

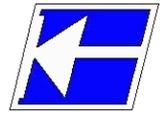
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2021.

MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

Objetivo de Aprendizagem

Estudar as máquinas de corrente alternada.

Objetivos parciais

- Conhecer o princípio de funcionamento das máquinas de corrente alternada;
- Conhecer os principais tipos de máquinas de corrente alternada;
- Conhecer as aplicações das máquinas de corrente alternada.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 11 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 10 relacionado aos motores sem escovas.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo do acionamento dos motores de indução monofásicos.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- Kosow, Irving L. Máquinas Elétricas e Transformadores. 15ª edição. São Paulo: Globo, 2005.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 11);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 11).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

1 Introdução

Os capítulos anteriores abordaram os aspectos e princípios gerais das máquinas elétricas rotativas, e na sequência as máquinas de corrente contínua, estudando-se os motores de corrente contínua, motores de passo e motores sem escovas (*brushless*).

A partir deste capítulo serão estudados os principais motores elétricos de corrente alternada, conhecidos como motores de indução, iniciando-se pelo motor monofásico e na sequência o motor trifásico.

Assim, este capítulo tem como objetivo o estudo das máquinas de corrente alternada (ca), com foco nos motores elétricos de indução monofásicos e trifásicos.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento das máquinas de corrente alternada;
- Principais tipos de máquinas de corrente alternada;
- Aplicações das máquinas de corrente alternada.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o funcionamento de uma máquina de corrente alternada;
- Citar as principais partes de uma máquina de corrente alternada;
- Comentar sobre algumas aplicações das máquinas de corrente alternada.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um motor de indução, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o funcionamento de um motor elétrico de indução monofásico ou trifásico.
2. Citar aplicações das máquinas de corrente alternada.
3. Comentar sobre as conexões dos motores de indução monofásicos.
4. Citar as principais partes de uma máquina de corrente alternada.

2 Máquinas de Corrente Alternada

2.1 Introdução

As máquinas elétricas de corrente alternada, diferente das máquinas de corrente contínua, são projetadas e construídas, especificamente para funcionarem como geradores ou como motores, conforme a aplicação desejada.

Este capítulo irá abordar o princípio de funcionamento das máquinas de corrente alternada, focando-se nos elementos comuns aos motores e geradores de corrente alternada.

2.1 Definição de motor elétrico de corrente alternada

O motor elétrico de corrente alternada é uma máquina elétrica rotativa que converte energia elétrica em energia mecânica para acionamento de cargas acopladas em seu eixo, sendo alimentado por uma fonte de alimentação em tensão alternada (ca).

2.2 Definição de gerador elétrico de corrente alternada

O gerador elétrico de corrente alternada é uma máquina elétrica rotativa que converte energia mecânica em energia elétrica a partir da rotação provida ao seu eixo, servindo como fonte de alimentação de circuitos em tensão alternada (ca).

2.3 Princípio de funcionamento da máquina de corrente alternada

A partir dos estudos realizados nos capítulos anteriores deste curso, especialmente sobre as máquinas de corrente contínua, pode-se lembrar que a partir da interação da força resultante sobre uma espira ou conjunto de espiras (bobina) conforme se observa na Figura 1, e o campo magnético no qual a espira está imersa, se terá duas possibilidades, que darão origem aos motores e aos geradores.

Os princípios motor e gerador são:

- Princípio motor – O princípio motor determina que um conjunto de espiras imerso em um campo magnético estará sujeito a uma força, denominada de Força de Lorentz;
- Princípio gerador – O princípio gerador, por sua vez, determina que uma espira ou bobina, imersa em um campo magnético variante no tempo, estará sujeita a uma corrente induzida, constituindo um gerador eletromagnético.

A diferença básica entre as máquinas de corrente contínua e as máquinas de corrente alternada é que o campo magnético gerado nos enrolamentos (bobinas) será variável nestas últimas, em virtude da variação senoidal da tensão de alimentação aplicada nos terminais de conexão dos motores, por exemplo.

A Figura 2 mostra o funcionamento do gerador de corrente alternada, mas onde o campo magnético é originado por ímãs permanentes. Esta construção tem o intuito de servir para explicar o funcionamento da máquina rotativa como gerador. Nota-se que a espira que constitui o rotor está conectada ao circuito externo por meio de escovas e anéis coletores.

A posição da espira em relação ao campo magnético, conforme mostrado na Figura 2 é de 90° , fazendo com que a tensão gerada tenha amplitude nula. Na sequência da Figura 2 tem-se a posição relativa entre a espira e as linhas de campo magnético dos ímãs permanentes em 0° , gerando uma tensão com amplitude máxima positiva.

A seguir, na Figura 3, tem as posições da espira em relação ao campo magnético em 90° e 0° novamente, gerando tensão nula e com amplitude máxima negativa, respectivamente. Em virtude do uso de coletor não-comutador, a tensão gerada é alternada.

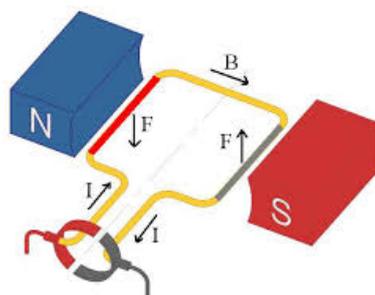


Figura 1 – Espira imersa em um campo magnético.

Fonte: <https://www.dt.fee.unicamp.br>. Acessado em 17/06/2021.

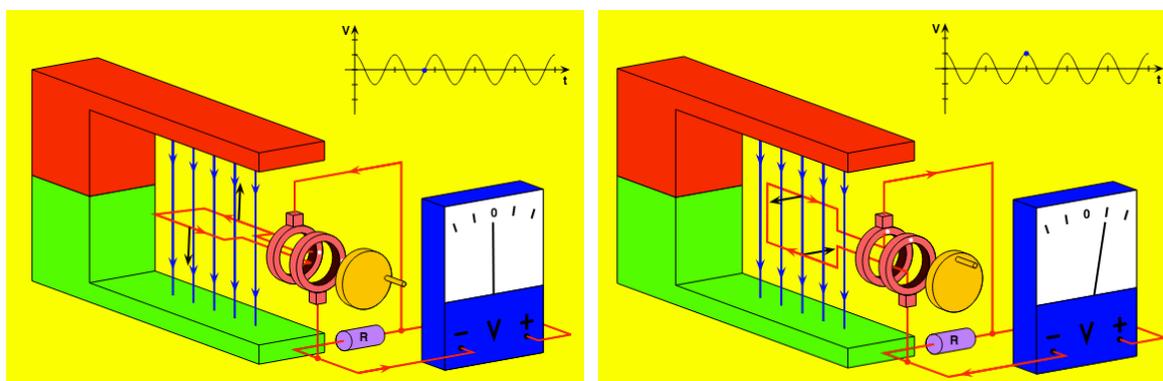


Figura 2 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 19/08/2021.

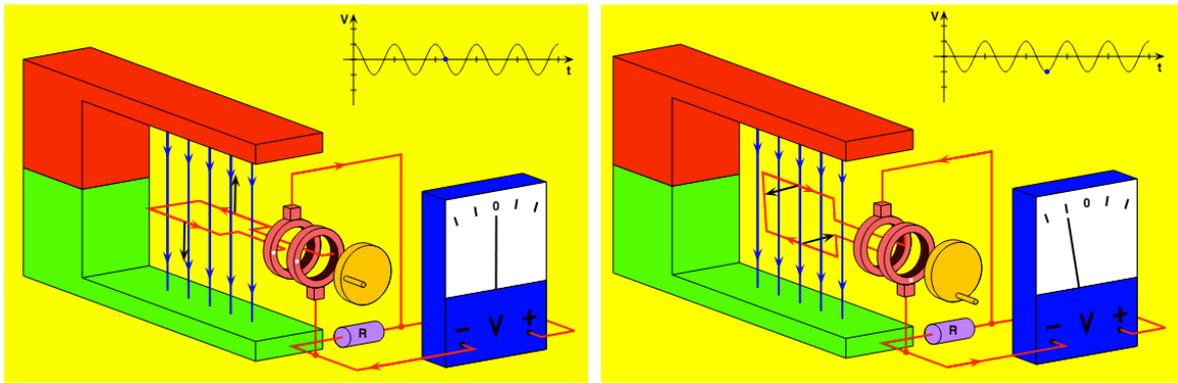


Figura 3 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 19/08/2021.

Anteriormente se estudou, com relação às máquinas de corrente contínua, que o uso de um coletor comutador, utilizando os demais elementos de maneira idêntica, que se gerava uma tensão contínua.

Ao usar coletor comutador, a tensão alternada é retificada mecânica pela troca de polaridade das conexões da espira com o circuito externo, configurando, de certa maneira, em uma conversão de tensão alternada (ca) em tensão contínua (cc), isto é, em um conversor cc-ca rotativo, em contraste com os retificadores utilizando diodos semicondutores, por exemplo.

2.4 Símbolos elétricos da máquina de corrente alternada

Os motores elétricos podem ter diferentes símbolos, mas em geral são representados por um círculo com a letra M de motor. A Figura 4 mostra o símbolo típico para um motor elétrico, identificando-se sua tensão e corrente. De modo similar, um gerador de corrente alternada terá símbolo semelhante, mas com a corrente saindo do mesmo e a letra G no interior do círculo, como mostrado na mesma figura. Em relação às máquinas de corrente contínua, é usual para máquinas de corrente alternada se utilizar o símbolo de uma senóide junto a letra M ou G, conforme mostrado na figura.

A polaridade da tensão e sentido da corrente indicadas na Figura 4 são instantâneas, visto se tratar de máquinas que operam com formas de onda alternadas.

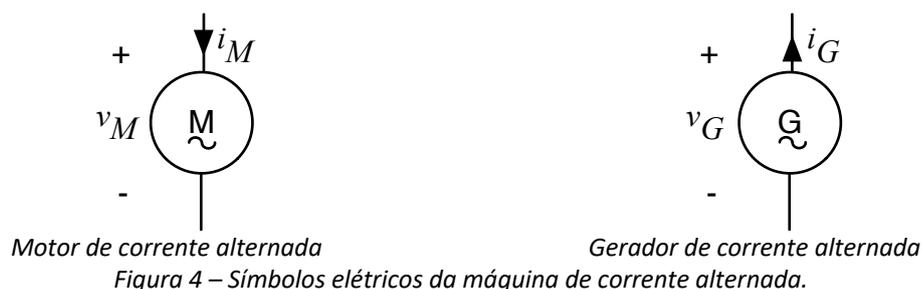


Figura 4 – Símbolos elétricos da máquina de corrente alternada.

2.5 Exemplos de máquinas de corrente alternada

A Figura 5 mostra exemplos de máquinas rotativas de corrente alternada, neste caso de um motor e de um gerador de corrente alternada. O gerador tem potência da ordem de 4,8 kW, com tensão de 48 V e corrente de 100 A, aplicado em geração de energia elétrica a partir da energia eólica. Por sua vez, o motor de corrente contínua com ímãs permanentes, tem potência de 200 W e tensão de alimentação de 90 V.

Os exemplos mostrados são de máquinas de potência baixa, indo de centenas de watts até alguns quilowatts. Em diferentes aplicações podem se encontrar motores e geradores desde potências de alguns watts, denominadas de potências fracionárias, pois são menores do que 736 watts, que é a potência de 1 cv (cavalo vapor), até milhares de quilowatts, em usos específicos de potências muito altas.



Motor de corrente alternada



Gerador de corrente alternada

Figura 5 – Exemplos de máquinas de corrente alternada.

Fonte: <https://www.novamotors.com.br> e <https://www.bosch.com.br>. Acesso em 19/08/2021.

2.6 Construção de máquinas de corrente alternada

A construção de uma máquina de corrente alternada pode ter alterações conforme seu tipo, aplicação, potência e tecnologias empregadas.

Os geradores de corrente alternada, a exemplo de um alternador para uso em automóveis, conforme mostrado na Figura 6, possui uma construção mais complexa, em relação ao motor de corrente alternada mostrado na Figura 7.

As principais partes de uma máquina de corrente alternada são:

- Estator – É a parte fixa da máquina, sendo construído de material ferromagnético, em geral de chapas de ferro-silício, possuindo ranhuras que irão alojar os condutores dos enrolamentos. O número de bobinas do estator irá variar conforme se tratar de um gerador, motor monofásico, bifásico ou trifásico, e levando em conta também o número de polos magnéticos da máquina;
- Rotor – É a parte móvel da máquina transmitindo movimento pelo eixo do

mesmo, no caso de motores, ou recebendo movimento no caso de geradores. Também possui um conjunto de lâminas de aço ou ferro silício formando ranhuras, que irão alojar as espiras, onde estas podem ser de fios ou barras de cobre ou alumínio, compondo os enrolamentos do rotor;

- Coletor com anéis – Elemento que conecta o bobinado da parte móvel (rotor) ao circuito externo por meio das escovas;
- Escovas – Constituídas de carvão grafite ou carbono, permitem conectar os contatos do comutador ao circuito externo, sem afetar seu movimento, provendo contato por pressão, ocorrendo atrito entre os mesmos e desgaste ao longo do tempo.

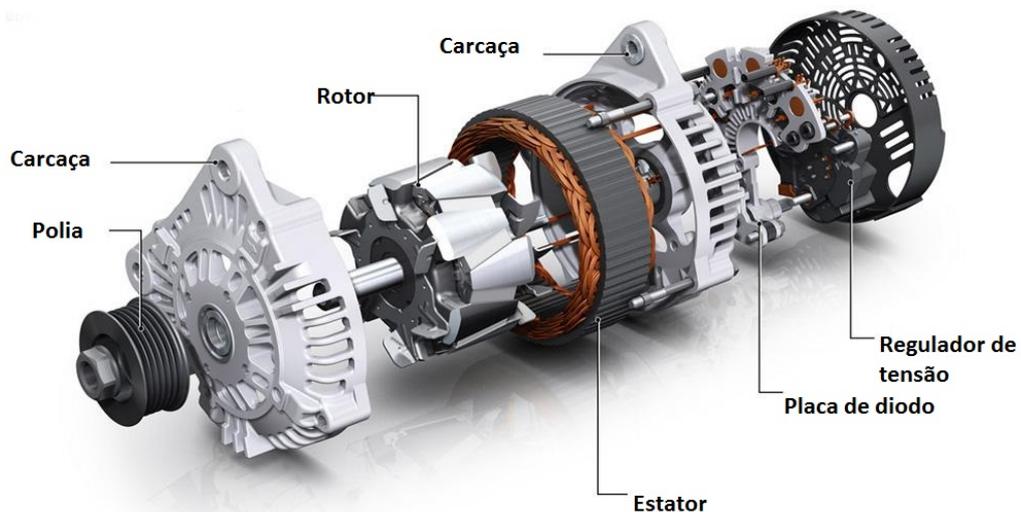


Figura 6 – Principais partes de um gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.bosch.com.br>. Acesso em 19/08/2021.

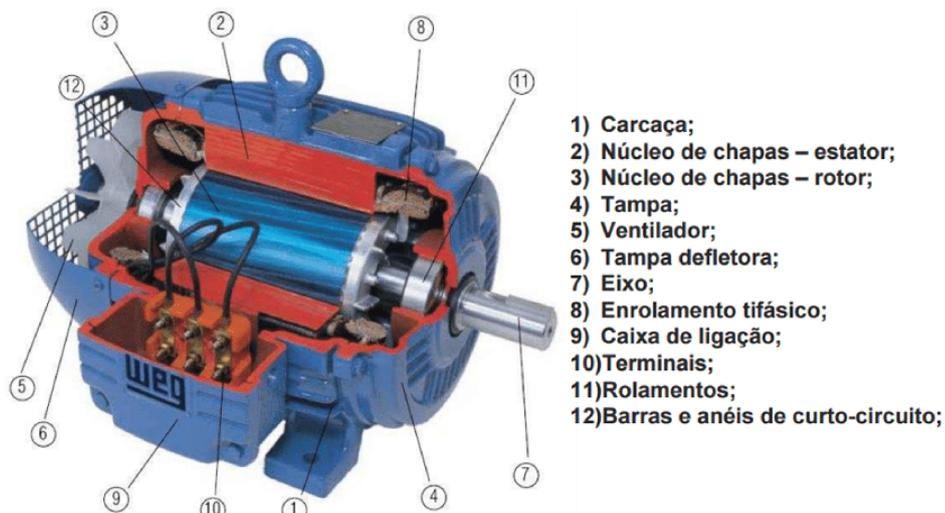
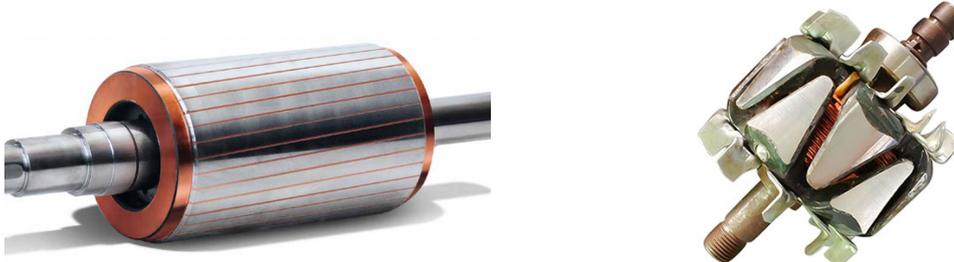


Figura 7 – Principais partes de um motor de corrente alternada.

Fonte: <https://www.weq.net>. Acesso em 19/08/2021.

A Figura 8 mostra exemplos de rotores de máquinas de corrente alternada, tendo o rotor do tipo gaiola de esquilo, formado por anéis que curto-circuitam as lâminas condutoras, empregado em motores de indução monofásicos e trifásicos; e o rotor bobinado com anéis coletores, utilizado em alternadores para automóveis, por exemplo.



Rotor gaiola de esquilo

Rotor bobinado

Figura 8 – Tipos de rotores de máquinas de corrente alternada.

Fonte: <https://www.fundicaobitencourt.com.br> e <https://www.bosch.com.br>. Acesso em 19/08/2021.

3 Geradores de Corrente Alternada

3.1 Introdução

A seguir se apresentam aspectos particulares dos geradores de corrente alternada, do ponto de vista de seu funcionamento e aplicações, de maneira resumida, visto este curso focar no acionamento eletrônico, principalmente aplicado aos motores elétricos.

3.2 Funcionamento do gerador de corrente alternada

Um gerador elementar, conforme mostrado na Figura 9, que possui apenas uma espira, terá em sua saída uma corrente induzida, conforme a posição relativa do plano da espira em relação ao campo magnético dos ímãs permanentes ou eletroímãs do estator.

O sentido da corrente elétrica, conforme os trechos da espira, de a até b, b até c e c até d, pode ser determinado a partir da Regra de Fleming, conforme estudados nos capítulos anteriores deste curso.

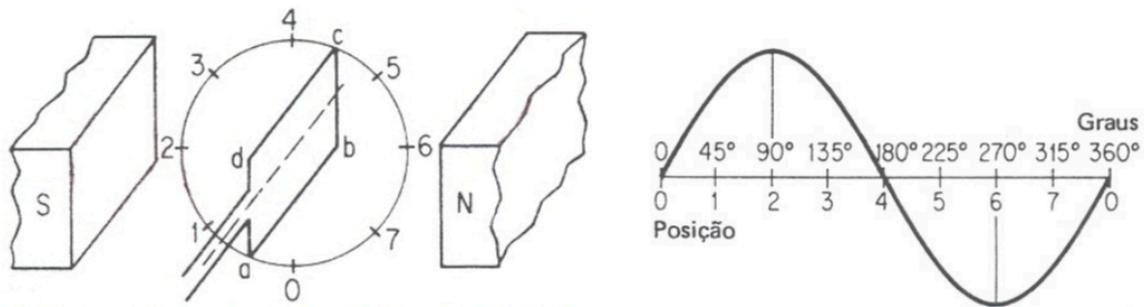
Assim, para os trechos de a até b e c até d, tem-se que se o plano formado pela espira estiver na posição 0, a tensão induzida será nula, pois o ângulo entre a mesma e o campo magnético é zero, pois a tensão induzida depende do valor do seno do ângulo entre as linhas de campo magnético e o plano formado pela bobina, conforme visto nas Figura 1 e Figura 2.

Por outro lado, quando a bobina estiver na posição 2 o ângulo será de 90° , com seno valendo um, e a tensão gerada será máxima positiva.

As posições 1 e 3 serão intermediárias, com ângulos de 45° e 135° e amplitudes de tensão

maiores que zero e menores que o valor máximo. Ao se posicionar a bobina em 4, o ângulo será de 180° e o valor de tensão será nulo de maneira idêntica à posição 0.

Por sua vez, ao se percorrer as posições de 4 até 0, passando por 5, 6 e 7, a tensão gerada será negativa, caracterizando o funcionamento como um gerador de corrente alternada.



Posição do rotor

Tensão (fem) produzida

Figura 9 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: (Kosow, 2005).

3.3 Aplicações dos geradores de corrente alternada

Os geradores de corrente alternada possuem inúmeras aplicações, tais como: sistemas de alimentação de emergência, sistemas de geração de aeronaves, barcos e veículos, geração de energia (hidroelétrica, térmica, eólica, etc), geração de energia alternativa, dentre outras.

A Figura 10 mostra exemplos de geradores de corrente alternada para diferentes aplicações e níveis de potências. Por exemplo, o gerador eólico ou roda d'água tem potência da ordem de $\frac{1}{2}$ kW, enquanto o grupo gerador, formado por motor diesel e gerador de corrente alternada, tem potências de dezenas de kW até centenas de kW, sendo utilizado para alimentação de cargas em diferentes situações, como alimentação de emergência, espetáculos de entretenimento, dentre outras.



Gerador eólico ou para roda d'água



Gerador de alta potência

Figura 10 – Exemplos de geradores de corrente alternada.

Fonte: <https://www.enersud.com.br> e <https://www.cummins.com.br>. Acesso em 13/07/2021.

4 Motores de Corrente Alternada

4.1 Introdução

A seguir se apresentam aspectos particulares dos motores de corrente alternada, conhecidos como motores de indução, do ponto de vista de sua construção e funcionamento, além de suas aplicações e tipos.

Os motores de indução são assim denominados por operarem em corrente alternada, e, em virtude da variação da corrente no tempo, pois as formas de onda da tensão e da corrente são senoidais, se tem variação de fluxo magnético também no tempo, fazendo com que condutores, espiras ou bobinas inseridas na região de linhas de campo magnético do estator, sofram a indução de correntes, conforme os princípios das Leis de Faraday e Lenz. Assim, o estator induz correntes no rotor, gerando-se um campo magnético e que irá interagir com o campo magnético do estator, podendo ou não provocar o giro do eixo do motor, por exemplo.

4.2 Princípio de funcionamento do motor de indução

A Figura 11 mostra um dispositivo elementar, formado por um ímã permanente preso em um fio, com capacidade de ser girado ao redor de seu eixo. Em frente aos polos do ímã é montado um disco de material condutor (cobre ou alumínio), fixado de tal forma que possa girar livremente. Na parte inferior, após o disco, é montada uma placa de material ferromagnético, para fechar o caminho magnético, isto é, concentrar as linhas de campo entre os polos norte e sul do ímã permanente, passando pelo disco de material condutor.

Ao se girar o ímã permanente, irá ocorrer variação de fluxo, fazendo com que no disco, visto ser de material condutor, apareçam correntes induzidas. Estas correntes induzidas são denominadas de correntes parasitas. A tensão induzida no disco e por conseguinte as correntes parasitas, conforme a Lei de Lenz, será no sentido de o campo magnético produzido ser em oposição ao campo magnético do ímã permanente, isto é, em oposição ao movimento que produziu a tensão induzida.

Assim, a partir da interação entre os campos magnéticos (do ímã e induzido no disco) se terá o surgimento de uma força eletromagnética, que fará o disco girar, justamente pela atração e repulsão entre os polos do ímã e eletroímãs induzidos no disco. Deste modo, o disco irá acompanhar o sentido de giro do ímã permanente, mostrando de maneira simples, o funcionamento do motor de indução.

Ao manter o ímã permanente parado, não haverá mais variação de fluxo e cessará a indução de tensão e correntes parasitas no disco, desaparecendo o campo magnético induzido,

fazendo com que o disco pare de girar.

Ainda, conforme o sentido de giro do ímã permanente, o disco seguirá o movimento inicial do campo indutor, movimentando-se então conforme o ímã for movimentado.

Este exemplo básico para explicar o princípio da indução e a rotação provocada em um disco (rotor) é ilustrativo para mostrar que no motor de indução, o campo magnético do rotor é induzido pelo estator, sendo que este último será alimentado por uma rede de alimentação alternada, ocorrendo naturalmente a variação de fluxo, não sendo utilizados ímãs permanentes, tampouco fazendo-se seu deslocamento mecanicamente.

A Figura 12 mostra exemplos de motores e dispositivos que utilizam o princípio de funcionamento do motor de indução, conforme explicado anteriormente. Em destaque, o medidor de energia elétrica utiliza um disco de alumínio, que gira pelo princípio explicado a partir da Figura 11, valendo-se da corrente que circula entre a rede de energia elétrica e a unidade consumidora, além da tensão da rede de alimentação, para prover rotação a medida que a corrente consumida for maior, tornando o mecanismo um contador, isto é, registrando o consumo de energia elétrica conectado na saída do instrumento de medidas.

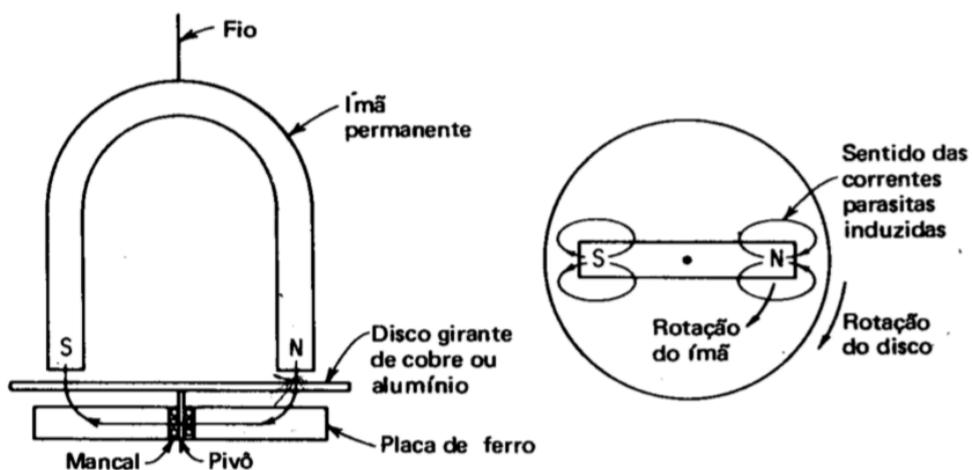


Figura 11 – Funcionamento do motor de corrente alternada.

Fonte: (Kosow, 2005).



Medidor de energia elétrica

Motor monofásico

Motor trifásico

Figura 12 – Exemplos de uso do princípio do motor de indução.

Fonte: <https://www.eletricanardini.com.br> e <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

4.3 Circuito elétrico do motor de corrente alternada

O circuito elétrico de um motor trifásico de indução, obtido por fase e visto pelo estator, é mostrado na Figura 13, onde se tem:

- Tensão nos terminais por fase (v_1) – Tensão terminal por fase do motor;
- Tensão induzida no estator por fase (v_2) – Tensão equivalente interna da máquina;
- Correntes do motor (i_1, i_2, i_{cm}) – Correntes na entrada, de magnetização e de perdas no motor e no rotor da máquina;
- Resistência do enrolamento (R_1) – Resistência do enrolamento por fase no estator;
- Resistência do enrolamento (R_2) – Resistência do enrolamento por fase;
- Perdas no núcleo (R_c) – Resistência que representa as perdas no núcleo do motor;
- Reatância de dispersão (X_1) – Reatância de dispersão por fase no estator;
- Reatância de dispersão (X_2) – Reatância de dispersão por fase no rotor;
- Reatância de magnetização (X_m) – Reatância de magnetização por fase do motor;
- Velocidade do rotor (s) – Velocidade de giro do rotor.

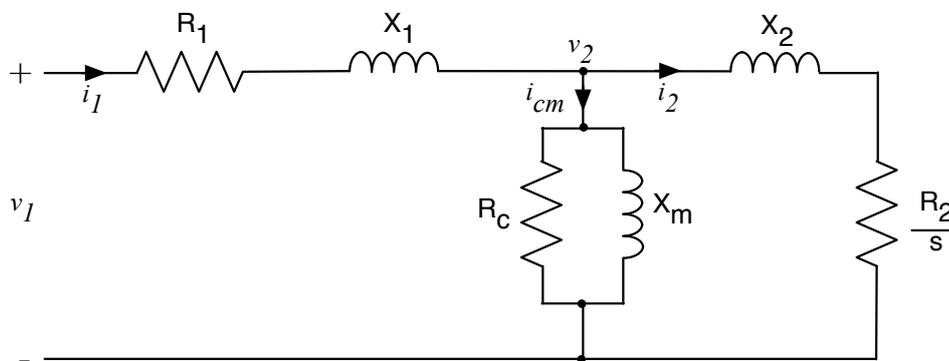


Figura 13 – Circuito elétrico equivalente de uma fase de um motor trifásico.

4.4 Campo girante no motor trifásico

A Figura 14 mostra um motor trifásico conectado em um circuito de alimentação também trifásico. As correntes nas fases A, B e C estão defasadas de 120° entre si, tendo amplitude variável com formato senoidal. A figura mostra 6 instantes diferentes, para um ciclo (período) completo da tensão senoidal de alimentação.

Os enrolamentos montados no estator, conforme a Figura 14 estão montados com um defasamento geométrico de 120° entre si. Assim, tem-se a defasagem elétrica entre as correntes nas 3 fases do motor e a defasagem geométrica pela montagem espaça de 120° entre os enrolamentos de cada fase.

Este exemplo da Figura 14 produziu 2 polos, com 6 ranhuras para alojar o enrolamento trifásico, enquanto os exemplos da Figura 17 são para 4 e 6 polos.

A velocidade girante ou síncrona é calculada por:

$$N_s = \frac{120 \cdot F}{P} [rpm]$$

Onde:

- N_s – Velocidade do campo girante, denominada de velocidade girante ou síncrona em rotações por minuto (rpm);
- F – Frequência da rede de alimentação em Hertz;
- P – Número de polos formados no estator.

Assim, para o motor da Figura 14 com 2 polos se terá uma velocidade de 3600 rpm, e para os motores da Figura 17 se terá 1800 rpm para o motor de 4 polos e 1200 rpm para o motor de 6 polos.

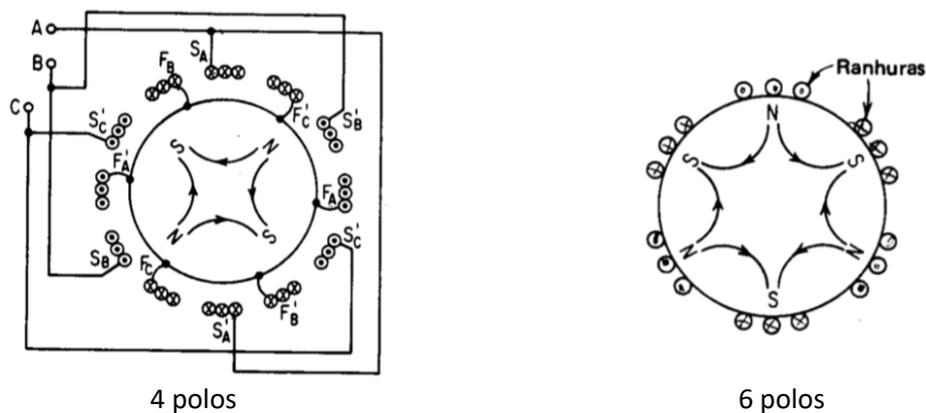


Figura 17 – Campo girante com diferente número de polos magnéticos.

Fonte: (Kosow, 2005).

A partir do que foi estudado considerando a Figura 11, verificou-se que a velocidade do disco (rotor) em relação a velocidade do campo girante (ímã permanente sendo girado) precisa ser menor, para que se tenha variação de fluxo e indução, promovendo o funcionamento do motor.

Assim, a diferença de velocidade entre o campo girante e a velocidade do rotor é denominada de escorregamento, calculado percentualmente por:

$$s = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \cdot 100 [\%]$$

Onde:

- s – Escorregamento percentual da máquina;
- N_s – Velocidade do campo girante, denominada de velocidade girante ou síncrona em rotações por minuto (rpm);
- N_r – Velocidade do rotor em rotações por minuto (rpm).

Assim, a título de exemplo, se um motor tiver velocidade síncrona de 1200 rpm e velocidade no rotor de 1000 rpm, então o escorregamento será de 16,7%.

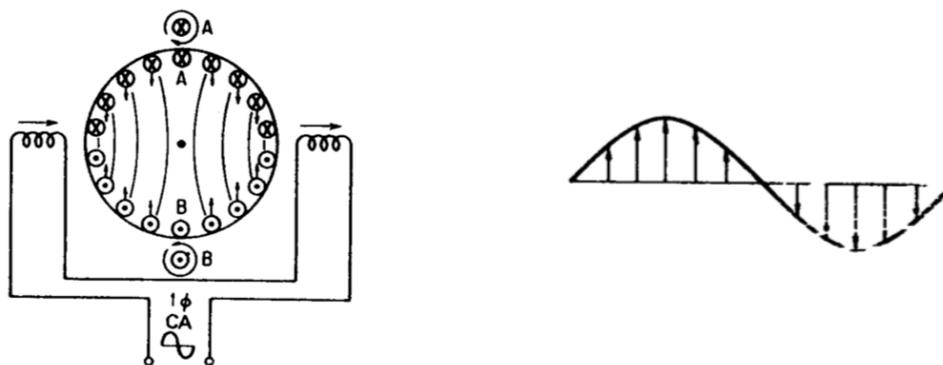
4.5 Campo girante no motor monofásico

Um motor monofásico é conectado na rede de alimentação de energia elétrica, em geral nos condutores fase e neutro. Assim, a alimentação do motor é realizada por uma tensão senoidal apenas, não se tendo a defasagem elétrica entre diferentes tensões nas fases, como anteriormente mostrado para o motor trifásico.

O campo magnético produzido pelos enrolamentos do motor monofásico é semelhante aquele produzido por uma das fases do motor trifásico, conforme mostrado nas Figura 14, Figura 15 e Figura 16.

A Figura 18 mostra o campo magnético produzido pelo enrolamento do estator, apontando da esquerda para a direita. Este campo varia de intensidade conforme a tensão de alimentação variar senoidalmente. As correntes induzidas no rotor, e conforme a Lei de Lenz, com sentido tal a criarem um campo que se opõe ao campo magnético indutor, tem sentido entrando em A e saindo em B, originando um campo que aponta da direita para a esquerda.

O torque produzido será pulsante, mas não girante, não provando o giro do rotor, como visto anteriormente para o motor trifásico, concluindo-se que um motor monofásico não fará o rotor girar naturalmente pela alimentação do enrolamento do estator.



Torques no rotor do motor

Torque pulsante

Figura 18 – Torques em um motor monofásico com rotor em gaiola de esquilo.

Fonte: (Kosow, 2005).

Assim, um motor monofásico ao ser ligado à rede de energia elétrica, não tem capacidade de promover a rotação em seu eixo de maneira natural, apenas a partir do enrolamento do estator e da indução de correntes no rotor, pois o torque será pulsante, mas estacionário.

Ao iniciar o giro do rotor por algum método, por exemplo impulsionando mecanicamente o mesmo, se terá um torque resultante diferente de zero, como mostrado na Figura 19, pois os fluxos magnéticos do estator (ϕ_f) e no rotor (ϕ_r) permitirão obter a componente resultante não nula (ϕ_t), como mostrado na figura.

Deste modo, se o rotor estiver girando, então o motor monofásico de indução tem capacidade de manter seu funcionamento correto, isto é, o campo magnético do estator irá induzir um campo magnético no rotor, produzindo um fluxo magnético resultante diferente de zero e um torque que permitirá ao eixo continuar seu sentido de giro inicial.

A partir daí se pode concluir que os motores monofásicos de indução necessitam de algum método que auxilie em sua partida, para então operarem adequadamente, diferente dos motores trifásicos, que possuem torque para girar o rotor a partir do momento que são ligados na rede de energia elétrica.

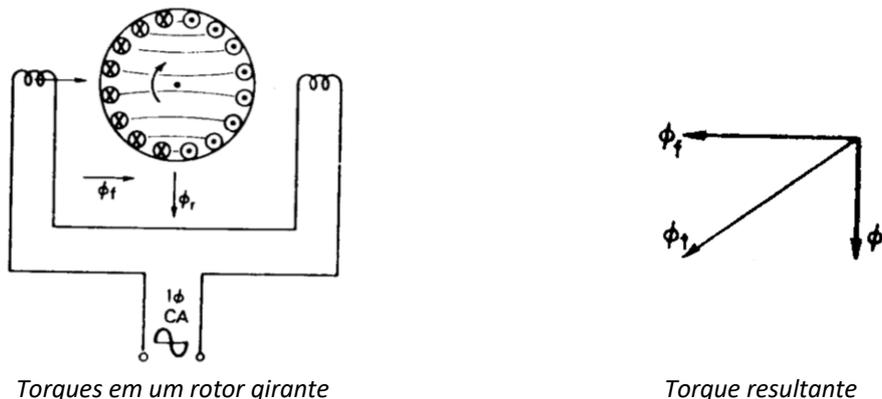


Figura 19 – Torques em um motor monofásico com rotor em gaiola de esquilo com o rotor em movimento.

Fonte: (Kosow, 2005).

5 Tipos e Aplicações de Motores de Indução

5.1 Introdução

Os motores de indução podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos, se for considerado o número de fases para alimentação dos mesmos, sendo amplamente utilizados nas mais diferentes aplicações.

A seguir serão apresentados alguns modelos de motores monofásicos e trifásicos, não buscando-se exaurir o assunto em virtude da ampla gama de opções disponíveis no mercado.

5.2 Motores monofásicos

Os motores monofásicos podem ser de diferentes tipos conforme o sistema auxiliar de partida empregado para prover a rotação inicial ao eixo do motor.

A seguir serão apresentados alguns exemplos de motores monofásicos de indução, de pequena potência, entendendo-se, neste caso, que tenham potências fracionárias, isto é, menores que 1 cv. No entanto, são fabricados motores monofásicos com potências maiores também, para uso onde estiver disponível apenas uma tensão de alimentação monofásica. Em geral, quando estiver disponível uma rede de alimentação trifásica, torna-se interessante a utilização de motores trifásicos, pois são de construção simples e dispensam elementos auxiliares de partida.

Os motores monofásicos de baixa potência são amplamente utilizados em circuitos onde se tem disponível a alimentação a dois fios, isto é, monofásica ou bifásica, como no interior das residências, por exemplo.

5.2.1 Motor monofásico de fase auxiliar ou fase dividida

O motor monofásico de fase auxiliar ou fase dividida possui dois enrolamentos, um deles, identificado como principal (E_{np}) e outro como auxiliar (E_{na}), conforme mostrado na Figura 20. O enrolamento auxiliar é montado geometricamente defasado do enrolamento principal, além de ter impedância distinta do primeiro, gerando assim uma defasagem entre a corrente que circula em cada enrolamento e conseqüentemente no fluxo magnético produzido. Em virtude da defasagem entre os campos magnéticos principal e auxiliar, surge um torque resultante diferente de zero, aproximando o funcionamento do motor monofásico daquele de um motor bifásico, por exemplo.

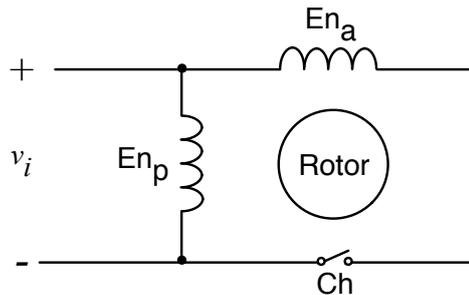
Assim, em virtude do enrolamento auxiliar, é possível fazer a partida do motor monofásico, mantendo a rotação após se atingir velocidade acima da necessária para que o mesmo tenha torque resultante diferente de zero.

O enrolamento de auxiliar ou de partida é projetado para operar por alguns instantes, podendo ser desligado após o motor atingir determinada velocidade, o que será feito por uma chave centrífuga (Ch) ligada em série com este enrolamento. Assim, com o rotor parado a chave estará fechada e quando o motor partir e o rotor atingir velocidade suficiente, pela ação da força centrípeta sobre as massas do mecanismo da chave, esta irá abrir, desligando o enrolamento auxiliar.

Os motores monofásicos de fase auxiliar não permitem a reversão da rotação enquanto estiverem em funcionamento, pois como o rotor acompanhará o campo girante do estator, não se tem torque suficiente para vencer a inércia de seu eixo no sentido contrário ao da rotação inicial. Para inverter o sentido de giro, será necessário inverter o sentido da corrente elétrica no

enrolamento auxiliar, pela inversão de sua conexão elétrica, o que deverá ser feito por dispositivos adequados, conforme será estudado no próximo capítulo.

O torque de partida dos motores com fase auxiliar não é elevado, sendo então utilizados em aplicações onde são exigidas poucas partidas e baixo conjugado de partida, como em ventiladores, sistemas de bombeamento de água, bombas comerciais e industriais, bombas centrífugas, bombas hidráulicas, polidores, compressores, máquinas de escritório, dentre outras.



Circuito simplificado do motor



Exemplo de motor de fase dividida

Figura 20 – Motor monofásico de fase dividida.

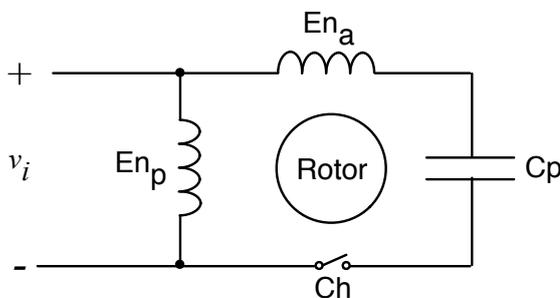
Fonte: Adaptado de <https://www.novamotores.com.br> e <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

5.2.2 Motor monofásico com capacitor de partida

A Figura 21 mostra o circuito interno simplificado e o aspecto típico de um motor monofásico com capacitor de partida. Os elementos são semelhantes aqueles do motor monofásico de fase dividida, mas agora com a presença do capacitor (C_p) em série com o enrolamento auxiliar.

As correntes elétricas nos enrolamentos principal e de partida estarão defasadas com ângulo de 90° aproximadamente, gerando maior torque de partida. Após a partida do motor, o circuito auxiliar formado pelo capacitor de partida e pelo enrolamento auxiliar será desligado pela atuação da chave centrífuga.

Os motores monofásicos com capacitor de partida, por terem maior torque de partida, são utilizados, por exemplo, em bombas, compressores, lavadoras de roupas, geladeiras industriais, ventiladores, trituradores, dentre outras aplicações.



Circuito simplificado do motor



Exemplo de motor de com capacitor de partida

Figura 21 – Motor monofásico com capacitor de partida.

Fonte: Adaptado de <https://www.novamotores.com.br> e <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

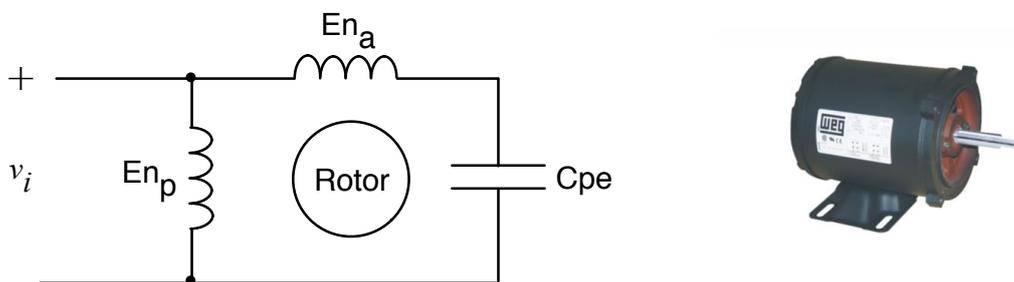
5.2.3 Motor monofásico com capacitor permanente

A Figura 22 apresenta o circuito simplificado e o aspecto do motor monofásico com capacitor permanente, notando-se a ausência da chave centrífuga. Assim, o enrolamento auxiliar e o capacitor permanente (CPe) permanecem conectados durante toda a operação do motor.

Em virtude da presença constante do circuito auxiliar (enrolamento auxiliar e capacitor permanente), estes motores tem torque máximo e rendimento elevados e melhor fator de potência, se comparado aos motores monofásicos de fase dividida e capacitor de partida. A ausência da chave centrífuga diminui os ruídos na partida do motor e aumenta a vida útil do mesmo, pois não se tem elementos móveis no circuito auxiliar.

Em virtude de seu baixo torque de partida, mas alto torque de funcionamento, os motores monofásicos com capacitor permanente permitem a inversão de sua rotação diretamente quando em funcionamento, o que pode ser feito por meio de uma chave que inverte a conexão do capacitor com os enrolamentos En_a e En_b , como mostrado na Figura 23.

Os motores monofásicos com capacitor permanente, por não terem elevado torque de partida, são utilizados em condicionadores de ar, condensadores, ventiladores, dentre outras aplicações.



Circuito simplificado do motor

Exemplo de motor de capacitor permanente

Figura 22 – Motor monofásico com capacitor permanente.

Fonte: <https://www.novamotores.com.br> e <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

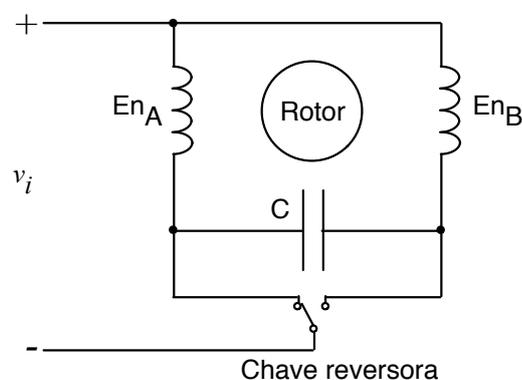


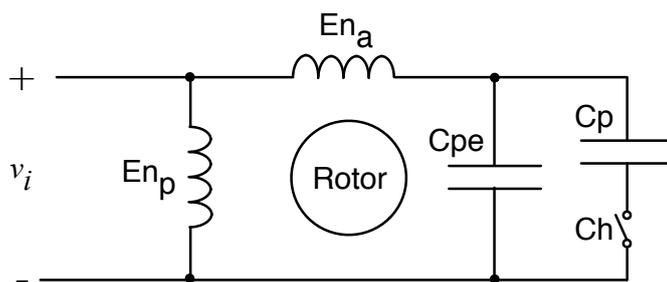
Figura 23 – Motor monofásico de capacitor permanente e chave reversora.

Fonte: Adaptado de (Kosow, 2005).

5.2.4 Motor monofásico com dois capacitores

A Figura 24 mostra o circuito simplificado e um exemplo de motor elétrico monofásico com dois capacitores, ficando um permanentemente ligado com o enrolamento auxiliar, enquanto o outro é ligado apenas durante a partida do motor, por meio da chave centrífuga.

Estes motores com dois capacitores têm maior torque de partida, tendo as vantagens dos motores com capacitor de partida e capacitor permanente, mas tendo maior custo; por isso, sendo utilizados em aplicações que exigem potências superiores a 1 cv.



Circuito simplificado do motor



Exemplo de motor com dois capacitores

Figura 24 – Motor monofásico com dois capacitores.

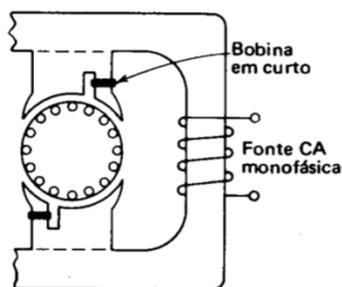
Fonte: Adaptado de <https://www.novamotors.com.br> e <https://www.lememotors.com.br>.

Acesso em 19/08/2021.

5.2.5 Motor monofásico com campo distorcido ou polos sombreados

A Figura 25 mostra o esquema construtivo simplificado de um motor de campo distorcido ou polos sombreados. As bobinas em curto colocadas em cada polo do estator geram um campo defasado do campo magnético principal, fazendo com que o rotor do tipo gaiola de esquilo tenha torque suficiente para sua partida.

O sentido de giro do rotor dependerá da montagem dos polos salientes ou sombreados no estator, fazendo com que neste motor não seja possível inverter o sentido de rotação de seu eixo.



Esquema construtivo simplificado do motor



Exemplo de motor com polos sombreados

Figura 25 – Motor monofásico com polos sombreados.

Fonte: (Kosow, 2005) e <https://www.lememotors.com.br>. Acesso em 19/08/2021.

Estes motores tem baixo custo, são robustos e simples de serem construídos, sendo fabricados para potências pequenas, até geralmente $\frac{1}{4}$ de cv, tendo como principais aplicações: ventiladores, exaustores, purificadores de ambientes, unidades de refrigeração, secadores de roupa, bombas, compressores, coifas, secadores de cabelo profissionais, condensadores, desumidificadores, dentre outras.

5.1 Motores trifásicos

Os motores trifásicos não necessitam de elementos auxiliares de partida, sendo então construídos com o número de enrolamentos desejados em virtude do número de polos especificado, constituindo um circuito com 3 fases e 6 condutores terminais. As conexões e circuitos de partida dos motores trifásicos serão estudadas em capítulo específico mais a frente neste curso.

A Figura 26 mostra exemplos de diferentes motores trifásicos, em termos de construção mecânica ou em termos de circuito elétrico interno. Assim, os motores trifásicos para bombeamento de água e IP21 são similares em termos elétricos, mas possuem diferenças em termos de construção de seu gabinete e sistemas de ventilação. Por sua vez, o motor trifásico Dahlander é um motor com 2 enrolamentos, com diferente número de polos, permitindo que o motor opere com duas velocidades distintas, conforme com qual dos enrolamentos for alimentado.

A técnica de comutar dentre diferentes enrolamentos, no caso de motores Dahlander, era muito utilizada antes do desenvolvimento dos inversores de frequência, que permitem alterar a frequência das tensões de alimentação do motor e conseqüentemente alterar sua velocidade de rotação, conforme explicado anteriormente.

Algumas aplicações para os motores trifásicos, dentre as inúmeras possíveis, são: bombas, ventiladores, exaustores, britadores, moinhos, talhas, compressores, centrais de ar condicionado, transportadores contínuos, máquinas operatrizes, bobinadeiras, trefiladeiras, centrífugas, prensas, guindastes, pontes rolantes, elevadores, dobradeiras, etc.



Figura 26 – Exemplos de motores trifásicos.

Fonte: <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

6 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Defina motor elétrico de corrente alternada.

Motor elétrico de corrente alternada é uma máquina rotativa que converte energia elétrica em energia mecânica, a partir da tensão de alimentação em corrente alternada.

ER 02. Quais os principais tipos de motores elétricos de corrente alternada monofásicos.

Os motores monofásicos podem ser com fase dividida, capacitor de partida, capacitor permanente, dois capacitores e polos sombreados.

ER 03. Os motores de corrente alternada são denominados de motores de indução. Comente a respeito.

Os motores de corrente alternada são chamados de motores de indução em virtude de terem um rotor com espiras ou enrolamentos, que em virtude do campo magnético variável criado no estator, sofre a indução de correntes elétricas, gerando um campo magnético no rotor, que irá interagir com o campo magnético do estator e provocar a rotação do eixo da máquina.

ER 04. Como pode ser alterada a velocidade de um motor de indução?

A velocidade de rotação dos motores de indução pode ser alterada modificando-se o número de polos do estator ou a frequência da tensão de alimentação da máquina.

ER 05. Cite aplicações para os motores de corrente alternada.

Ventiladores, compressores, elevadores, bombas, esteiras transportadoras, dentre outras.

Exercícios Propostos

EP 01. Explique com suas palavras como funciona um motor elétrico de corrente alternada.

EP 02. Comente sobre as vantagens dos motores trifásicos em relação aos motores monofásicos.

EP 03. Comente sobre as principais características dos motores monofásicos com capacitores de partida.

EP 04. Cite as principais partes de um motor de corrente alternada.

EP 05. Comente sobre as aplicações dos motores de corrente alternada.

7 Atividade Avaliativa

7.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que são máquinas de corrente alternada?

AA 02. Cite as principais partes de uma máquina de corrente alternada.

AA 03. Como se pode alterar a velocidade de rotação de um motor de corrente alternada?

AA 04. Cite exemplos de motores de indução monofásicos.

AA 05. Comente sobre as características dos motores de indução trifásicos.

AA 01. Máquinas de corrente alternada são máquinas elétricas rotativas que podem converter a energia elétrica em mecânica no caso de motores, quando alimentados com uma fonte de alimentação em tensão alternada; ou converter energia mecânica em energia elétrica na forma de corrente alternada, no caso dos geradores.

AA 02. As principais partes de uma máquina de corrente alternada são: estator com os enrolamentos a serem alimentados pela rede de energia elétrica e o rotor, com espiras ou barras, curto-circuitadas nas extremidades, formando um rotor do tipo gaiola de esquilo.

AA 03. A velocidade de rotação do motor de corrente alternada pode ser alterada modificando o número de polos do estator ou a frequência da tensão de alimentação.

AA 04. Motores monofásicos de indução de fase dividida, de capacitor de partida, de capacitor permanente, com dois capacitores e com polos sombreados.

AA 05. Os motores trifásicos não exigem elementos auxiliares para a partida, sendo simples de serem fabricados, robustos e necessitando de pouca manutenção; no entanto, precisam ser alimentados por uma rede de alimentação trifásica.