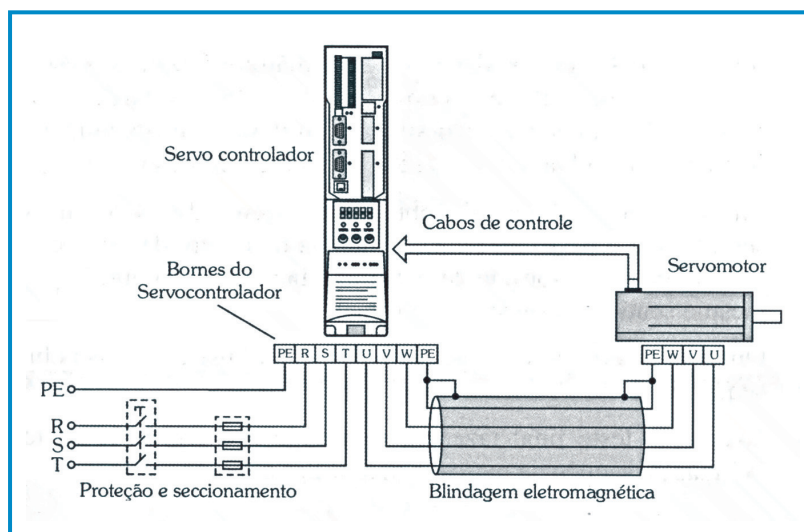


Figura 54 - Instalação de um Servomotor

Fonte: Filippo Filho (2000, p. 229).

Essa unidade trouxe conhecimentos sobre o motor síncrono, sua aplicabilidade, e funcionamento. Você também pôde conhecer o servomotor, uma máquina com características especiais. Todo esse conteúdo pode ajudar você a ampliar sua prática na área técnica e fazê-lo um grande profissional.



# Unidade de estudo 6

## Seções de estudo

- Seção 1 - Introdução
- Seção 2 - Visão geral
- Seção 3 - Aspectos construtivos
- Seção 4 - Princípios de funcionamento
- Seção 5 - Velocidade síncrona (ns)
- Seção 6 - Escorregamento
- Seção 7 - Circuito equivalente
- Seção 8 - Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente
- Seção 9 - Equações gerais
- Seção 10 - Características eletromecânicas
- Seção 11 - Métodos de partida



# Motores Trifásicos de Indução de Corrente Alternada

## SEÇÃO I Introdução

O motor elétrico é uma máquina com a capacidade de converter energia elétrica em energia mecânica, como você pode acompanhar na figura a seguir.

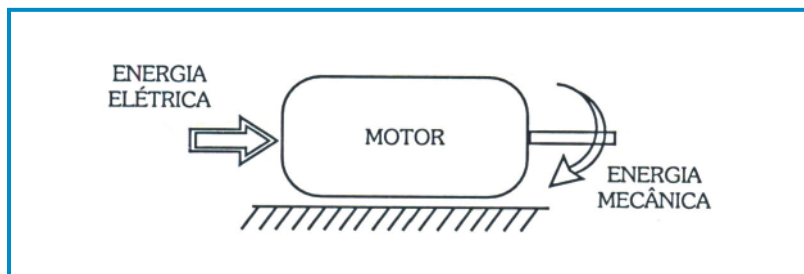


Figura 55 - Transformação de Energia no Motor  
Fonte: Filippo Filho (2000, p. 58).

A energia mecânica é utilizada no acionamento de diversos tipos de máquinas e equipamentos, principalmente na aplicação industrial, podendo-se citar as seguintes aplicações: manipulação e transporte de cargas, processamento de materiais e transporte de fluidos.

Compressores, ventiladores, exaustores e bombas (água e óleo) são exemplos de aplicações para transporte de fluidos. Tornos, fresas, prensas, lixadeiras, extrusoras e injetoras são exemplos de aplicações para processamento de materiais. Elevadores, pontes rolantes, esteiras, guindastes, talhas, trens e carros elétricos são exemplos de aplicações para a manipulação e o transporte de carga (WEG S.A, [200-?]).

O motor elétrico CA é a máquina mais largamente utilizada nos setores da indústria, comércio, meio rural, comercial e residencial.

Os motores de indução CA podem ser divididos em síncronos e assíncronos, o motor CA assíncrono é também chamado de motor de indução, pois como os transformadores, seu princípio de funcionamento está estruturado na indução eletromagnética.

O nível de tensão de alimentação desses motores geralmente está relacionado com a potência a ser acionada pelo equipamento. Portanto, podem ser fabricados para aplicações que exijam altas potências (milhares de quilowatts) em que suas tensões possam ser superiores a 2.000 V e podem ser fabricados para aplicações com potências reduzidas (frações de quilowatts) onde, usualmente, utilizam-se baixas tensões, cerca de 440 V.

Inicialmente daremos maior ênfase aos motores trifásicos assíncronos que são amplamente utilizados por possuírem diversas vantagens tais como: facilidade de manutenção, grande confiabilidade e atender a maioria dos torques de partidas para as mais diversas aplicações.

A utilização em grande escala de motores elétricos se deve também à sua relação com o tipo de energia utilizada (energia elétrica), considerada uma energia limpa e de baixo custo. Estima-se que cerca de 40% da energia elétrica consumida no país é destinada ao acionamento de motores elétricos em geral (FILIPPO FILHO, 2000), os demais responsáveis pelo consumo de energia são essencialmente processos eletroquímicos, aquecimento e iluminação (WEG S.A, [200-?]).

Na figura a seguir você conhecerá os diversos tipos (configurações) de motores elétricos.

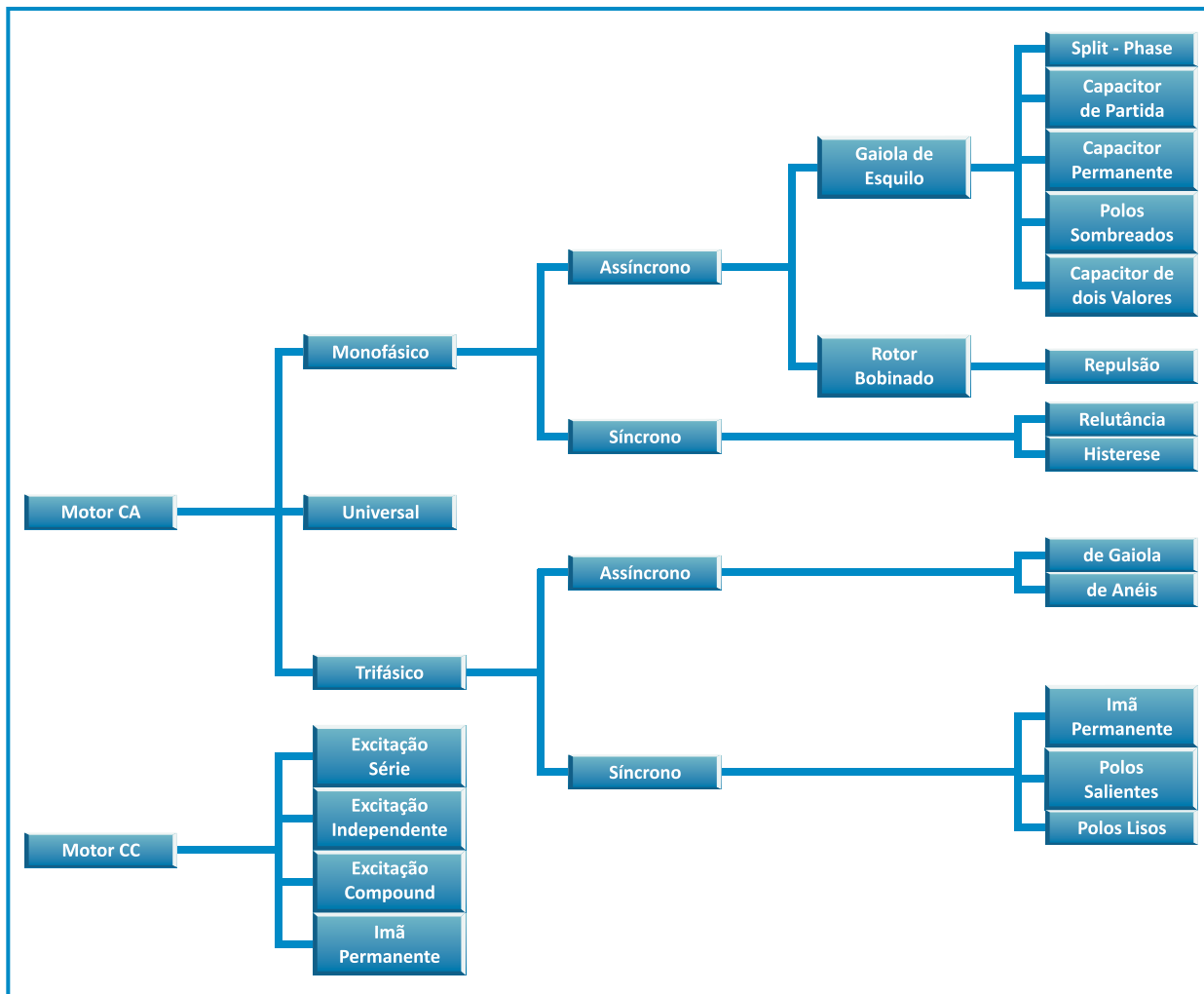


Figura 56 - Universo tecnológico em motores elétricos

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 12).

## SEÇÃO 2

### Visão geral

A produção dos motores trifásicos assíncronos é realizada de acordo com normas estabelecidas por algumas instituições em diversos países. A normalização se faz necessária para que haja uma padronização dos mais diversos fabricantes. Entre as instituições de normalização, pode-se citar, segundo WEG S.A ([200-?]):

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT);
- *International Electrotechnical Commission* (IEC);
- *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA);
- *Deutsches Institut für Normung* (DIN).

A ABNT determina que as seguintes normas devem ser seguidas por parte dos fabricantes de motores:

- **NBR 7094:** máquinas elétricas girantes: motores de indução: especificação;
- **NBR 5432:** motores elétricos de indução: padronização;
- **NBR 5383:** máquinas elétricas girantes: máquinas de indução: determinação das características.

Alguns fabricantes dividem os motores em grupos com características distintas.

O primeiro grupo é o dos **motores totalmente fechados** com ventilação externa, para tanto, é necessário que o mesmo possua carcaça aletada. São fabricados com potências até aproximadamente 600 cv e geralmente são fabricados com 2, 4, 6 e 8 polos com tensão de linha 220 V, 380 V ou 440 V, com 3, 6, 9 ou 12 terminais para uma frequência de 60 Hz (NASCIMENTO JR., 2008). Seus projetos deverão atender as normas NBR 7094, NBR 5432, NBR 5383 e NBR 6146. Geralmente, os motores pertencentes a este grupo possuem uma caixa de ligação onde é realizada a conexão dos terminais do motor com a rede e uma caixa de ligação auxiliar onde é realizada a conexão dos acessórios (sensores de temperatura para alarme e desligamento e resistências de aquecimento).

Existe ainda o grupo dos **motores à prova de explosão**, em que sua aplicação é destinada a ambientes de risco com possível presença de gases inflamáveis onde apenas uma faísca pode gerar uma explosão. Seu principal diferencial está na carcaça reforçada e na garantia da vedação entre os componentes (tampas, carcaças, caixas de ligação, anéis, etc.), para tanto, o critério para aceitação destes motores se torna bastante rígido. É importante salientar que eletricamente este motor não possui especialidades em relação aos demais motores.

Outro grupo de motores são os **motores de alto rendimento**, que têm como principal característica a redução de perdas. Essa redução de perdas se deve a um grupo de fatores tais como: sistema de ventilação mais eficiente, materiais magnéticos de melhor qualidade e projetos mais refinados. O mercado vem exigindo cada vez mais equipamentos que apresentem maior eficiência energética e, embora mais caros, os motores de alto rendimento se tornam interessantes economicamente a médio prazo pela redução de seus custos operacionais (menor consumo de energia).

Outro pequeno grupo é o dos chamados **motores fracionários**, que possuem carcaça lisa, ventilação externa, são abertos e apresentam 3 ou 6 terminais (WEG S.A, [200-?]).

Você viu que há muitas preocupações e exigências na fabricação de um motor, assim o mercado receberá equipamentos com qualidade e segurança, você não concorda?

Agora acompanhe os aspectos construtivos dos motores.

## SEÇÃO 3

### Aspectos construtivo

#### ➤ Carcaça

Estruturalmente as carcaças suportam o conjunto estator-rotor, podem ser abertas ou totalmente fechadas. Se totalmente fechadas, devem possuir aletas para auxiliar na dissipação de calor do motor. Podem ser fabricadas em alumínio, em aço ou em ferro fundido (mais comumente utilizada por apresentar uma boa relação entre resistência estrutural e custo). As carcaças abertas são geralmente fabricadas em aço e não possuem aletas (FILIPPO FILHO, 2000).

São complementadas pelas tampas traseiras e dianteiras que para algumas aplicações são substituídas por flange para a fixação do motor (veja na figura a seguir), nessas tampas estão os assentos dos rolamentos para a sustentação do rotor.

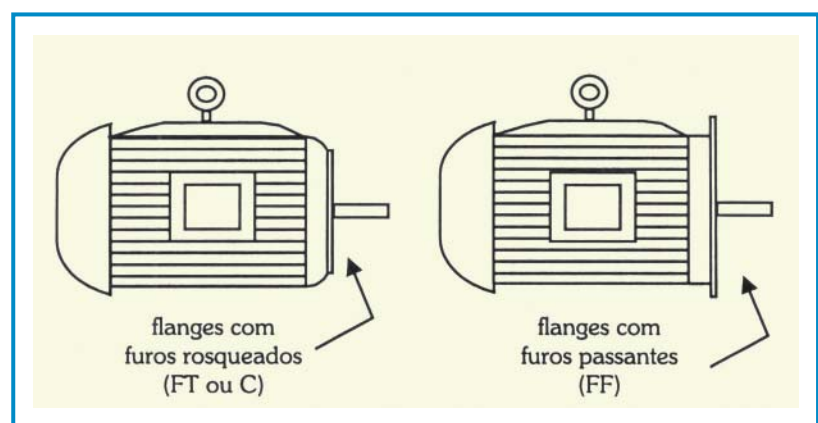


Figura 57 - Flanges com Furos Rosqueados, fFlanges com Furos Passantes

Fonte: Filippo Filho (2000, p. 61).

Geralmente as caixas de ligação são fixadas na carcaça que podem ser posicionadas lateralmente ou no topo, os cabos do motor passam por um duto de passagem existente na carcaça para que sejam disponibilizados dentro da caixa de ligação para futura conexão com a rede elétrica.

A padronização da carcaça é normalizada pela NBR 5432.

A carcaça também tem a função de invólucro do motor, a necessidade do grau de proteção varia de acordo a aplicação e está relacionada com o ambiente onde o equipamento irá atuar. Por exemplo, um motor atuando em um ambiente aberto deverá apresentar um grau de proteção superior a um motor que atua em um ambiente fechado (FILIPPO FILHO, 2000).

Motores de indução normais geralmente são fabricados com os seguintes graus de proteção, Acompanhe.

- **IP54** – proteção completa contra toque e contra acúmulo de poeiras nocivas (5). Proteção contra respingos de todas as direções (4). Utilizados em ambiente com muita poeira.
- **IP55** – proteção completa contra toque e contra acúmulo de poeiras nocivas (5). Proteção contra jatos de água em todas as direções (5). Utilizados em equipamentos que sofrem frequentemente a ação de jatos de água a limpeza.
- **IP(W)55** – equivalente ao IP 55, porém protegidos contra chuvas e maresias, utilização em locais abertos.

Os motores abertos geralmente são fabricados com grau de proteção IP21, que segundo a NBR 6146 são protegidos contra toque

com os dedos e contra corpos estranhos sólidos com dimensão acima de 12 mm (2) e proteção contra respingos na vertical (1).

## ➤ Estator e rotor

Nos motores normais os rotores são do tipo gaiola de esquilos (veja a figura a seguir), os rotores e os estatores constituem o núcleo magnético do motor.

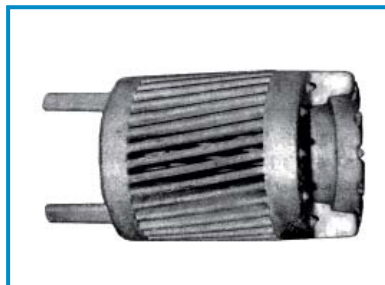


Figura 58 - Rotores Gaiolas  
Fonte: Filippo Filho (2000, p. 297).

Ainda segundo Filippo Filho (2000), os estatores e os rotores possuem chapas laminadas e alinhadas, formando um pacote de chapas, conforme figura a seguir, que possuem ranhuras internas nas quais é injetado o alumínio (rotores) e é realizada a inserção das bobinas (estatores).



Figura 59 - Rotores Gaiolas  
Fonte: Filippo Filho (2000, p. 297).

A chapa é composta por um aço com baixo teor de carbono, O rotor do tipo gaiola de esquilos é um conjunto de barras curto-cir-

cuitadas nas duas extremidades, ficando muito parecido com uma gaiola, razão pela qual recebeu este nome.

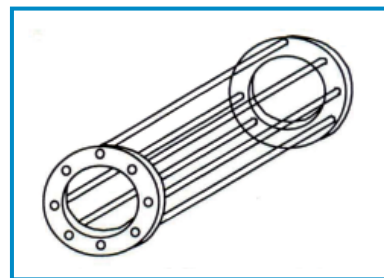


Figura 60 - Gaiola  
Fonte: Filippo Filho (2000, p. 64).

O eixo do motor atravessa o núcleo magnético e é fixado ao mesmo ficando apoiado aos rolamentos que por sua vez são apoiados nas tampas e fixados por anéis. Um corte esquemático do motor pode ser analisado na figura a seguir.



Figura 61 - Motor Assíncrono de Rotor Gaiola  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 14).

Existe ainda o chamado rotor bobinado, que possui enrolamentos semelhantes aos do enrolamento do bobinado do estator em substituição às barras, o acesso aos terminais desse enrolamento é feito por meio de um conjunto de anéis/escovas de grafite.

## SEÇÃO 4

### Princípios de funcionamento

Um campo magnético é criado quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica e a orientação do mesmo será conforme o eixo da bobina, sua amplitude será proporcional à corrente aplicada.

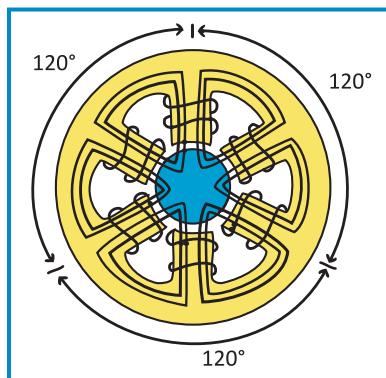


Figura 62 - Princípio de Funcionamento  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 29).

Podemos verificar na figura anterior que um “enrolamento trifásico” é formado por três enrolamentos monofásicos deslocados angularmente entre si em 120°. Alimentando o equipamento com um sistema trifásico de correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , cada uma das correntes criará seu campo magnético  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$ , que por sua vez também serão deslocados angularmente entre si em 120° (Figura 63) (WEG S.A. ([200-?], p. 14).

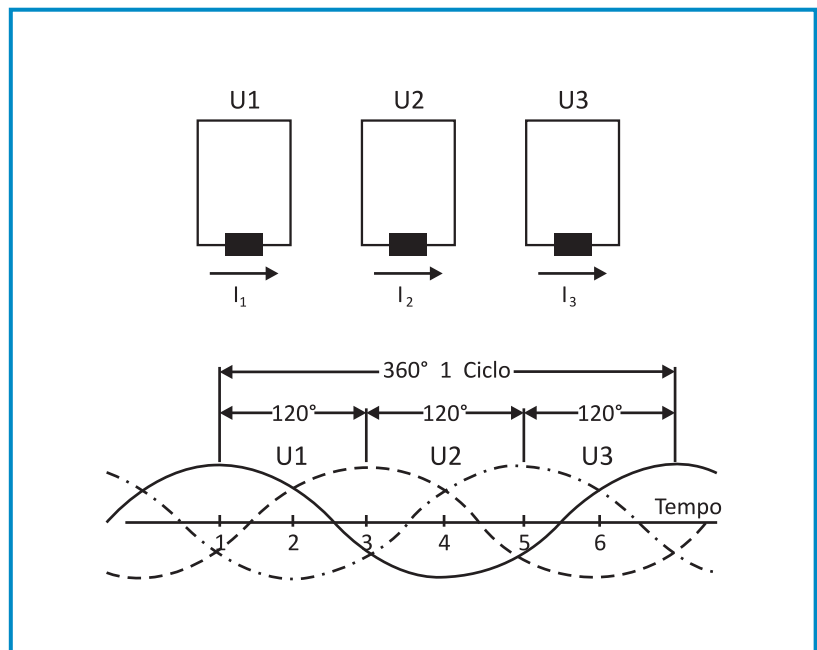


Figura 63 - Sistema Trifásico Equilibrado  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 26).

A cada instante a somatória de todos os campos gerados  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$  cria um campo resultante “H”, apresentado na parte inferior da figura a seguir. Pode-se observar que a amplitude do campo “H” permanece constante ao longo do tempo e sua direção segue um movimento rotacional. Dessa forma, podemos concluir que para o motor com o enrolamento trifásico o campo magnético “H” é “girante”, e esse campo girante induz tensões na barra do rotor que geram corrente e como consequência é gerado um campo no rotor de polaridade oposta à do campo girante (WEG S.A., [200-?], p. 30).

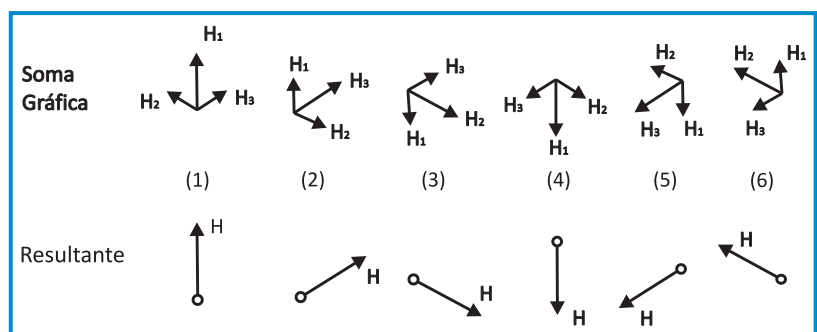


Figura 64 - Somatória dos Campos  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 30).

Em decorrência da atração entre os campos girantes opostos do estator e do rotor, o rotor tende a acompanhar esse campo, gerando um conjugado que faz com que o motor gire, acionando a carga.

## SEÇÃO 5

### Velocidade síncrona ( $n_s$ )

A velocidade síncrona de um motor é definida como a velocidade de rotação de um campo girante, e é dependente de dois fatores: frequência da rede ( $f$ ), dada em hertz e do número de pares de polos ( $p$ ).

Construtivamente os enrolamentos podem possuir um ou mais pares de polos que se encontram sempre alternadamente dispostos no enrolamento. A cada ciclo o campo magnético girante percorre um par de polos, assim, a velocidade do campo é dada pela expressão (FILIPPO FILHO, 2000):

$$n_s = \frac{60 \times f}{p} = \frac{120 \times f}{2p} \text{ (rpm)}$$

Equação 37

#### Exemplo

Determine a rotação de um motor 4 polos que opera em uma frequência nominal de 60 Hz.

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{60 \times f}{p} \\ &= \frac{60 \times 60}{2} = 1800 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Para que exista a formação de pares de polos, o número de polos deverá ser sempre par. Para as “polaridades” e frequências mais usuais, temos as seguintes velocidades síncronas:

Nº de polos	Rotação síncrona por minuto	
	60 Hz	50Hz
2	3.600	3.000
4	1.800	1.500
6	1.200	1.000
8	900	750

Quadro 5 - Rotações síncronas

## SEÇÃO 6

### Escorregamento ( $s$ )

Considerando que o rotor esteja girando na velocidade constante de “ $n$ ” rpm no mesmo sentido que o campo girante do estator, sendo  $n_s$  rpm a velocidade síncrona do campo de estator, dada pela equação 37. A diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor é citada usualmente como **escorregamento** do rotor. O escorregamento é geralmente definido como uma fração da velocidade síncrona (FILIPPO FILHO, 2000):

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Sendo:

- $n_s$  = velocidade síncrona (rpm);
- $n$  = velocidade rotórica (rpm);
- $s$  = escorregamento.

Equação 38

Quando um motor gira com uma velocidade diferente da velocidade do campo girante (velocidade síncrona), circularão correntes induzidas no rotor, quanto maior a carga maior será o conjugado necessário para acioná-la.

A obtenção de um maior conjugado pode ser conseguida aumentando a diferença entre as velocidades do rotor e do campo girante no estator para que os campos gerados e as correntes induzidas sejam maiores. Na condição do motor trabalhando a vazio (sem carga), o mesmo apresentará uma rotação muito próxima à rotação síncrona.

A frequência da corrente induzida no rotor é dada pelo produto da frequência da corrente no estator pelo escorregamento, ou seja (FILIPPO FILHO, 2000):

$$f_2 = s \times f_1$$

Sendo:

- $f_1$  = frequência da corrente estática (Hz);
- $f_2$  = frequência da corrente rotórica (Hz).

Equação 39

Com a aplicação de uma carga ao rotor, ocorre a redução da velocidade com o consequente aumento do escorregamento, da frequência da corrente no rotor e da sua força eletromotriz induzida. Com o aumento da corrente induzida no rotor, tem-se um aumento na corrente primária no estator com melhor fator de potência produzindo maior potência mecânica e exigindo maior potência da rede. A condição de equilíbrio entre o torque



gerado pelo motor e o torque resistente da carga ocorre quando o motor está à plena carga.

O fator de potência varia de 0,8 em motores de baixas potências, próximas a 1 cv, para cerca de 0,95 para motores de maiores potências, acima de 150 cv. Com cargas acima da plena carga, o fator de potência se aproxima de um máximo e então decresce rapidamente.

Os caminhos do conhecimento são muitos, você já trilhou alguns nesta caminhada, agora é hora de estudar os circuitos, acompanhe.

## SEÇÃO 7

### Circuito equivalente

Para determinar as características de operação do motor de indução trifásico e sua influência na rede elétrica, é necessário representar os parâmetros do motor por meio de circuito elétrico equivalente (FILIPPO FILHO, 2000).

Considerando o motor elétrico uma carga equilibrada, o mesmo pode ser representado apenas por uma fase, ficando subentendido que as tensões e as correntes nas demais fases podem ser obtidas por um simples deslocamento adequado da fase,  $\pm 120^\circ$  para motores trifásicos.

O circuito equivalente nos possibilita analisar as perdas no “cobre” e no “ferro”, potência mecânica, conjugado, corrente no estator, assim como demais fatores.

O circuito equivalente do motor é muito parecido com o circuito equivalente do transformador, visto anteriormente (FILIPPO FILHO, 2000):

Sendo:

- $E_2$  = tensão induzida “por fase” quando o rotor está bloqueado;
- $X_2$  = reatância de dispersão “por fase”;
- $R_2$  = resistência do rotor “por fase”.

A corrente do rotor “por fase”  $I_2$  para qualquer velocidade é dada por:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

Equação 40

Considerando a indutância  $X_1$  e a resistência  $R_1$  do estator, o efeito transformador do motor e a impedância do rotor, pode-se determinar o circuito equivalente “por fase”, como podemos observar na figura a seguir. Os parâmetros  $X_1$  e  $R_1$  são respectivamente a reatância, devido à dispersão do estator, e a resistência do mesmo (FILIPPO FILHO, 2000).

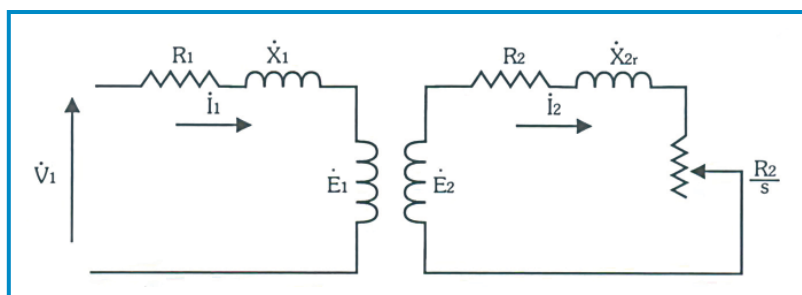


Figura 64 - Circuito Equivalente “por Fase do Motor”

Fonte: Filippo Filho (2000, p. 73).

Para o circuito equivalente com todos os parâmetros no primário, deve ser adicionada uma resistência que represente as perdas no ferro ( $R_f$ ) e uma indutância de magnetização  $X_f$ . Confira a figura a seguir (FILIPPO FILHO, 2000):

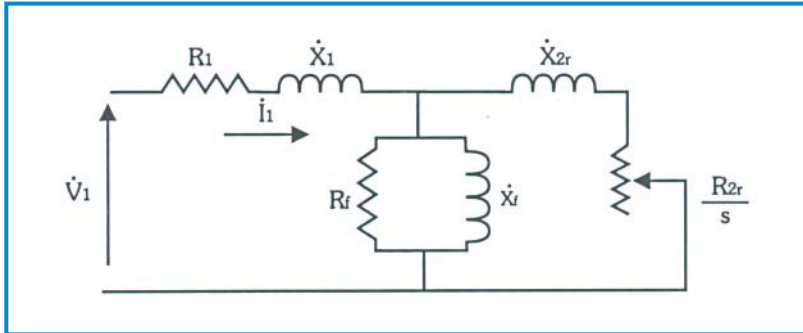


Figura 65 - Circuito Equivalente “por Fase” Refletido no Estator  
 Fonte: Filippo Filho (2000, p. 73).

Uma fração da potência transferida ao rotor  $R_{2r}/s$  é dissipada nas barras do rotor por Efeito Joule e a outra parte é dissipada no núcleo magnético pelas perdas no ferro, histerese e correntes parasitas. Existem ainda as perdas mecânicas que se concentram principalmente nas perdas relacionadas ao sistema de ventilação e as perdas nos rolamentos.

Utiliza-se a equação abaixo para separar as perdas de natureza elétrica da potência total transferida ao rotor.

$$\frac{R_{2r}}{s} = R_{2r} + \left(\frac{1-s}{s}\right) \cdot R_{2r}$$

Equação 41

Sendo que  $R_{2r}$  são todas as perdas de natureza elétrica do rotor e as demais variáveis a potência mecânica total. Subtraindo-se as perdas por ventilação e atrito, obtém-se a potência mecânica útil e assim o circuito equivalente passa a ser conforme apresentado na figura a seguir (FILIPPO FILHO, 2000):

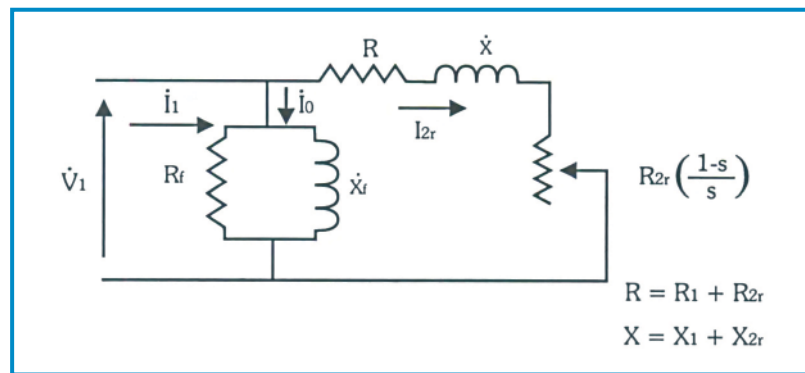


Figura 66 - Circuito Equivalente (Forma Alternativa)  
 Fonte: Filippo Filho (2000, p. 73).

Pode-se verificar que com o rotor bloqueado, ou seja, com  $s = 1$  a resistência variável se torna igual a zero, portanto, um curto. Para o caso em que o rotor esteja na velocidade síncrona, ou seja, com  $s = 0$  a resistência variável seria infinita, fazendo com que o circuito fique aberto. Essas situações não têm sentido prático.

A próxima seção lhe reserva um assunto muito interessante e necessário para que você continue a explorar conhecimentos sobre circuitos.



## SEÇÃO 8

### Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente

A determinação dos parâmetros do circuito equivalente é realizada por meio do ensaio em vazio e do ensaio com o rotor bloqueado.

O ensaio em vazio é realizado sem acoplamento de carga no motor, sendo assim o escorregamento se torna muito próximo de zero ( $s \rightarrow 0$ ), pois sua velocidade de rotação fica muito próxima da velocidade síncrona. Deve-se considerar que embora sem acoplamento de carga externa, incidirá uma pequena carga mecânica decorrente do sistema de ventilação e dos atritos mecânicos da própria máquina. O ensaio em vazio nos motores equivale ao ensaio em circuito aberto nos transformadores (FILIPPO FILHO, 2000).

No ensaio com o rotor bloqueado o escorregamento é igual a 1, e a resistência variável, conforme você acompanhou na figura anterior, equivale a um curto-circuito. O ensaio com rotor bloqueado nos motores equivale ao ensaio de curto-circuito nos transformadores.

Visando simplificar a determinação dos parâmetros elétricos, por meio do ensaio em vazio e do ensaio com o rotor bloqueado, pode-se realizar algumas alterações no circuito obtendo o circuito demonstrado na figura a seguir.

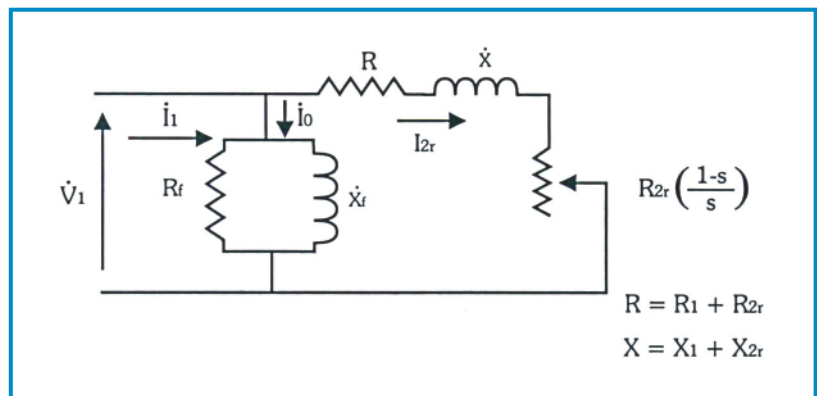


Figura 67 - Circuito Equivalente Aproximado

Fonte: Filippo Filho (2000, p. 73).

As alterações realizadas – junção das reatâncias indutivas do rotor e do estator e junção das resistências ôhmicas dos mesmos – geram pequenos erros, os quais se tornam aceitáveis para uma avaliação operacional.

A aprendizagem é um processo contínuo de construção, por isso sua atenção e dedicação é fundamental, continue bem atento aos assuntos. Estamos juntos nesta caminhada. Vamos agora estudar os ensaios.

### ➤ Ensaio em vazio

No ensaio em vazio, é aplicada a tensão nominal do motor e monitoradas as correntes (A) em cada fase com o auxílio do amperímetro, as tensões (V) em cada fase com o auxílio do volímetro e as potências ativa (kW) e reativa (kVAr) com o auxílio do wattímetro.

Sendo neste ensaio a rotação do motor muito próxima à rotação síncrona, conforme citado anteriormente, temos o escorregamento muito baixo ( $s \rightarrow 0$ ).

Considerando que toda a corrente flua pelo ramo central, pode-se determinar  $R_f$  e  $X_f$  pelas equações a seguir:

$$R_f = \frac{V_1^2}{P_V}$$

$$X_f = \frac{V_1^2}{Q_V}$$

Sendo  $P_V$  a potência ativa e  $Q_V$  a potência reativa.

Equações 42 e 43

Para essas condições de ensaio podemos considerar que  $R_f$  inclui todas as perdas no ferro e perdas mecânicas (atrito e ventilação) e  $X_f$  todo efeito de magnetização.

### ➤ Ensaio com o rotor bloqueado

É realizado aplicando-se uma tensão reduzida nos terminais do motor com eixo bloqueado sem que a corrente atinja o seu valor nominal. A resistência variável é anulada, pois para esta situação ( $S = 1$ ).

Nessas condições, em decorrência da baixa tensão, as perdas no ferro e a magnetização são desprezíveis e não existem perdas rotacionais (motor bloqueado) (NASCIMENTO JR., 2008).

A reatância de dispersão global (X) e a resistência ôhmica global (R) são determinadas por:

$$R = \frac{P_b}{I_1^2} \quad X = \frac{Q_b}{I_1^2}$$

Equação 44

A medida da tensão (V) “por fase” é realizada por meio de um voltímetro, a corrente (A) “por fase” é realizada por meio do amperímetro e as potências ativas (kW) e reativa (kVAr) são obtidas por meio de um wattímetro.

É realizada a medida da resistência ôhmica “por fase” da bobina do estator ( $R_1$ ) e  $R_{2r}$  é obtido pela relação:

$$R_{2r} = R - R_1$$

Equação 45

Agora acompanhe os exemplos para aprender a calcular as medidas de tensão.

### Exemplo 1

Um motor 4 polos, 60 Hz opera com escorregamento de 2%. Determine a sua velocidade síncrona e calcule a frequência induzida no secundário e a velocidade relativa entre o campo girante e o rotor.

A velocidade síncrona é dada por:

$$n_s = \frac{120 \times f}{2p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1.800 \text{rpm}$$

A relação do escorregamento com a velocidade síncrona é dada por:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

A velocidade do rotor é dada por:

$$n = n_s \times (1 - 0,05) = 1.800 \times (1 - 0,05) = 1710 \text{rpm}$$

A frequência induzida é dada pela equação 39:

$$f_2 = s \times f_1 = 0,05 \times 60 = 3 \text{Hz}$$

A velocidade relativa é determinada por:

$$n_R = n_s - n = 1.800 - 1710 = 90 \text{rpm}$$

### Exemplo 2

Um motor de indução trifásico de 60 cv trabalha na frequência de 60 Hz, com  $I_N = 143 \text{A}$ , 220 V,  $n = 1.775 \text{rpm}$ . Esse motor apresentou os seguintes resultados nos ensaios: a vazio 3.440 W e 22.400 VAR e com o rotor bloqueado 2.400 W e 4.160 VAR. O valor da resistência ôhmica medida por fase na bobina do estator foi de 15 mΩ. Calcule os parâmetros do circuito elétrico equivalente considerando que as perdas por atrito e ventilação chegam a 750 W.

$$\text{Tensão / fase} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{V} \quad \text{Pot. / fase} = \frac{60}{3} = 20 \text{cv}$$

Corrente / fase = 143 A (considerando motor em estrela)

$$R_f = \frac{127^2}{(750 + 3440)/3} = 11,55 \Omega \quad X_f = \frac{127^2}{22400/3} = 2,16 \Omega$$

$$R = \frac{2400/3}{143^2} = 0,039 \Omega \quad X = \frac{4160/3}{143^2} = 0,68 \Omega$$

$$R_{2r} = 0,039 - 0,015 = 0,014 \Omega$$

Continuaremos o assunto na próxima seção, inclusive com novos exemplos.

## SEÇÃO 9

### Equações gerais

A potência elétrica absorvida da rede pelo motor elétrico trifásico para a conversão em potência mecânica é dada por (FILIPPO FILHO, 2000):

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \phi$$

Sendo:

- $V_L$  = tensão da linha (V);
- $I_L$  = corrente da linha (A);
- $f$  = defasagem entre a tensão e a corrente;
- $\cos \phi$  = fator de potência do motor.

Equação 46

Uma parcela reduzida da potência elétrica consumida pelo motor está relacionada com as perdas que ocorrem no mesmo, podemos citar como as principais: perdas por histerese e por correntes parasitas no núcleo magnético, perdas por Efeito Joule no estator ou no rotor, perdas mecânicas rotacionais em decorrência do atrito e ventilação e perdas suplementares.

É frequente a utilização da potência mecânica dos motores em cv (cavalo-vapor). A relação entre cv e kW (quilowatt) é dada por:

$$1 \text{ cv} = 0,736 \text{ kW.}$$

A relação entre a potência mecânica fornecida e a potência elétrica absorvida da rede é chamada de rendimento e é dada por:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}}$$

A potência total do motor é a somatória das potências das fases e também pode ser dada por:

$$P_{el} = 3 \cdot P_{fase}$$

Sendo:

$$P_{fase} = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi$$

A potência mecânica no eixo é dada por:

$$P_{mec} = C \cdot \omega = C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$

Sendo:

- $C$  = conjugado
- $\omega$  = velocidade angular

Equações 47, 48, 49 e 50

A potência mecânica tida como referência no circuito conforme figura a seguir é dada por:

$$P_{mec} = 3 \cdot R_{2r} \cdot \left( \frac{1-s}{s} \right) \cdot I_{2r}^2$$

O conjugado alcançado pelo motor é dado por:

$$C = \frac{3 \cdot R_{2r} \cdot I_{2r}^2}{\omega_s \cdot s}$$

A corrente no rotor:

$$I_{2r} = \frac{V_1}{\sqrt{\left[ R + R_{2r} \cdot \left( \frac{1-s}{s} \right) \right]^2 + X^2}}$$

E aplicando (52) em (53) temos:

$$C = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{R_{2r}}{s} \cdot \frac{V_1^2}{\left[ \left[ R + R_{2r} \left( \frac{1-s}{s} \right) \right]^2 + X^2 \right]}$$

Pode-se observar no circuito que:

$$I_0 = \frac{V_1}{R_f} - j \frac{V_1}{X_f}$$

Equações 51, 52, 53, 54 e 55

As variáveis  $R_{2r}$ ,  $R_f$  e  $X_f$  são dependentes do projeto do motor e as equações citadas anteriormente consideram que a frequência e a tensão são constantes para cada motor analisado.

### Exemplo 3

Considerando apenas o ensaio a vazio para o circuito equivalente do exemplo 2, determine a corrente a vazio do motor.

$$i_R = \frac{127 \angle 0^\circ}{11,55 \angle 0^\circ} = 11,00 \angle 0^\circ$$

$$i_X = \frac{127 \angle 0^\circ}{2,16 \angle 90^\circ} = 58,80 \angle -90^\circ$$

$$i_0 = 11,00 - j58,80 = 59,82 \angle -79,4^\circ \text{ A}$$

## SEÇÃO 10

### Características eletromecânicas

Pela equação (54) podemos concluir que o conjugado varia em função do quadrado da tensão.

Na velocidade síncrona o conjugado é igual a zero e o comportamento do conjugado em relação à variação de velocidade pode ser verificado na figura a seguir. Os pontos apresentados são especificados pela NBR 7094 da ABNT, que você estudará a seguir:

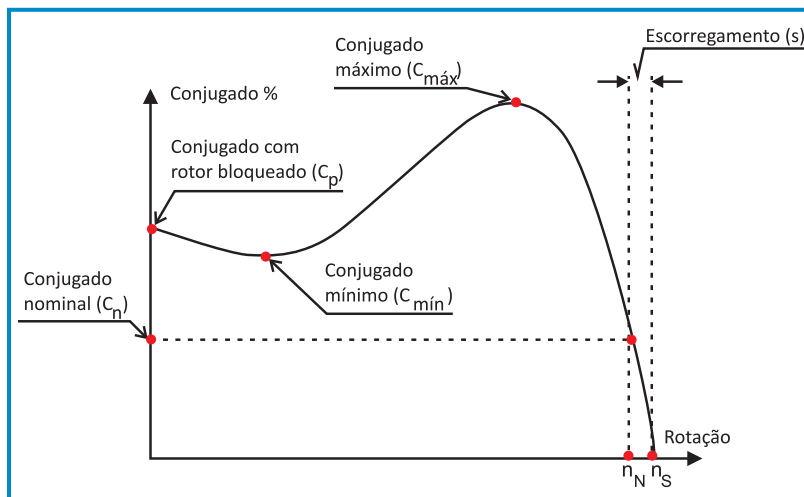


Figura 67 - Curva Conjugado x Rotação

Fonte: Weg S.A. (2000, p. 55).

Sendo:

$C_0$  = conjugado básico calculado em função da potência e velocidade síncrona;

$$C_0(Nm) = \frac{7094 \times P(cv)}{n_s(rpm)} = \frac{9555 \times P(kW)}{n_s(rpm)}$$

$$C_0(kgfm) = \frac{716 \times P(cv)}{n_s(rpm)} = \frac{794 \times P(kW)}{n_s(rpm)}$$

Equações 56 e 57

- $C_n$  = conjugado nominal (é o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais);
- $n_N$  = rotação nominal;
- $n_s$  = rotação síncrona;
- $C_{mín}$  = conjugado mínimo (é o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo);
- $C_{máx}$  = conjugado máximo (é o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominais, sem queda brusca de velocidade, deve ser o maior possível para que o motor possa vencer eventuais picos de carga);
- $C_p$  = conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de partida ou, ainda, conjugado de arranque (é o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor bloqueado, para todas as posições angulares do rotor, sob tensão e frequência nominais). Pode ser dado por:

$$C_p(\%) = \frac{C_p(Nm)}{C_n(Nm)} \times 100$$

Equações 58

Conforme as características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos são classificados em categorias que visam atender a um determinado tipo de carga. A norma (NBR 7094) define essas categorias da seguinte forma:

- **categoria N** – conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Constitui a maioria dos motores encontrados no mercado, utilizados no acionamento de cargas normais, com baixo conjugado de partida, tais como bombas, ventiladores e máquinas operatrizes;
- **categoria NY** – o mesmo que a categoria N, porém é prevista para partida Y- $\Delta$ ;
- **categoria H** – conjugado de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Usando para cargas que exigem maior conjugado de partida, tais como peneiras, transportadores carregados e moinhos;
- **categoria HY** – o mesmo que a categoria H, porém prevista para partida Y- $\Delta$ ;
- **categoria D** – conjugado de partida alto, corrente de partida normal e alto escorregamento ( $s > 5\%$ ).

São usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, em que a carga apresenta picos periódicos. Também são usados em cargas que exigem alto conjugado de partida e corrente limitada, como os elevadores.

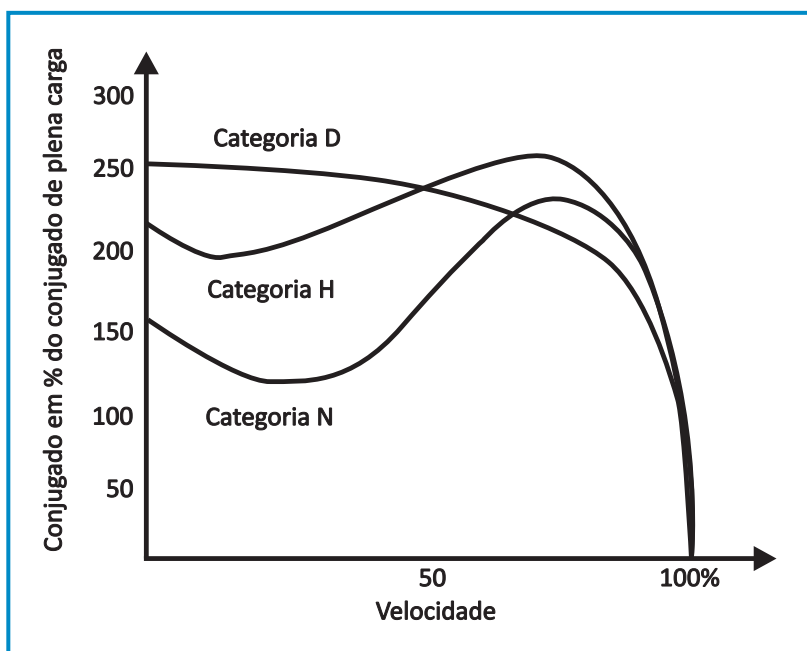


Figura 68 - Curvas Conjugados x Velocidade das Diferentes Categorias

Fonte: Weg S.A. (2000, p. 56).

Na figura anterior você observou as curvas de conjugado x velocidade para as diferentes categorias (N, H e D), segundo a NBR 7094 os valores dos conjugados mínimos exigidos são definidos para cada categoria e estão subdivididos por faixas de potência e polaridade.

## SEÇÃO II

### Métodos de partida

Na partida, os motores de indução trifásicos de rotores gaiola podem apresentar correntes até nove vezes sua corrente nominal. Na partida a corrente fica muito elevada, podendo causar danos à rede e interferências em outros equipamentos ligados à mesma. Existem sistemas/dispositivos que têm por objetivo a redução do nível de tensão durante a partida e por consequência a redução do nível de corrente. É importante garantir que com a redução de tensão e consequente redução do conjugado de partida o motor consiga realizar a aceleração da carga, pois caso contrário, teremos a situação de rotor bloqueado, o que pode causar danos ao equipamento.

Os sistemas mais comumente utilizados são:

- chave estrela-triângulo;
- chave série-paralelo;
- chave compensadora e partida eletrônica (*soft-starter*).

A seguir você conhecerá em detalhes cada um dos sistemas.

## ➤ Partida com chave estrela-triângulo (Y-Δ)

Na partida com chave estrela-triângulo é necessário que o motor possibilite a ligação em duas tensões diferentes, ou seja, em 220/380 V, 380/660 V, 440/760 V. Para a realização da ligação estrela-triângulo o motor deve possuir no mínimo seis cabos de ligação e a curva de conjugado do motor deve ser elevada o suficiente para a aceleração da máquina, pois com tensão reduzida o conjugado de partida do motor pode sofrer uma redução de até 33%. O conjugado resistente da carga não deve ser maior do que o conjugado de partida do motor (WEG S.A., [200-?]).

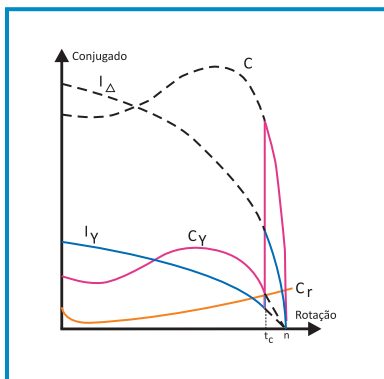


Figura 69 - Corrente e conjugado para partida estrela-triângulo

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 53).

Sendo:

- $I_{\Delta}$  = corrente em triângulo;
- $I_Y$  = corrente em estrela;
- $C_Y$  = conjugado em estrela;
- $C_{\Delta}$  = conjugado em triângulo;
- $C_r$  = conjugado resistente;
- $t_c$  = tempo de comutação.

## ➤ Partida com chave compensadora (autotransformador)

A partida com chave compensadora também visa reduzir a corrente de partida, pode ser realizada com motores sob carga e, assim como na partida estrela-triângulo, garante um conjugado suficiente para a partida e a aceleração de motor.

A redução na tensão na chave compensadora é realizada por meio de um autotransformador que geralmente possui taps de 50%, 65% e 80% da tensão nominal (WEG S.A., [200-?]).

Você pode visualizar na figura a seguir um exemplo de ligação estrela-triângulo para uma rede com tensão de 220 V. Observe que na partida a tensão é reduzida para 127 V.

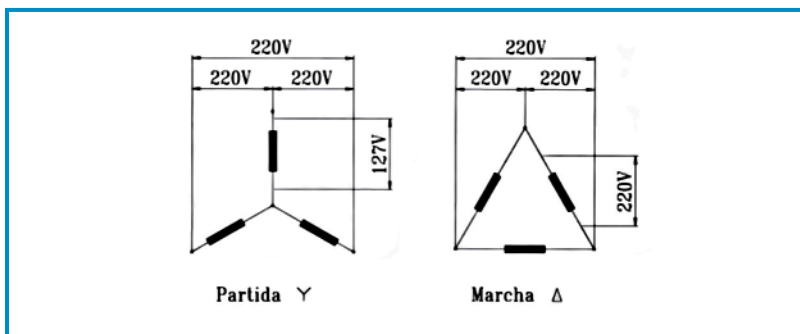


Figura 70 - Ligação Estrela-Triângulo

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 53).

## ➤ Comparação entre chaves “Y-Δ” e compensadora “automática” estrela-triângulo

Conheça as vantagens:

- possui menor custo para baixas tensões;
- pode realizar grande número de manobras;
- a corrente de partida é reduzida para aproximadamente 1/3;
- os componentes são compactos, ocupando pouco espaço.

Quer saber quais são as desvantagens? Vamos lá!

Desvantagens:

- a tensão de rede deve ser a mesma tensão em triângulo do motor;
- o conjugado de partida se reduz a 1/3 do conjugado de partida nominal do motor;
- a partida estrela-triângulo só pode ser implementada nos motores que possuem seis bornes;
- se o motor não atingir no mínimo 90% de sua velocidade nominal, o pico de corrente na comutação de estrela para triângulo será muito próximo ao pico de corrente em uma partida direta, tornando-se prejudicial aos sistemas e aos contadores.

## ➤ Partida com chave-compensadora

Vantagens:

- é possível a variação do tap de 65% para 80% da tensão da rede, de modo que o motor possa partir satisfatoriamente;
  - na partida com o tap de 65% a corrente de linha é muito próxima à corrente da chave estrela-triângulo, no entanto, na passagem da tensão reduzida para a tensão da rede o segundo pico de corrente é menor em relação à chave estrela-triângulo, pois o autotransformador por um breve período se torna uma reatância.
- Desvantagens:

- limitação da frequência de manobras;
- o custo da chave da compensadora é bem maior que o custo da chave estrela-triângulo em decorrência do autotransformador;
- em consequência do tamanho do autotransformador, a utilização de quadros maiores se faz necessária, elevando o preço do conjunto.

## ➤ Partida com chave série-paralelo

Na partida em série-paralelo o motor deve ser apto para trabalhar em duas tensões, sendo a menor delas igual à da rede e as outras duas vezes maior. Para a implementação deste tipo de partida é preciso que o motor possua nove terminais, partindo o motor com ligação série, em 220 V, e após atingir sua rotação nominal é realizada a comutação para a ligação em paralelo.

## ➤ *Soft-starter*

A chave eletrônica de partida consiste em um conjunto de pares de tiristores um em cada borne de potência do motor. O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente para uma tensão variável durante a aceleração do motor, comumente chamada de partida suave (*soft-starter*). Diferentemente dos sistemas de partida apresentados até então, não existem picos abruptos de correntes, assim, consegue-se obter uma corrente muito próxima à corrente nominal do motor com uma pequena variação (WEG S.A., [200-?]).

Uma grande vantagem na utilização da partida eletrônica é a ausência de arco elétrico, comum nas chaves mecânicas, o que faz com que a vida útil deste tipo de equipamento seja bem maior. Uma comparação entre as correntes e os conjugados de partida direta e partida com *soft-starter* pode ser observada na figura a seguir.



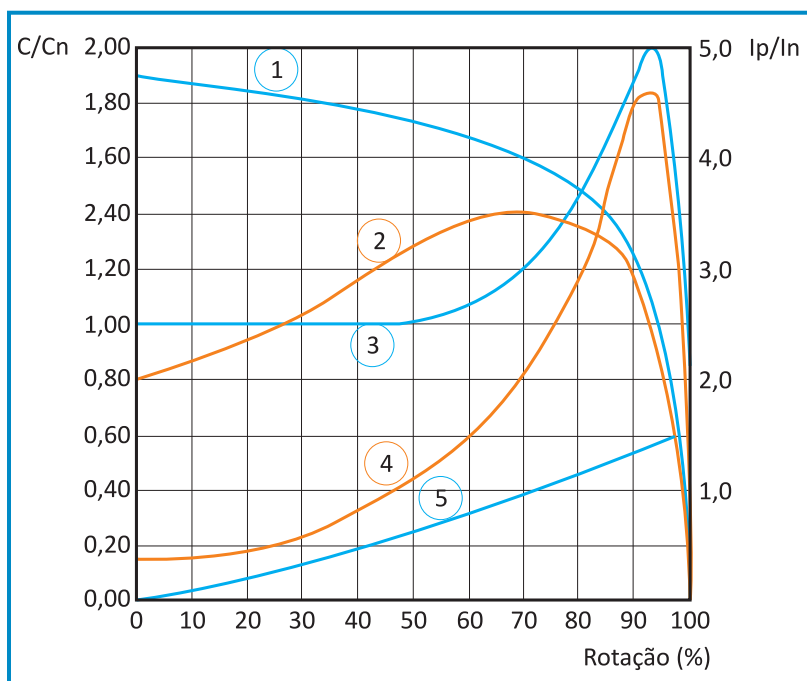


Figura 71 - Partida Direta e com *soft-starter*

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 52)

Acompanhe a descrição na figura

1. Corrente de partida direta.
2. Corrente de partida com *soft-starter*.
3. Conjugado com partida direta.
4. Conjugado com *soft-starter*.
5. Conjugado da carga.

O estudo desta unidade está em conformidade com os conhecimentos mencionados no conteúdo formativo e tem como finalidade prepará-lo para o mercado de trabalho. Vamos! Concentre-se em sua aprendizagem!



# Unidade de estudo 7

## Seções de estudo

- Seção 1 - Introdução
- Seção 2 - Princípios de funcionamento
- Seção 3 - Partida e funcionamento normal de motores monofásicos de indução
- Seção 4 - Ensaios em motores monofásicos

# Motores Monofásicos

## SEÇÃO I

### Introdução

Você sabe onde utilizamos os motores monofásicos?

Eles são utilizados na indústria e principalmente em aplicações prediais e residenciais, tais como ventiladores, condicionadores de ar e bombas d'água. A tensão de alimentação pode ser de 110 ou 220 V, podem ser ligados entre fase e neutro ou entre fase e fase, conectados a uma rede bifásica, sempre em corrente alternada. São geralmente utilizados em aplicações que exijam baixa potência. Os motores monofásicos utilizam dispositivos que auxiliam na partida, possibilitando sua aceleração (FILIPPO FILHO, 2000).

## SEÇÃO 2

### Princípios de funcionamento

Em motores monofásicos, a falta de uma fase causa a extinção do campo girante e o mesmo perde a capacidade de partida; caso o campo girante esteja em movimento, o motor irá permanecer em movimento, esse é princípio de funcionamento dos motores monofásicos que necessitam de mecanismos complementares para o auxílio na partida (WEG S.A., [200-?]).

Os rotores dos motores monofásicos são basicamente iguais aos rotores gaiola dos motores de indução trifásicos.

Um campo magnético é criado quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica e a orientação do mesmo será conforme o eixo da bobina, sua amplitude será proporcional à corrente aplicada.

Podemos verificar na figura a seguir que um “enrolamento monofásico” percorrido por uma corrente “ $I$ ” gera um campo “ $H$ ”. Para o exemplo apresentado temos um par de polos, cujas contribuições são somadas para geração do campo “ $H$ ”. O fluxo magnético atravessa o núcleo do rotor e se fecha através do núcleo do estator.

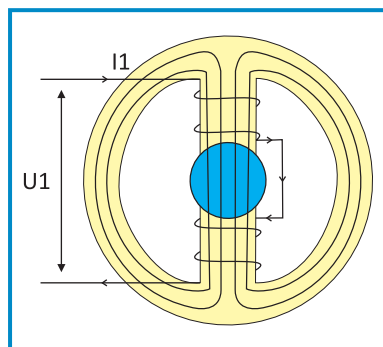


Figura 71 - Enrolamento Monofásico

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 29)

A alimentação da bobina por uma corrente alternada gera um campo magnético variável no tempo, no entanto, fixo no espaço gerando um campo pulsante. O rotor não consegue gerar conjugado, pois as barras adjacentes do rotor geram conjugados em oposição entre si e por tal razão o motor não consegue partir sem dispositivo auxiliar (WEG S.A., [200-?]).

Observe com atenção um desenho esquemático de um motor elementar monofásico.

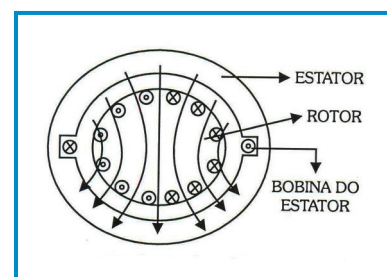


Figura 72 - Desenho Esquemático do Motor Monofásico Elementar

Fonte: Filippo Filho (2000, p. 212).

Um campo pulsante pode ser decomposto em um campo girante e sua representação gráfica pode ser verificada na figura a seguir.

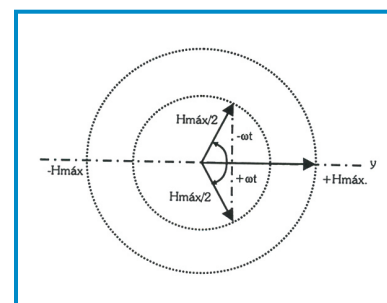


Figura 73 - Campos Girantes Derivados do campo pulsante

Fonte: Filippo Filho (2000, p. 212).

Cada campo pode ser analisado individualmente, a figura a seguir apresenta a curva do conjugado motor desenvolvido por cada um dos campos girantes. No primeiro quadrante, temos a representação do conjugado no sentido horário

e no segundo quadrante temos o conjugado no sentido anti-horário.

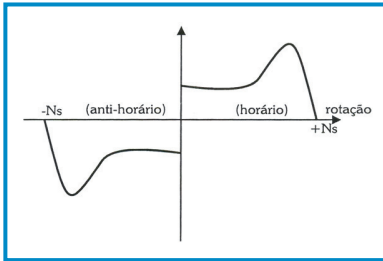


Figura 74 - Conjugado Motor de cada Campo Girante  
Fonte: Filipo Filho (2000, p. 212).

Para qualquer um dos sentidos que o motor iniciar o movimento de rotação, o campo girante irá gerar ação motora, da mesma forma que os motores de indução trifásicos após a partida.

Você pode observar que com  $N_s = 0$ , a partida é impossibilitada, pois existe uma oposição de conjugados gerados pelos campos girantes. Mesmo após a partida existirá um campo girante oposto ao sentido de giro, opondo-se ao conjugado do motor (FILIPPO FILHO, 2000).

O conjugado de frenagem que se opõe ao movimento do motor possui menor intensidade do que o conjugado de rotação do motor e o conjugado líquido do motor é a diferença entre estes dois conjugados, conforme apresentado na figura a seguir, na qual você também poderá constatar que o conjugado líquido na partida é nulo.

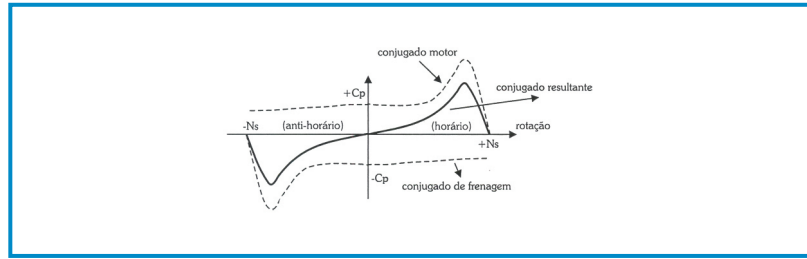


Figura 75 - Conjugado Motor Resultante  
Fonte: Filipo Filho (2000, p. 213).

### SEÇÃO 3

#### Partida e funcionamento normal de motores monofásicos de indução

A classificação de motores de indução monofásicos é comumente relacionada ao método de partida utilizado.

A definição do tipo de motor apropriado para determinada aplicação é baseada em:

- ciclo de serviço;
- necessidade de conjugado de partida e de rotação normal da carga;
- limitações na corrente de partida.

Geralmente os motores monofásicos são projetados e fabricados para aplicações específicas, visando à redução de custo.

Agora você conhecerá o motor monofásico e suas especificidades.

#### ➤ Motor monofásico com fase auxiliar

Os motores monofásicos de fase auxiliar possuem dois enrolamentos de estator, um enrolamento auxiliar (a) e um enrolamento principal (m), deslocados entre si em  $90^\circ$  elétricos, conforme apresentados na figura a seguir:

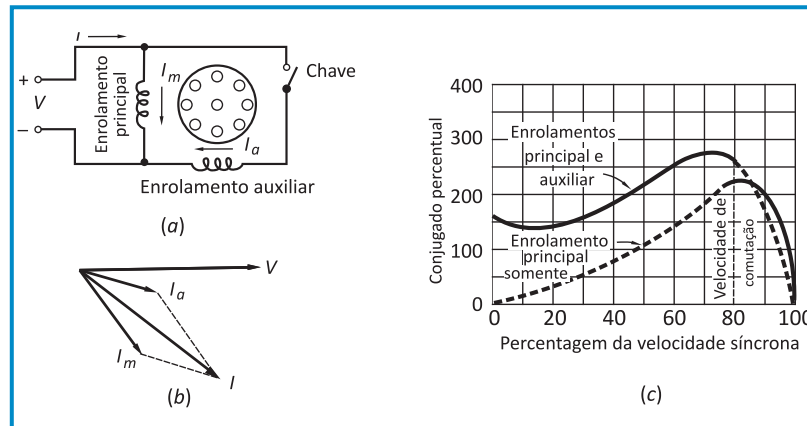


Figura 76 - Motor de Fase Auxiliar *split-phase*: (a) Ligarção, (b) Diagrama Fasorial, (c) Características de Conjugado-Velocidade Típica  
Fonte: Weg S.A. (2006, p. 11).

As correntes dos enrolamentos estão fora de fase em decorrência de o enrolamento principal ter uma relação de resistência/reatância mais baixa do que o enrolamento auxiliar. A corrente do enrolamento auxiliar  $I_a$  está adiantada em relação à corrente do enrolamento principal  $I_m$ . O máximo conjugado ocorre inicialmente no enrolamento auxiliar e então, após passado algum tempo, ocorre no enrolamento principal (WEG S.A., 2006).

As correntes nos enrolamentos equivalem a correntes bifásicas, tendo como resultado um campo girante no estator que possibilita a partida no motor. Usualmente o enrolamento auxiliar é desligado após o motor atingir cerca de 75% da velocidade síncrona, por meio de uma chave centrífuga em série com o mesmo. O desligamento da chave centrífuga não pode deixar de ocorrer, pois o enrolamento auxiliar não suporta a tensão nominal do motor por mais de alguns segundos.

A alta relação entre resistência e reatância no enrolamento auxiliar é obtida com a utilização de um fio mais fino do que no enrolamento principal. Os motores de fase auxiliar possuem geralmente estatores com ranhuras diferentes devido aos diferentes volumes das bobinas (principal e auxiliar).

Motores monofásicos de fase auxiliar possuem conjugado de partida moderado com baixa corrente de partida. Suas potências variam de 1/20 a 1/2 HP. Suas aplicações mais comuns são: bomba centrífuga, equipamentos de escritório e ventiladores.

## ➤ Motor monofásico com capacitor de partida

Os motores monofásicos com capacitor de partida também são motores de fase auxiliar, no entanto, o deslocamento de fase entre as correntes é obtido com a utilização de um capacitor em série com o enrolamento auxiliar, conforme a figura a seguir.

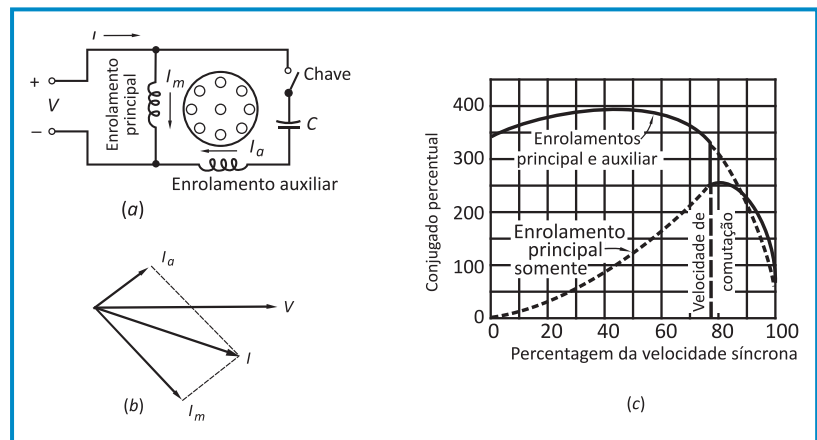


Figura 77 - Motor de Capacitor de Partida: (a) Ligações, (b) Diagrama Fasorial da Partida, (c) Característica de Conjugado-Velocidade Típica

Fonte: Weg S.A. (2006, p. 12).

Assim como nos motores de fase auxiliar, o enrolamento auxiliar dos motores tipo capacitor de partida também é desligado antes de atingir a rotação nominal. O conjunto enrolamento auxiliar/capacitor é projetado para trabalhar de modo descontínuo (WEG S.A., 2006).

Com a utilização do capacitor de partida é possível que a corrente do enrolamento auxiliar  $I_a$  com o rotor parado esteja adiantada em  $90^\circ$  elétricos em relação à corrente do enrolamento principal  $I_m$ .

O motor do tipo capacitor de partida possui conjugado de partida elevado. Suas principais aplicações são: bombas, equipamentos de refrigeração, condicionamento de ar, compressores e demais cargas que exijam maiores conjugados de partida.

## ➤ Motor monofásico com capacitor permanente

Nos motores tipo capacitor permanente não ocorre o desligamento do capacitor e do enrolamento auxiliar após a partida do motor.

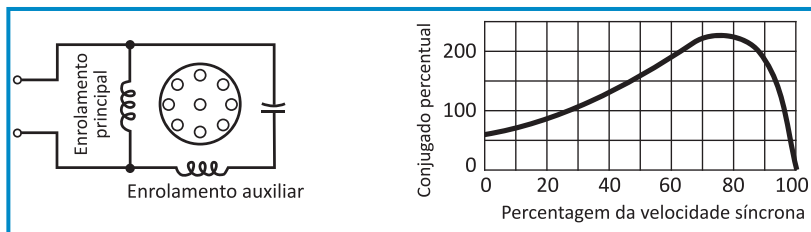


Figura 78 - Motor de Capacitor Permanente e Característica de Conjugado-Velocidade Típica

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 13).

O rendimento, o fator de potência e as pulsações de conjugados podem ser melhorados em relação aos motores monofásicos citados anteriormente, considerando que o projeto do enrolamento auxiliar e do capacitor de partida são determinados para uma carga específica e as pulsações são eliminadas, pois o capacitor age como um reservatório de energia aplainando as pulsações da potência fornecida pela alimentação monofásica.

Suas principais aplicações são em ventiladores de condicionadores de ar e ventiladores de teto.

## ➤ Motor monofásico com dois capacitores

Os motores monofásicos com dois capacitores são projetados para se obter um bom desempenho tanto na partida quanto no funcionamento. Você conhecerá na figura a seguir uma forma de se obter esse resultado.

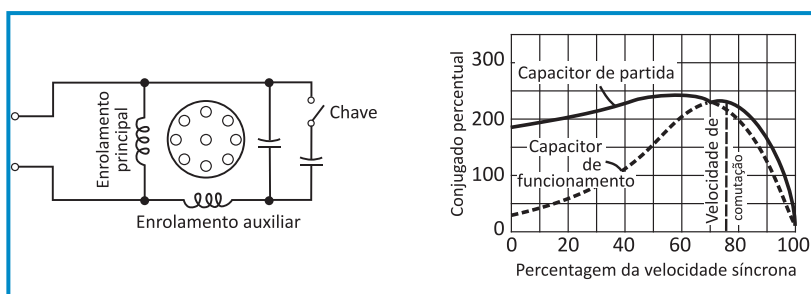


Figura 79 - Motor de Capacitor de Dois Calores e Característica de Conjugado-Velocidade Típica

Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 14).

O capacitor de partida é desligado após a partida do motor pela chave centrífuga, sua capacitância é bem maior do que o capacitor permanente e seu posicionamento está em paralelo com o mesmo. Em série com o enrolamento auxiliar está o capacitor permanente, que possui baixo valor de capacitância.

Os capacitores de partida mais utilizados são do tipo eletrolítico para CA e fabricados para serviço de partida de motores, já os capacitores permanentes geralmente são a óleo, de capacitância em torno de 40  $\mu\text{F}$ .

## ➤ Motor de polos sombreados

O motor de polos sombreados é tipicamente utilizado para potências bastante reduzidas, menores do que 0,1 cv. A bobina de arraste tem polos salientes e uma parte de cada polo é envolvida por uma espira curto-circuitada de cobre, a chamada bobina de arraste.

O fluxo gerado pelas correntes induzidas na parte do polo onde se encontra a bobina de arraste sofre um atraso em relação ao fluxo na outra parte do polo e como consequência é criado um campo girante que se desloca em direção à parte com a bobina e um pequeno conjugado de partida é criado. Nas figuras a seguir:

- pode ser observado o posicionamento da bobina de arraste e do enrolamento principal e
- é apresentada a característica de conjugado-velocidade (WEG S.A., 2006).

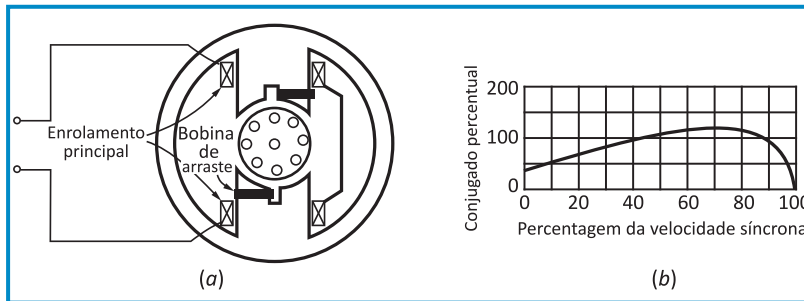


Figura 80 - Motor com Bobina de Arraste e Característica Típica de Velocidade  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 16).

Suas principais aplicações são em ferramentas portáteis e em aparelhos eletrodomésticos.

Acompanhe o exemplo a seguir.

### Exemplo 1

Segundo o catálogo de um fabricante, um motor de indução monofásico possui as seguintes características: potência 2 cv, rpm 3.510 (2 polos), corrente nominal 12,0 A na tensão 220 V. Calcule a corrente e o fator de potência para uma tensão de 115 V, para um rendimento do motor de 70%.

$$P_{el} = \frac{P_{mec}}{\eta} = \frac{736 \times 2,0}{0,7} = 2102W$$

$$S = V_L \cdot I_L = 220 \times 12 = 2640VA$$

$$FP = \cos \theta = \frac{P}{S} = \frac{2102}{2640} = 0,796$$

$$P_{el} = V_L \cdot I_L \cdot \cos \theta$$

$$I_L = \frac{2102}{115 \times 0,796} = 23,0A$$

A próxima seção traz informações que lhe possibilitará aprender descobrindo novas dimensões e novos significados.

## SEÇÃO 4

### Ensaio em motores monofásicos

O ensaio em motores monofásicos tem o objetivo de apresentar como realizar na prática as conexões, mecânicas e elétricas, de equipamentos auxiliares com o motor e estudar algumas propriedades e características dos mesmos.

O procedimento descrito visa apenas nortear a realização do ensaio e as características da máquina apresentada neste roteiro, deverá apenas servir como referência.

Equipamentos necessários para a realização do ensaio:

- fonte CA ajustável de 0 a 120 V;
- eletrodinamômetro para cargas até 3 N.m;
- tacômetro;
- amperímetro;
- ohmímetro;
- eletrodinamômetro;
- dinamômetro;
- voltímetro; e
- wattímetro.

O manuseio de equipamentos energizados e com partes girantes traz riscos de danos físicos, portanto, realize as atividades propostas sob a supervisão de um profissional habilitado e siga as instruções de segurança. Todas as alterações e ligações devem ser realizadas com os equipamentos desligados.

### ➔ Ensaio em motores monofásicos com capacitor permanente

O objetivo deste ensaio é você avaliar os parâmetros do motor monofásico com capacitor permanente, tais como: velocidade, torque e características elétricas.

Especificações da máquina analisada: motor monofásico com capacitor permanente 0,5 cv, 220 V, 1.610 rpm.

#### Procedimento

1. Medir com o auxílio de um ohmímetro as resistências do enrolamento primário e do enrolamento secundário:

$$R_{\text{PRIMÁRIO}} = 6,25 \Omega$$

$$R_{\text{SECUNDÁRIO}} = 6,25 \Omega$$

Monte o circuito conforme apresentado na figura a seguir:

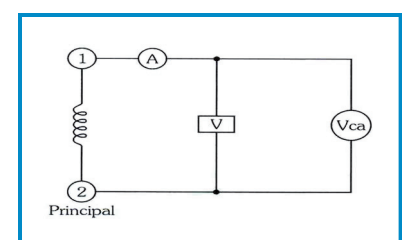


Figura 81 - Medindo com Ohmímetro  
Fonte: Weg S.A. ([200-?], p. 149).

A fonte CA deverá estar em 0 V.



Eleve a tensão no enrolamento primário até obter o valor de 2 A no amperímetro. Desligue a fonte e calcule a impedância do primário  $Z_{\text{Primário}}$  como segue:

$$I = 2 \text{ A}$$

$$Z_{\text{PRIMÁRIO}} = \frac{U}{I} = 14,35\Omega$$

$$U = 28,70 \text{ Volts}$$

Eleve a tensão no enrolamento secundário até obter o valor de 2 A no amperímetro. Desligue a fonte e calcule a impedância do secundário

$Z_{\text{Secundário}}$  como se segue:

$$I = 2 \text{ A}$$

$$Z_{\text{SECUNDÁRIO}} = \frac{U}{I} = 12,92\Omega$$

$$U = 25,83 \text{ Volts}$$

2. Com os valores das resistências  $R_{\text{PRIMÁRIO}}$  e  $R_{\text{SECUNDÁRIO}}$  e das impedâncias  $Z_{\text{PRIMÁRIO}}$  e  $Z_{\text{SECUNDÁRIO}}$ , determine o ângulo de defasagem entre tensão e corrente nos enrolamentos por meio da expressão:

$$\varphi = \arccos \frac{R}{Z}$$

$$\text{Chegando em } \varphi_{\text{PRIMÁRIO}} = 64,18^\circ$$

$$\text{e } \varphi_{\text{SECUNDÁRIO}} = 61,07^\circ$$

3. Determine a velocidade do campo girante pela seguinte expressão:

$$n_s = \frac{120 \times f}{2p} = 1800 \text{ rpm}$$

4. Monte o circuito conforme apresentado na figura anteriormente.
5. Acople o dinamômetro, com regulagem inicial em 0 V, ao motor monofásico.
6. Ajuste a fonte de tensão CA para tensão nominal do motor, ajuste o dinamômetro para a máxima carga e ligue-o.
7. Acione a fonte e meça a corrente de partida:  $I_p = 9,6 \text{ A}$ .
8. Variando os valores de carga, meça a velocidade, a corrente no motor e o torque desenvolvido, preenchendo o quadro a seguir:

Tensão (V)	Velocidade (rpm)	Carga (N.m)	Corrente (A)	Wattímetro (W)
120	1779	0	1,31	133
120	1754	0,35	2,03	224
120	1735	0,7	2,40	276
120	1710	1	2,93	344
120	1675	1,4	3,63	427

9. Determine o valor da potência desenvolvida (no eixo) pelo motor para as condições de carga citadas na tabela anterior, utilizando a seguinte equação:

$$P(W) = \text{RPM} \times \text{N.m} \times 0,105$$

Para a conversão da potência W em CV, divida por 736; e para a conversão para HP, divida por 746. O valor de carga que exigiu uma potência imediatamente menor ou igual à potência do motor será à plena carga.



Carga (N.m)	W Eixo	HP Eixo	Potência aparente total VA
0	0	0	157,2
0,35	64	0,086	243,6
0,7	127	0,170	288,0
1	179	0,240	351,6
1,4	246	0,330	435,6

10. Determine o fator de potência do motor sem carga e à plena carga a partir das seguintes expressões:

$$\cos \varphi_{\text{avazio}} = \frac{P(W)}{S(VA)} = \frac{133}{157} = 0,85$$

$$\cos \varphi_{\text{a plena carga}} = \frac{P(W)}{S(VA)} = \frac{344}{351,6} = 0,98$$

11. Determine a eficiência a partir da seguinte relação:

$$\text{Efic\%} = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{ent}}} \times 100 = \frac{179}{344} \times 100 = 52,0\%$$

12. Determine as perdas:  $344 - 179 = 165 \text{ W}$ .
13. Determine a potência reativa gerada no motor:

$$Q = \text{Sen} \varphi \times S = 69,97 \text{ VAR}$$

14. Determine a corrente nominal do motor:

$$I_N = \frac{CV \times 736}{120V \times \text{Cos} \varphi \times \eta} = 3,0A$$

Sendo:  $\eta$  = eficiência do motor à plena carga.

15. Para determinar o torque de partida, ajuste o eletrodinamômetro para a máxima carga e com o motor totalmente na inércia ligue a fonte, o valor do torque é extraído diretamente do eletrodinamômetro por leitura direta: torque de partida =  $0,6 \text{ N.m}$ .

Esta unidade de estudo proporcionou novos conhecimentos sobre os motores monofásicos, sua aplicação e especificidades, permitindo que você conheça todo o processo de utilização para aplicabilidade na sua carreira profissional.



# Unidade de estudo 8

## Seções de estudo

- Seção 1 - Introdução
- Seção 2 - Princípios de funcionamento
- Seção 3 - Aspectos construtivos
- Seção 4 - Excitação de campo
- Seção 5 - Circuito equivalente do gerador CC
- Seção 6 - Equações da tensão no gerador e regulação de tensão
- Seção 7 - Perdas e eficiência de uma máquina CC

# Geradores de Corrente Contínua

## SEÇÃO I Introdução

O gerador CC é uma máquina que realiza a conversão de energia mecânica de rotação em energia elétrica. Existem diversas fontes que podem fornecer a energia mecânica necessária, tais como: vapor, óleo diesel, queda-d'água, motor elétrico, entre outras.

A aplicação da corrente contínua ocorre em vários setores industriais, tais como: cargas de baterias e acumuladores, eletroímãs de aplicações industriais, tração elétrica e instalações de eletroquímicas.

## SEÇÃO 2 Princípios de funcionamento

O gerador CC mais simples é composto por um enrolamento de armadura contendo uma única espira que é interceptada pelo campo magnético gerado.

Com o movimento de rotação da espira ocorre a variação do fluxo magnético e em decorrência dessa variação surge uma f.e.m. (Lei da Indução Magnética).

$$f.e.m = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Equação 59

Podemos observar na figura a seguir o posicionamento da espira em três momentos diferentes e o gráfico da f.e.m. com seu formato senoidal.

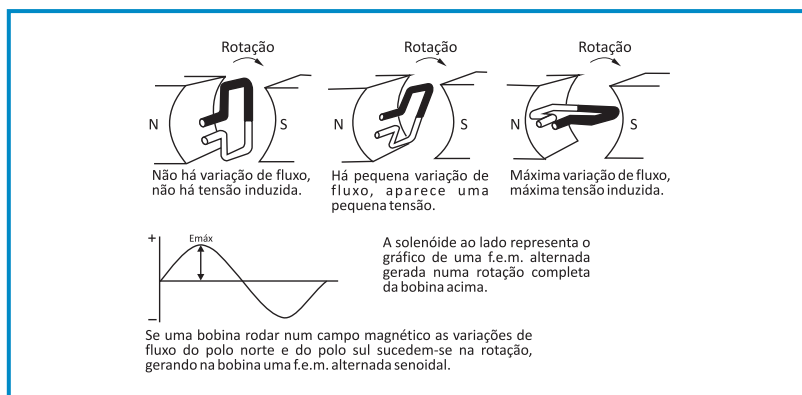


Figura 82 - Princípio de Funcionamento do Gerador cc

Fonte: SENAI (1997, p. 33).

Uma forma de retificar o formato senoidal da f.e.m. apresentada é pela utilização de um comutador que é formado por segmentos de cobre. Na figura a seguir podemos observar o comportamento da f.e.m. em função da posição da espira para cinco posições diferentes, formando um ciclo completo de rotação (SENAI, 1997).

## DAE - Divisão de assistência às empresas

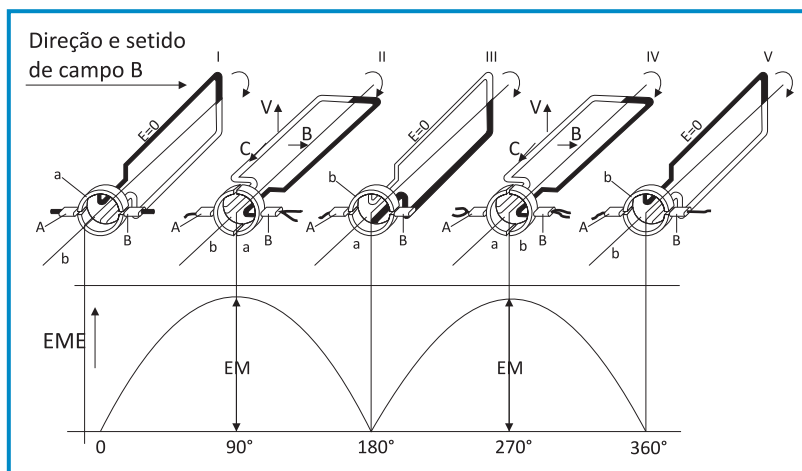


Figura 83 - Forma de Onda da F.E.M. X Posição da Espira

Fonte: SENAI (1997, p. 33).

Na posição IV da figura a seguir, a bobina apresenta a máxima f.e.m., com o condutor escuro na frente do polo N e o branco na frente do polo S, “B” será sempre positiva e “A” sempre negativa enquanto for mantida a rotação indicada pela seta circular e o sentido de campo.

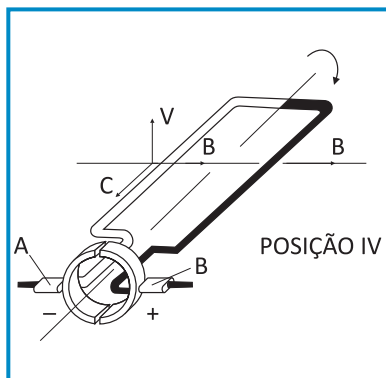


Figura 84 - Bobina Gerando Máxima F.E.M.

Fonte: SENAI (1997, p. 34).

## SEÇÃO 3

### Aspectos construtivos

As principais partes que compõem os geradores de corrente contínua são basicamente as mesmas dos motores de corrente contínua.

Agora você conhecerá em detalhes cada uma das partes que compõem os geradores de corrente contínua.

#### ➤ Armadura

Para o gerador CC a armadura realiza movimento de rotação em decorrência de uma força mecânica externa e a tensão gerada na mesma é ligada a um circuito externo.

Para o motor de corrente contínua a armadura recebe a corrente proveniente de uma fonte elétrica externa que faz com que a armadura gire, em decorrência desse movimento de rotação a armadura também é chamada de rotor.

#### ➤ Comutador

Comutador é o dispositivo responsável pela conversão da corrente alternada que circula pela armadura em corrente contínua. O comutador figura conforme mostrado a seguir, ele é composto de um par de segmentos de cobre para cada enrolamento da armadura, sendo estes isolados entre si e isolados do eixo, uma vez que são fixados no mesmo. No chassi da máquina são montadas duas escovas fixas que possibilitam o contato com segmentos opostos do comutador (GUSSOW, 1985).

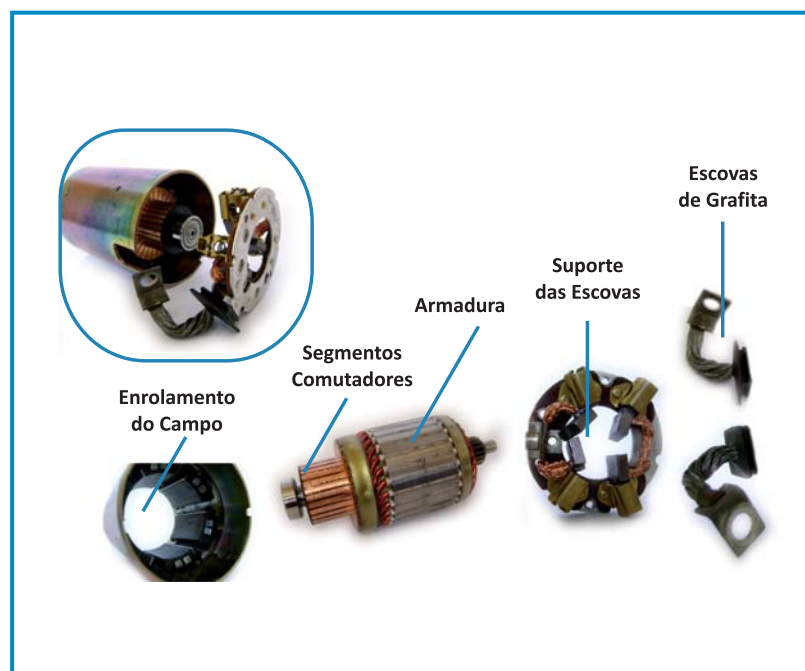


Figura 85 - As partes Principais de um Motor cc

Fonte: Adaptado de Rocha (1985, p. 250).

#### ➤ Escovas

São conectores de grafita fixos, montados sobre molas que possibilitam o deslizamento sobre o comutador no eixo da armadura, servindo de contato entre os enrolamentos e a carga externa.

#### ➤ Enrolamento de campo

O enrolamento de campo tem um eletroímã responsável pela produção do fluxo interceptado pela armadura. No gerador CC a fonte de corrente de campo pode ser separada ou proveniente da própria máquina, chamada de excitador.

## SEÇÃO 4

### Excitação de campo

O tipo de excitação de campo utilizado define o nome dos geradores CC. Quando a excitação é realizada por uma fonte CC separada, como por exemplo, uma bateria, ele é denominado de gerador de excitação separada.

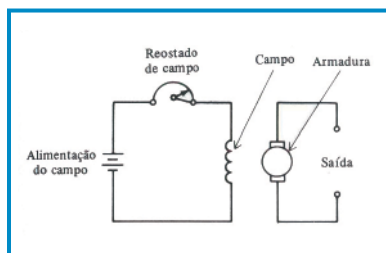


Figura 86 - Gerador de Excitação separada  
Fonte: Gussow (1985, p. 255).

Os geradores que possuem sua própria excitação são chamados de geradores autoexcitados. Para as configurações em que o circuito de armadura estiver em paralelo com o campo, ele é chamado de gerador em derivação; quando o campo está em série com a armadura, é chamado de gerador série; se forem usados os dois campos, série e paralelo, é chamado de gerador composto que pode apresentar as configurações derivação curta e derivação longa. Acompanhe na figura a seguir.

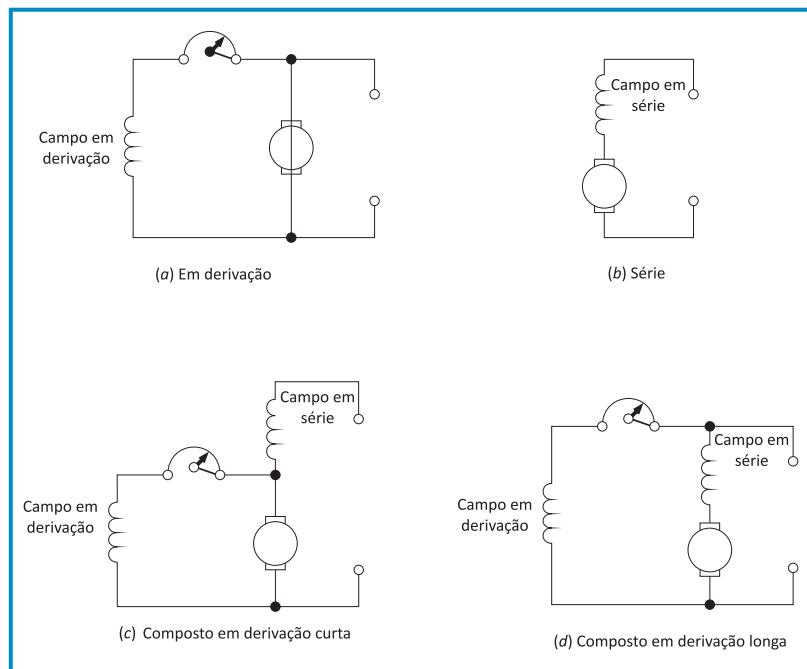


Figura 87 - Autoexcitados  
Fonte: Gussow (1985, p. 255).

## SEÇÃO 5

### Circuito equivalente do gerador CC

As relações entre tensão e corrente num circuito equivalente de um gerador CC são, de acordo com a Lei Ohm, conforme apresentado na figura a seguir (GUSSOW, 1985).

$$V_{ta} = V_g - I_a r_a$$

Equação 60

$$V_t = V_g - I_a (r_a + r_s)$$

Equação 61

$$I_L = I_a - I_d$$

Equação 62

Sendo:

$V_{ta}$  = tensão no terminal da armadura (V);

$V_g$  = tensão gerada na armadura (V);

$I_a$  = corrente na armadura (A);

$V_t$  = tensão no terminal do gerador (V);

$r_a$  = resistência do circuito da armadura ( $\Omega$ );

$r_s$  = resistência do campo série ( $\Omega$ );

$r_d$  = resistência do campo em derivação ( $\Omega$ );

$I_L$  = corrente na linha (A);

$I_d$  = corrente do campo em derivação (A).

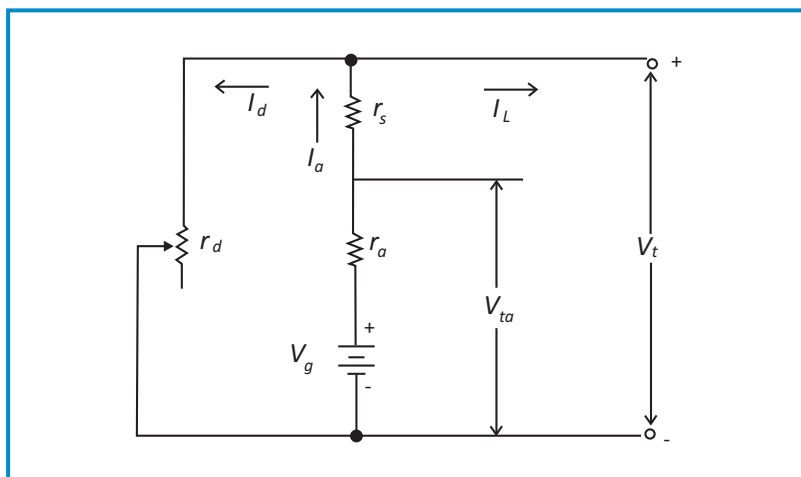


Figura 88 - Circuito Equivalente

Fonte: Gussow (1985, p. 256).

Acompanhe o exemplo!

#### Exemplo 1

Considere um gerador CC de 200 kW e 250 V, com uma corrente na armadura de 600 A, uma resistência na armadura de 0,020  $\Omega$ , e uma resistência de campo em série de 0,004  $\Omega$ . Determine a tensão gerada na armadura considerando que o gerador opera a 1.800 rotações por minuto (rpm) impostas por um motor.

$$V_g = V_t + I_a (r_a + r_s)$$

$$V_g = 250 + 600 (0,020 + 0,004) = 250 + 14,4 = 264,4 \text{ V}$$

## SEÇÃO 6

### Equações da tensão no gerador e regulação de tensão

Em um gerador a tensão média  $V_g$  pode ser determinada pela seguinte equação:

Sendo:

- $V_g$  = tensão média gerada por um gerador CC (V);
- $p$  = número de polos;
- $Z$  = número total de condutores na armadura (também chamados de indutores);
- $\phi$  = fluxo por polo;
- $n$  = velocidade da armadura (rpm);
- $b$  = número de percursos paralelos através da armadura (dependendo do tipo de enrolamento da armadura).

Sendo os fatores da equação de  $V_g$  fixos, com exceção de  $\phi$  e  $n$ , a equação pode ser simplificada da seguinte forma:

$$V_g = k\phi n$$

Equação 63

Sendo:

$$V_g = \frac{pZ\phi n}{60b \cdot 10^8}$$

Equação 64

Podemos concluir a partir da análise da equação acima que a f.e.m. induzida é proporcional à razão com que o fluxo está sendo interceptado.

Acompanhe outro exemplo.

### Exemplo 2

Considere um gerador com sua rotação de 1.800 rpm e tensão de 120 V, determine a tensão gerada para as seguintes condições:

- se o fluxo for reduzido em 20%, com velocidade permanecendo constante;
- se a velocidade for reduzida a 1.620 rpm com o fluxo permanecendo inalterado.

$$V_{g1} = k\phi_1 n_1$$

ou

$$k = \frac{V_{g1}}{\phi_1 n_1}$$

$$V_{g2} = k\phi_2 n_1 = \frac{V_{g1}}{\phi_1 n_1} \phi_2 n_1 = V_{g1} \frac{\phi_2}{\phi_1} := 120 \frac{1,00}{1,00 - 0,20} = 120(0,80) = 96V$$

$$V_{g2} = k\phi_1 n_2 = \frac{V_{g1}}{\phi_1 n_1} \phi_1 n_2 = V_{g1} \frac{n_2}{n_1} = 120 \frac{1620}{1800} = 108V$$

A **regulação de tensão** é a diferença entre a tensão do terminal sem carga (SC) e com carga (CM), é expressa com uma porcentagem do valor de carga máxima e é dada pela seguinte relação:

$$\text{Regulação de tensão} = \frac{\text{tensão SC} - \text{tensão com CM}}{\text{tensão com CM}}$$

Equação 65

Um baixo percentual de regulação de tensão significa que a variação de tensão no gerador é mínima com a variação da carga no mesmo.

Mais um exemplo para você compreender melhor o assunto.

### Exemplo 3

Determine o percentual de regulação de tensão de um gerador em derivação que à plena carga apresenta uma tensão de terminal de 120 V e sem carga apresenta 144 V.

$$\begin{aligned} \text{Regulação de tensão} &= \frac{\text{tensão SC} - \text{tensão com CM}}{\text{tensão com CM}} = \\ &= \frac{144 - 120}{120} = \\ &= \frac{24}{120} = \\ &= 0,20 = 2\% \end{aligned}$$

## SEÇÃO 7

### Perdas e eficiência de uma máquina CC

Segundo Gussow (1985), as perdas nos geradores e nos motores CC podem ser divididas em: perdas no cobre e perdas mecânicas provenientes da rotação da máquina. Podem ser descritas da forma seguinte.

1. Perdas no cobre
  - a. Perdas  $I^2R$  na armadura.
  - b. Perdas de campo:
    - $I^2R$  do campo em derivação;
    - $I^2R$  do campo em série.
2. Perdas mecânicas ou rotacionais
  - a. Perdas no ferro:
    - perdas por corrente parasita;
    - perdas por histerese.
  - b. Perdas por atrito:
    - atrito no mancal (rolamento);
    - atrito nas escovas;
    - perdas pelo atrito com o ar.

As **perdas no cobre** são consequência da passagem de corrente através de uma resistência do enrolamento. As **corrente parasitas** são geradas pela f.e.m. induzida no núcleo magnético à medida que a armadura realiza o movimento de rotação no campo magnético. As **perdas por histerese** são geradas quando o núcleo é magnetizado inicialmente em um sentido e num momento posterior no sentido oposto.

As demais perdas rotacionais são geradas pelo atrito entre as escovas e o comutador, pelo atrito entre as partes girantes e o ar e o atrito de rolamento no mancal.

A eficiência é a razão entre a potência útil na saída e a potência total na entrada.

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{saída}}{\text{entrada}}$$

Equação 67

ou

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{entrada} - \text{perdas}}{\text{entrada}} = \frac{\text{saída}}{\text{saída} + \text{perdas}}$$

Equação 68

A eficiência também pode ser expressa de forma percentual.

Acompanhe mais um exemplo.

$$\text{Eficiência(\%)} = \frac{\text{saída}}{\text{entrada}} \times 100$$

Equação 69

#### Exemplo 4

Um gerador em derivação possui uma resistência de campo de  $40 \Omega$  e uma resistência de armadura de  $0,4 \Omega$ . Considerando que o gerador entrega para a carga uma corrente de  $30 \text{ A}$  com uma tensão no terminal de  $120 \text{ V}$ . Determine:

- a. a corrente de campo;
- b. a corrente de armadura;
- c. as perdas no cobre;
- d. a eficiência com a carga, considerando que as perdas rotacionais sejam de  $300 \text{ W}$ .

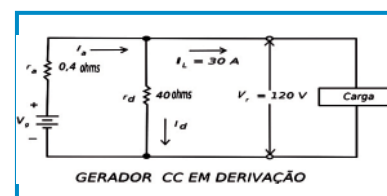


Figura 89 - Gerador cc em Derivação  
Fonte: Gussow (1985, p. 259).



$$a. I_d = \frac{V_t}{r_d} = \frac{120}{40} = 3A$$

$$I_a = I_L + I_d = 30 + 3 = 33A$$

$$b. I_a = I_L + I_d = 30 + 2 = 32A$$

c. Perda na armadura =

$$I_a^2 r_a = 33^2 \cdot (0,4) = 435,6W$$

$$I_a^2 r_a = 32^2 (0,4) = 435,6W$$

Perda do campo em derivação =

$$I_d^2 r_d = 3^2 \cdot (40) = 360W$$

$$I_d^2 r_d 2^2 = (60) = 240W$$

Perda no cobre =  
perda na armadura + perda  
em derivação =

$$435 + 360 = 795,6W$$

$$d. \text{Eficiência} = \frac{\text{saída}}{\text{saída} + \text{perdas}}$$

$$\text{Saída} = P = V_t I_L = 120(30) = 3600W$$

Perda total = perdas no cobre + perda rotacional =  
795,6 + 300 = 1095,6W.

$$\text{Eficiência (\%)} = \frac{3.600}{3.600 + 1.095,6} \cdot 100 = \frac{3600}{4695,6} \cdot 100 = 0,766 \cdot (100) = 76,6\%$$

Mais uma unidade de estudo chega ao fim e por meio de exemplos você pôde acompanhar o funcionamento do gerador CC. Todo o conteúdo desta unidade proporcionou novos conhecimentos garantindo à sua prática profissional uma aprendizagem efetiva.



# Unidade de estudo 9

## Seções de estudo

- Seção 1 - Introdução
- Seção 2 - Princípios de funcionamento
- Seção 3 - Torque
- Seção 4 - Forças contra-eletromotriz
- Seção 5 - Circuito equivalente do motor CC
- Seção 6 - Velocidades de um motor
- Seção 7 - Tipos de motores
- Seção 8 - Requisitos de partida dos motores

# Motores de Corrente Contínua

## SEÇÃO 1

### Introdução

Em função de seu princípio de funcionamento, os motores CC possibilitam variar a velocidade de zero até a velocidade nominal aliada à possibilidade de se ter um conjugado constante. Essa característica se torna muito importante em aplicações que exigem uma grande variação de rotação com uma ótima regulação e precisão de velocidade.

## SEÇÃO 2

### Princípio de funcionamento

Basicamente os motores CC possuem os mesmos componentes que os geradores CC. Para estes motores o indutor e o induzido são alimentados por corrente contínua.

O campo magnético originado nas bobinas do induzido, pela passagem de corrente elétrica, deforma o fluxo indutor dando lugar a forças que obrigam os condutores a se deslocarem no sentido que há menor número linhas de força. Observe a figura a seguir.

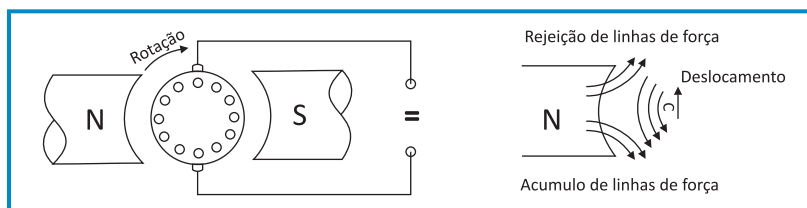


Figura 90 - Linhas de Força

Fonte: Gussow (1985).

## SEÇÃO 3

### Torque

O torque (T) gerado por um motor CC é proporcional à intensidade do campo magnético e à corrente de armadura, sendo dado por:

$$T = k_t \phi I_a$$

Sendo:

T = torque (m.kg);

$K_t$  = constante que depende das dimensões físicas do motor;

$I_a$  = corrente da armadura (A);

$\phi$  = número total de linhas de fluxo que entrem na armadura por um polo N.

Equação 70

## SEÇÃO 4

### Força

### contra-eletromotriz

Os condutores do induzido interceptam o fluxo do indutor em decorrência do movimento de rotação. Pelo princípio de Faraday é gerada nos condutores uma f.e.m. induzida com o sentido oposto à tensão aplicada no motor (Lei de Lenz). Por se opor à tensão aplicada ao motor, a tensão induzida nos condutores é chamada de força contra-eletromotriz (f.c.e.m.), que é determinada pela expressão:

$$V_g = \frac{\phi \cdot n \cdot Z}{60 \cdot 10^8} \cdot \frac{p}{a}$$

Sendo:

$V_g$  = força contra-eletromotriz (V);

n = Velocidade angular (rpm);

Z = número de condutores eficazes;

p = número de polos;

a = pares de ramais internos que dependem do tipo de enrolamento.

Equação 71

## SEÇÃO 5

### Circuito equivalente de motor CC

As relações entre as tensões e a corrente num circuito equivalente de um motor CC são as seguintes:

$$V_{ta} = V_g + I_a r_a$$

Equação 72

$$V_t = V_g + I_a (r_a + r_s)$$

Equação 73

$$I_L = I_a + I_d$$

Equação 74

Sendo

- $V_{ta}$  = tensão no terminal da armadura (V);
- $V_g$  = força contra-eletromotriz, f.c.e.m. (V);
- $I_a$  = corrente da armadura (A);
- $V_t$  = tensão no terminal do motor (V).

E os parâmetros  $r_a$ ,  $r_s$ ,  $r_d$ ,  $I_L$ , e  $I_d$  representam as mesmas grandezas definidas no circuito equivalente de um gerador CC. Uma comparação entre o circuito equivalente de um gerador e o circuito equivalente de um motor mostra que a única diferença está no sentido da corrente na linha e na armadura.

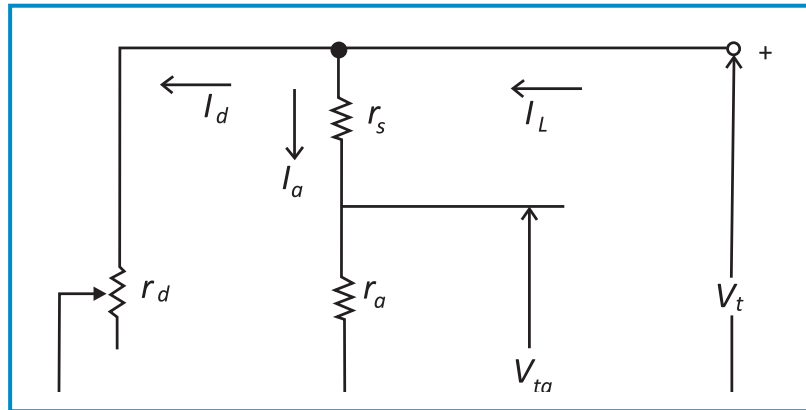


Figura 91 - Circuito Equivalente de um Motor CC

Fonte: Gussow (1985).

Veja o exemplo.

### Exemplo 1

Calcule a f.c.e.m. de um motor quando a tensão no terminal é de 120 V e a corrente na armadura de 25 A. A resistência da armadura é de  $0,16 \Omega$  e a corrente de campo pode ser desprezada. Qual é a potência produzida pela armadura do motor? Qual é a potência liberada para o motor em quilowatts?

$$a. \quad V_t = V_g + I_a r_a \quad r_s = 0$$

$$V_g = V_t - I_a r_a = 120 - 25 \cdot (0,16) = 120 - 4 = 116V$$

b. Potência Produzida

$$V_g I_a = 116(25) = 2900W$$

c. Potência Liberada

$$V_t I_L = 120(25) = 3000W$$

## SEÇÃO 6

### Velocidade de um motor

A velocidade de um motor é expressa em rotações por minuto (rpm). Uma elevação no fluxo de campo provoca a diminuição da velocidade do motor, o inverso ocorre com a redução do fluxo de campo. Essa relação é utilizada para o controle de velocidade através da variação da resistência no circuito de campo e é dada por:

$$\text{Regulação de velocidade} = \frac{\text{Vel. sem carga} - \text{Vel. com carga máx.}}{\text{Velocidade com carga máxima}}$$

Equação 75

#### Exemplo 2

Um motor CC em derivação apresenta uma rotação de 1.800 rpm sem carga, quando uma carga é imposta ao mesmo, sua velocidade é reduzida para 1.720 rpm. Determine a regulação de velocidade.

$$\text{Regulação de velocidade} = \frac{\text{Vel. SC} - \text{Vel. CM}}{\text{Vel. CM}}$$

$$\text{Regulação de velocidade} = \frac{1.800 - 1.720}{1.720} = 0,046 = 4,6\%$$

## SEÇÃO 7

### Tipos de motores

Vamos juntos conhecer alguns tipos de motores?

#### ➤ Motor em derivação

O motor em derivação conforme figura a seguir (A) é o tipo mais comum de motor CC, seu torque aumenta linearmente com o aumento da corrente de armadura e sua velocidade diminui à medida que a corrente de armadura aumenta acompanhe também na figura a seguir (B) (GUS-SOW, 1985).

A determinação de velocidade é feita inserindo uma resistência de campo utilizando um reostato, e para um determinado valor da resistência de campo a velocidade do motor permanece praticamente constante independente da carga. A velocidade de referência é a velocidade do motor com carga máxima.

Os dispositivos utilizados para a partida em motores CC devem limitar a corrente de partida da armadura entre 125 e 200% do valor da corrente de carga máxima.

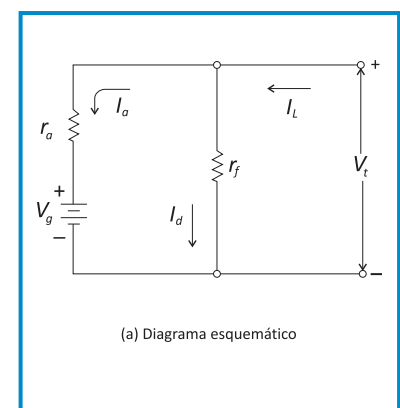
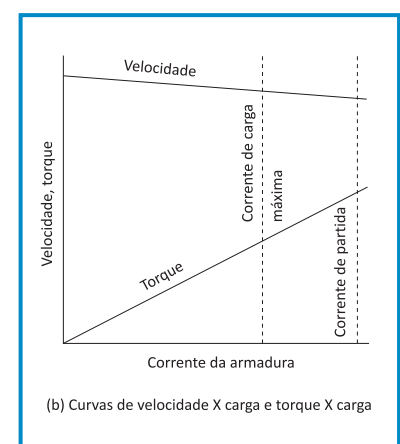


Figura 92 - (A) Diagrama Esquemático

Fonte: Gussow (1985).



(B) Curvas de Velocidade x Carga, Torque x Carga

Fonte: Gussow (1985).

## ➤ Motor série

No motor série o campo e a armadura são ligados em série conforme a figura a seguir. Geralmente é utilizado para aplicações que exijam deslocamento de grandes cargas como em guindastes, pois produz um torque elevado com grandes valores de corrente na armadura a uma baixa rotação, observe novamente a figura a seguir.

Sem aplicação de carga a velocidade aumenta indeterminadamente até que o motor se danifique, para estes motores o acoplamento com a carga é feito de forma direta, sem utilização de correias e polias.

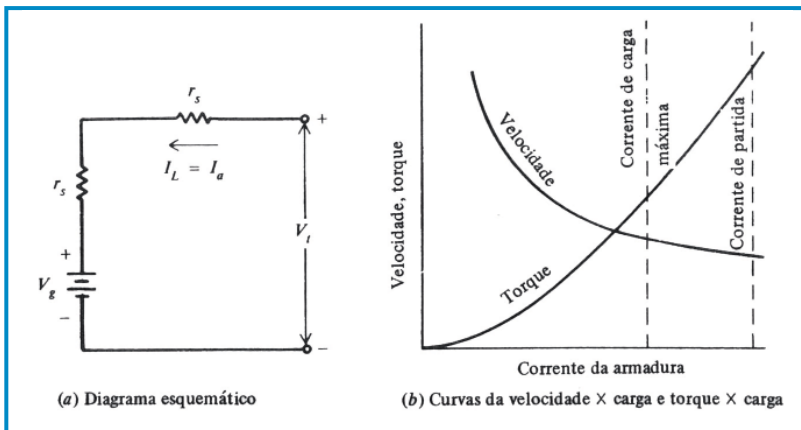


Figura 93 – (A) Diagrama Esquemático, (B) Curvas da Velocidade x Carga, Torque x Carga

Fonte: Gussow (1985).

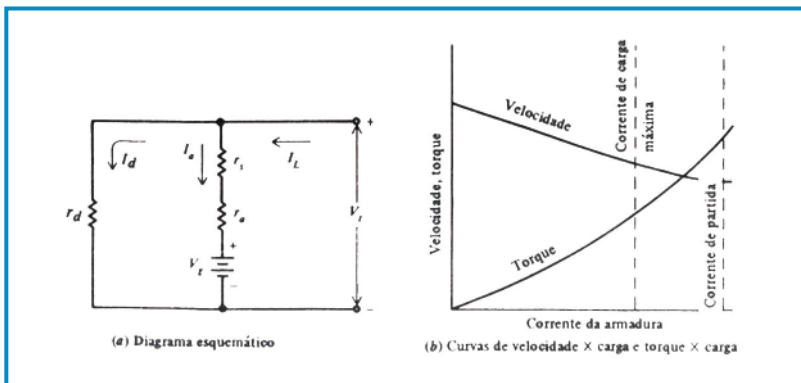


Figura 94 - (A) Diagrama Esquemático, (B) Curvas da Velocidade x Carga, Torque x Carga

Fonte: Gussow (1985).

## ➤ Motor composto

O motor composto associa as características dos motores em derivação com as características dos motores em série. Sua velocidade reduz com o aumento de carga.

Possui maior torque se comparado com o motor em derivação e não apresenta problemas no funcionamento sem carga como ocorre com os motores série.

## SEÇÃO 8

### Requisitos de partida dos motores

Há duas exigências durante a partida dos motores, veja!

1. Motor e linha de alimentação devem estar protegidos contra correntes elevadas no período de partida, para tanto, é colocada uma resistência em série com o circuito da armadura.
2. O torque de partida no motor deve ser o maior possível para fazer o motor atingir a sua velocidade máxima no menor tempo possível.

O valor da resistência de partida necessária para limitar a corrente de partida da armadura até o valor desejado é:

$$R_s = \frac{V_t}{I_s} - r_a$$

Sendo:

$R_s$  = resistência de partida ( $\Omega$ );

$V_t$  = tensão do motor (V);

$I_s$  = corrente de partida desejada na armadura (A);

$r_a$  = resistência da armadura ( $\Omega$ ).

Equação 76

### Exemplo

Para um motor em derivação, conforme a figura a seguir, com resistência de circuito de campo de  $50 \Omega$ , determine a corrente de campo, a corrente de linha e a potência de entrada do motor sabendo que o mesmo recebe uma tensão de linha de 240 V e possui uma corrente de armadura de 25 A.

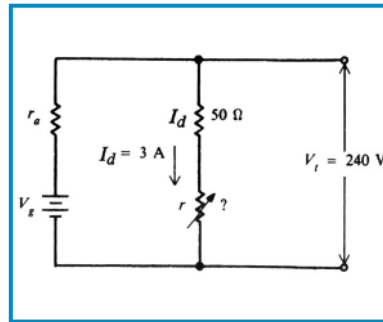


Figura 95 - Motor em Derivação

Fonte: Gussow (1985).

$$I_d = \frac{240}{50} = 4,8A$$

$$I_1 = I_f + I = 4,8 + 25 = 29,8A$$

$$P_{1N} = V_t I_L = 240 \cdot (29,8) = 7,15kW$$

Mais uma unidade de estudo chega ao fim e toda a sua aprendizagem foi construída a partir da leitura criteriosa dos assuntos apresentados. E agora cabe a você identificar as necessidades práticas para efetiva aplicação dos conceitos estudados.



# Unidade de estudo 10

## Seções de estudo

Seção 1 - Energia

Seção 2 - Potência

Seção 3 - Geração de energia

Seção 4 - Cogeração de energia

Seção 5 - Sistema de geração



# Geração de Energia

## SEÇÃO 1

### Energia

A energia é definida como a quantidade de trabalho que um sistema tem a capacidade de fornecer, a mesma não pode ser criada, pode apenas ser transformada. Existem vários processos de transformação de energia e em cada um deles uma parte da energia é perdida na forma de calor em decorrência de esforços mecânicos e atrito. A relação entre a energia que entra e a energia que sai do sistema é denominada rendimento.

Usualmente a capacidade de produção de energia é dada em quilowatt hora ou megawatt hora. Podemos seguir em frente? O assunto desta unidade despertará muito o seu interesse.

## SEÇÃO 2

### Potência

Geralmente a potência gerada é medida em quilowatt (kW) ou megawatt (MW). A potência pode ser definida como a quantidade de energia gerada ou consumida por unidade de tempo.

É importante salientar que a potência pode ser medida em qualquer instante de tempo enquanto que a energia necessita de um intervalo de tempo para que seja medida.

## SEÇÃO 3

### Geração de energia

A geração de energia elétrica é a conversão de qualquer outro tipo de energia em energia elétrica.

O processo de geração geralmente ocorre em dois estágios: no primeiro estágio uma máquina primária transforma um tipo de energia, como por exemplo, hidráulica, em energia cinética de rotação; no segundo estágio um gerador acoplado à máquina primária transforma energia cinética de rotação em energia elétrica (WEG S.A., [200-?]).

## SEÇÃO 4

### Cogeração de energia

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL 2000 *apud* WEG S.A., [200-?], p. 12),

[...] a cogeração de energia é definida como o processo de produção combinada de calor e energia elétrica ou mecânica a partir de um mesmo combustível, capaz de produzir benefícios sociais, econômicos e ambientais. A atividade de cogeração contribui efetivamente para a racionalização energética uma vez que possibilita maior produção de energia elétrica e térmica a partir da mesma quantidade de combustível.

A cogeração difere da geração porque a energia térmica gerada é utilizada diretamente no processo de manufatura, em fornos e caldeiras.

O processo de cogeração de energia vem sendo utilizado há pouco tempo, a partir da década de 80, e vem se tornando uma alternativa atrativa como nova forma de geração de energia elétrica. Na utilização de combustíveis fósseis, a cogeração de energia pode atingir uma eficiência energética de 3 a 4 vezes maior (WEG S.A., [200-?]).

Atualmente a cogeração de energia corresponde à grande parte da capacidade das novas usinas instaladas e vem sendo responsável pela redução no crescimento do número de novas usinas hidrelétricas.

Um dos fatores positivos na implementação de novas usinas de cogeração é relativo à questão ambiental, pois além de possibilitar o aproveitamento de restos de madeira ou bagaço da cana de açúcar, por exemplo, a cogeração possui um caráter descentralizador, porque possibilita que a energia térmica seja utilizada com grande proximidade da unidade consumidora, proporcionando dessa forma uma maior eficiência energética.

O sistema convencional consiste na queima de combustível para que seja gerado vapor, a pressão do vapor gira a turbina e gera energia, no entanto, cerca de um pouco mais de um terço da energia da queima é perdida, a cogeração utiliza a energia térmica que não é convertida em energia elétrica (WEG S.A., [200-?]).

Existe ainda uma grande variedade de sistemas que utilizam o vapor liberado à baixa pressão e temperatura realizando o aproveitamento da energia que não é transformada em energia elétrica.

## SEÇÃO 5

### Sistema de geração

Um sistema de geração de energia é composto basicamente pelos seguintes componentes: máquina primária, geradores, transformadores e sistema de controle, comando e proteção. Agora você estudará cada um desses componentes.

#### ➤ Máquina primária

A máquina primária é o elemento responsável pela transformação de um determinado tipo de energia em energia cinética de rotação para ser fornecida aos geradores (WEG S.A., [200-?]).

Existem diversas máquinas primárias e dentre as principais podemos citar:

**turbinas a gás** ⇒ transformam energia proveniente da combustão do gás em energia cinética de rotação;

**turbinas hidráulicas** ⇒ transformam energia cinética de escoamento da água em energia cinética de rotação;

**motores diesel** ⇒ transformam energia proveniente da combustão do diesel em energia cinética de rotação;

**turbinas a vapor** ⇒ transformam energia da pressão do vapor em energia cinética de rotação;

**turbinas eólicas** ⇒ transformam energia cinética do vento em energia cinética de rotação.

A denominação das usinas elétricas geralmente é classificada de acordo com o processo de geração. Como exemplos temos as usinas em que ocorre o processo de combustão, chamadas de **termelétricas**, e as usinas em que ocorre o processo de fissão nuclear, chamadas de **termo-nucleares**.

## ➤ Transformadores

Uma vez gerada a energia, será necessário que o nível da tensão seja compatível com o sistema no qual a unidade geradora está ligada. O equipamento responsável por essa adequação do nível de tensão é o transformador, assunto que você já estudou na Unidade 2.

## ➤ Controle, comando e proteção

Vários requisitos são fundamentais na interligação entre a rede de transmissão e a unidade geradora, tal como o controle do nível de tensão e a sincronização, citados na Unidade 4.

São necessários diversos equipamentos de manobra e proteção, tal como relés, disjuntores, TC's e TP's (apresentados na Unidade 3), tais equipamentos estão concentrados no quadro de comando, o que permite ao operador supervisionar o funcionamento dos sistemas e realizar eventual manobra, se necessário (WEG S.A., [200-?]).

O parâmetro mais importante e difícil de ser controlado é a frequência, que no Brasil deve ser de 60 Hz. Para que a mesma seja alcançada e não varie, é preciso a atuação de reguladores de velocidade no gerador para que a velocidade no mesmo permaneça sempre constante.

Você chegou ao fim da unidade curricular, os assuntos abordados em todas as unidades tiveram como objetivo promover o aprendizado por meio da experiência, fazendo com que a vivência estimule e transforme o conteúdo, impulsionando a assimilação.



## Finalizando

O objetivo desses conteúdos foi apresentar a você características construtivas e funcionais de máquinas elétricas e uma breve noção sobre geração de energia, conhecimentos que se fazem necessários para a sua atuação no ramo da eletrotécnica.

Iniciamos com o estudo dos transformadores, pois a partir desses conhecimentos o entendimento das demais máquinas elétricas pôde ser facilitado. Assim, foram tratados separadamente os transformadores monofásicos e trifásicos.

A determinação da sequência das unidades de estudo apresentadas visou agrupar as principais características das máquinas elétricas de forma a lhe possibilitar uma comparação entre as mesmas.

Você teve ainda um breve capítulo sobre geração de energia, proporcionando uma visão geral com relação ao assunto. Um estudo mais aprofundado referente a máquinas primárias para a geração de energia não fez parte do escopo desta unidade curricular, cabendo a você, de acordo com a sua necessidade e interesse, a busca de materiais complementares sobre o assunto.

Sucesso!!



# Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7094**: máquinas elétricas girantes: motores de indução: especificação. Rio de Janeiro, 2003.
- FILIPPO FILHO, G. **Motor de indução**. São Paulo: Érica, 2000.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**: com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- GUSSOW, M. **Eletricidade básica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.
- JORDÃO, R. G. **Transformadores**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- KOSOW, I. L. **Máquinas elétrica e transformadores**. 14. ed. São Paulo: Globo 2002.
- NASCIMENTO JÚNIOR, G. C. **Máquinas elétricas**: teoria e ensaios. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008.
- SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Transformador trifásico**. Rio de Janeiro, 1980.
- \_\_\_\_\_. **Transformador monofásico**. Rio de Janeiro, 1980.
- \_\_\_\_\_. **Materiais e equipamentos em sistemas de baixa tensão**. Espírito Santo, 1997.
- WEG S.A. **Manual de geração de energia**: módulo 4. Jaraguá do Sul: Weg, [200-?]a.
- \_\_\_\_\_. **Varição de velocidade**: módulo 2. Jaraguá do Sul: Weg, [200-?]b.
- \_\_\_\_\_. **Motor de indução monofásico**: manual Weg. Jaraguá do Sul, 2006.