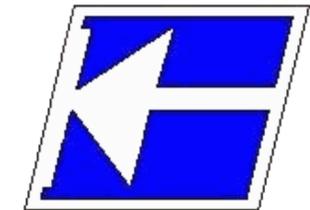




Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Acionamentos Eletrônicos



Princípios de Máquinas Elétricas Rotativas

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, julho de 2021.

Curso Básico de Acionamentos Eletrônicos

O material do curso está disponível em:

1. Moodle para os alunos matriculados na disciplina;
2. Página do professor;
3. Canal no youtube do professor.



<https://moodle.ifsc.edu.br>



www.ProfessorPetry.com.br



<https://www.youtube.com>

Esta aula está organizada em:

1. Princípio de funcionamento das máquinas elétricas rotativas:
 - Princípio de funcionamento dos motores;
 - Classificação dos motores.
2. Tipos de motores elétricos:
 - Motores de corrente contínua, indução, síncronos e universais;
 - Motores monofásicos de corrente alternada;
 - Motores trifásicos de corrente alternada;
 - Motores de corrente contínua;
 - Motores de passo;
 - Servomotores;
 - Motores universais;
 - Motores sem escovas (brushless).
3. Grandezas elétricas e mecânicas de motores:
 - Grandezas elétricas;
 - Grandezas mecânicas;
 - Outras grandezas.



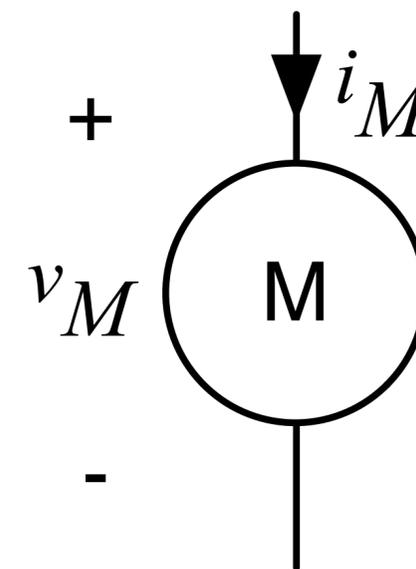
Os motores elétricos são responsáveis pelo deslocamento dos mais diversos tipos de cargas.



Princípio de funcionamento dos motores elétricos

Motores elétricos:

- O transformador é uma máquina elétrica estática, ou seja, que converte energia na forma elétrica, mas sem elementos que tenham movimento mecânico.
- Por sua vez, os motores elétricos são um tipo de máquinas elétricas rotativas, pois convertem a energia elétrica em movimento, no eixo do mesmo, para acionar alguma carga que utilize este movimento para deslocar objetos, por exemplo.
- Em resumo, a definição de motor elétrico, no contexto das máquinas elétricas, é o dispositivo que transforma energia elétrica em mecânica.
- Máquina elétrica é um termo mais amplo, que engloba diferentes dispositivos, como motores, geradores e transformadores.
- Assim, máquinas elétricas rotativas são os motores e geradores elétricos.



Símbolo do motor elétrico

Princípio de funcionamento dos motores elétricos

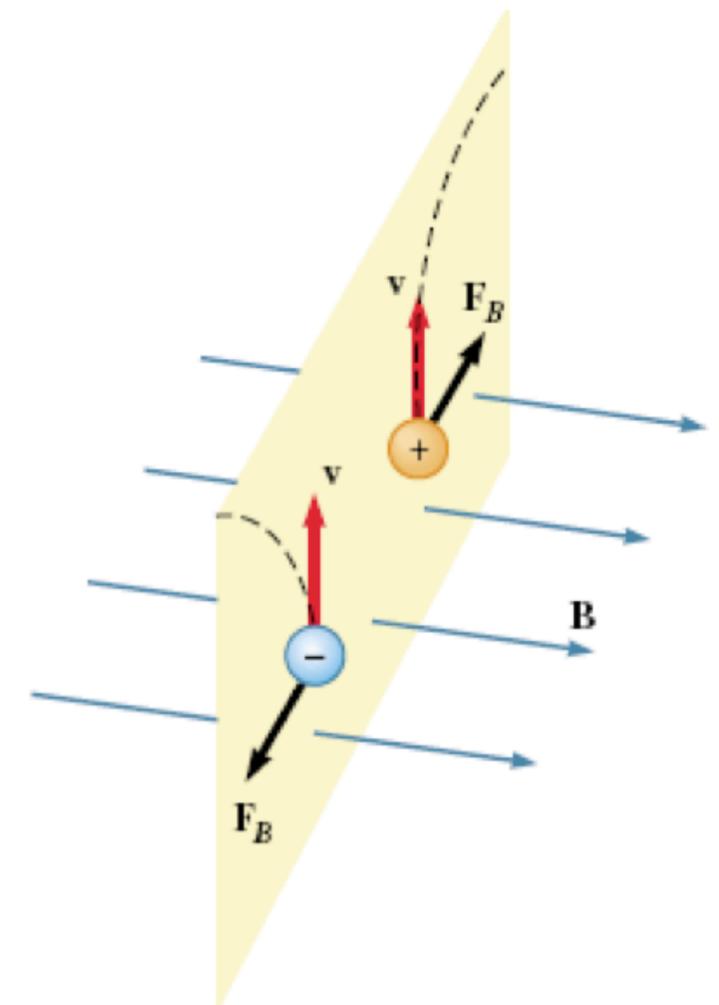
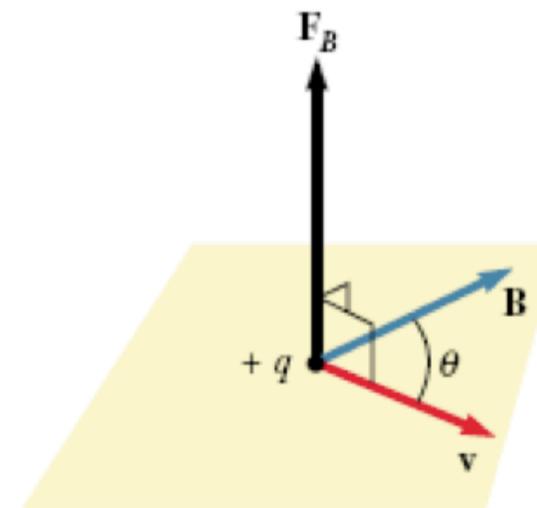
Força eletromagnética:

- Um condutor percorrido por uma corrente elétrica e imerso em um campo magnético sofre a ação de uma força eletromagnética.
- A força poderá ocorrer sobre:
 - Uma partícula (carga);
 - Um condutor retilíneo;
 - Condutores paralelos;
 - Em uma espira.

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \text{seno}(\theta)$$

Onde:

- F – Intensidade da força eletromagnética (N);
- B – Densidade de campo magnético (T);
- l – Comprimento do condutor inserido no campo magnético (m);
- θ – Ângulo entre as linhas de campo e a superfície longitudinal do condutor (rad).

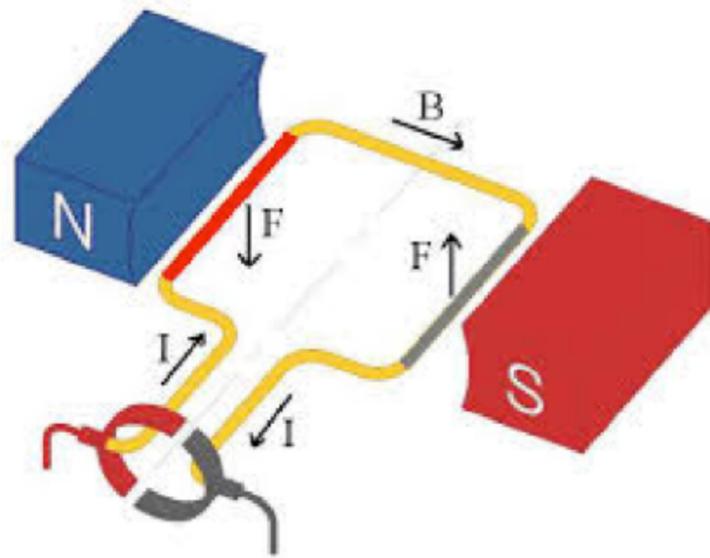


Força sobre cargas elétricas
Fonte: (Halliday, 1984)

Princípio de funcionamento dos motores elétricos

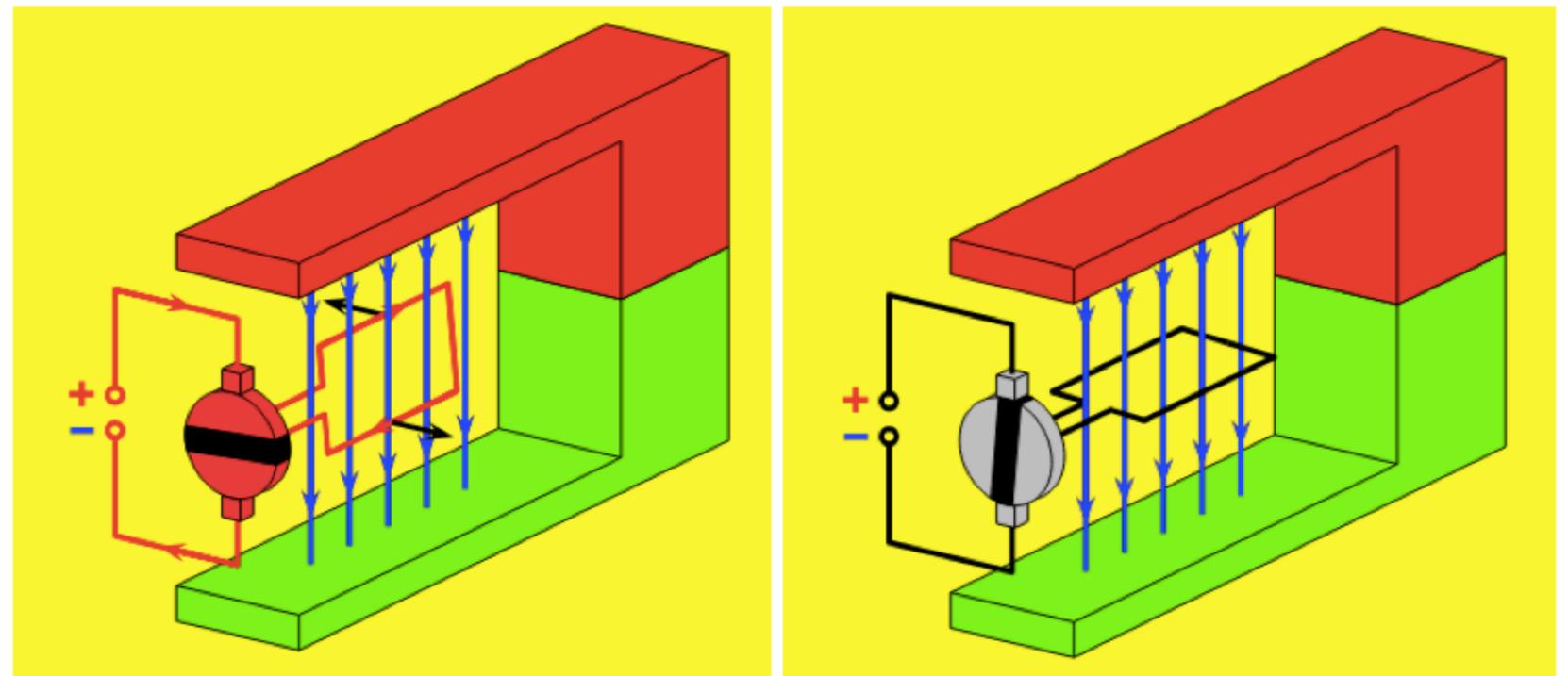
Princípios utilizando a força eletromagnética:

- 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, em decorrência dos estudos e descobertas de Hendrik Antoon Lorentz, por volta do ano 1892;
- 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.



Espira em um campo magnético

Fonte: <https://www.dt.fee.unicamp.br>



Funcionamento do motor cc

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>

Classificação dos motores elétricos

Principais tipos de motores:

- Motores de corrente alternada;
- Motores de corrente contínua;
- Motores universais.

Níveis de classificação				
1	2	3	4	5
Motor CA	Monofásico	Assíncrono	Gaiola de esquilo	Fase dividida
				Capacitor de partida
				Capacitor permanente
				Pólos sombreados
				Capacitor dois valores
			Rotor bobinado	
	Rotor maciço	Repulsão		
	Síncrono	Relutância		
		Imãs permanentes		
	Linear			Indução
			Imãs permanentes	
Trifásico		Assíncrono	De gaiola	
			Rotor bobinado	
		Síncrono	Imãs permanentes	
			Relutância	
			Pólos lisos	
	Pólos salientes			
Universal				
Motor CC	Excitação série			
	Excitação independente			
	Excitação composta			
	Imãs permanentes			
	Excitação paralela			

Principais tipos de motores elétricos

Fonte: Adaptado de (WEG, 2006)

Tipos de motores elétricos

Principais tipos de motores:

- **Motores de corrente contínua** - Possuem um custo elevado, necessitando de alimentação em tensão contínua, permitindo o ajuste de sua velocidade e sendo aplicados, principalmente, em cargas que exigem controle de grande flexibilidade e precisão.

Principais aplicações dos motores de corrente contínua (Siemens):

- Máquinas de papel;
- Bobinadeiras e desbobinadeiras;
- Laminadores;
- Máquinas de impressão;
- Extrusoras;
- Prensas;
- Elevadores;
- Movimentação e elevação de cargas;
- Moinhos de rolos;
- Indústria de borracha;
- Mesa de testes de motores.



Exemplo de motor cc

Fonte: <https://www.weg.net>

Principais aplicações dos motores de corrente contínua (WEG):

- Máquinas de papel e operatrizes em geral;
- Bombas a pistão;
- Torques de fricção;
- Ferramentas de avanço;
- Tornos;
- Bobinadeiras e mandrilhadoras;
- Máquinas de moagem;
- Máquinas têxteis;
- Guinchos e guindastes;
- Pórticos;
- Veículos de tração;
- Prensas;
- Máquinas de papel;
- Tesouras rotativas;
- Indústria química, petroquímica e siderúrgicas;
- Fornos, exaustores, separadores e esteiras e outras.

Tipos de motores elétricos

Principais tipos de motores:

- **Motor de indução** - Funciona com velocidade constante, mas que varia conforme a carga aplicada em seu eixo. São motores simples, robustos e de baixo custo, sendo uns dos mais utilizados para as aplicações convencionais. Permite o controle da velocidade pela comutação de diferentes enrolamentos ou pelo uso de inversores de frequência (conversores cc-ca);
- **Motor síncrono** - Permite o funcionamento com velocidade fixa ou variável, sendo utilizado para grandes potências, devido a seu alto custo;
- **Motor universal** - Podem operar tanto em corrente contínua como em corrente alternada.



Exemplo de motor de indução

Fonte: <https://www.weg.net>

Aplicações dos motores de indução:

- Bombas;
- Ventiladores;
- Compressores;
- Indústria química e petroquímica;
- Estações de tratamento de água;
- Britadores;
- Moinhos;
- Esteiras transportadoras;
- Máquinas operatrizes;
- Sopradores e moinhos de cimento;
- Veículos automotores.

Tipos de motores elétricos

Principais tipos de motores:

- Motor de indução - Funciona com velocidade constante, mas que varia conforme a carga aplicada em seu eixo. São motores simples, robustos e de baixo custo, sendo uns dos mais utilizados para as aplicações convencionais. Permite o controle da velocidade pela comutação de diferentes enrolamentos ou pelo uso de inversores de frequência (conversores cc-ca);
- **Motor síncrono** - Permite o funcionamento com velocidade fixa ou variável, sendo utilizado para grandes potências, devido a seu alto custo;
- Motor universal - Podem operar tanto em corrente contínua como em corrente alternada.

Síncrono x assíncrono:

- Motor síncrono - Pelo seu princípio de funcionamento tem velocidade constante, independente da variação da carga;
- Motor assíncrono - Tem velocidade variável em função da carga aplicada em seu eixo. A diferença entre a velocidade sem carga e com carga é denominada de escorregamento.

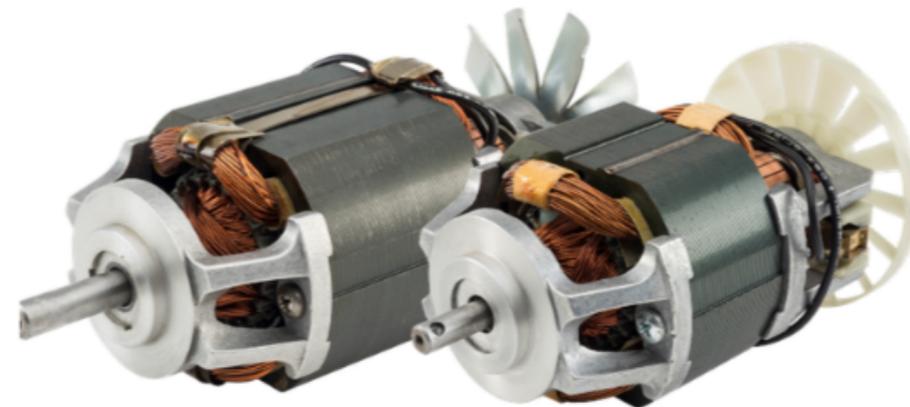


Exemplo de motor síncrono
Fonte: <https://www.weg.net>

Tipos de motores elétricos

Principais tipos de motores:

- Motor de indução - Funciona com velocidade constante, mas que varia conforme a carga aplicada em seu eixo. São motores simples, robustos e de baixo custo, sendo uns dos mais utilizados para as aplicações convencionais. Permite o controle da velocidade pela comutação de diferentes enrolamentos ou pelo uso de inversores de frequência (conversores cc-ca);
- Motor síncrono - Permite o funcionamento com velocidade fixa ou variável, sendo utilizado para grandes potências, devido a seu alto custo;
- **Motor universal** - Podem operar tanto em corrente contínua como em corrente alternada.



Exemplo de motor universal

Fonte: <https://www.mecanicaindustrial.com.br>

Aplicações dos motores universais:

- Misturadores de alimentos;
- Misturadores de bebidas;
- Ventiladores;
- Eletrodomésticos;
- Ferramentas elétricas;
- Cortadores de grama;
- Máquinas de lavar roupa;
- Máquinas de costura;
- Dentre outras.

Tipos de motores elétricos

Motores monofásicos de corrente alternada:

- Os motores monofásicos de corrente alternada são amplamente utilizados para aplicações de uso geral, bombas, condicionadores de ar, ventilação, compressores, eletrodomésticos da linha branca (lavadoras, secadoras, etc.), processadores de alimentos e linhas dedicadas, dentre outras.



Uso geral



Bombas



Ar condicionado



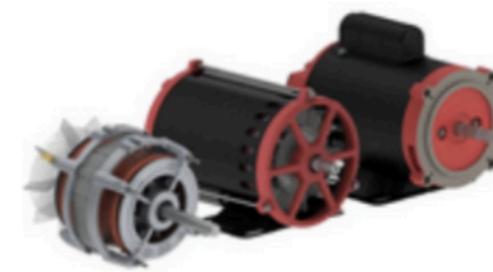
Ventiladores



Compressores



Linha branca



Processador alimentos



Linhas dedicadas

Exemplos de motores de indução monofásicos

Fonte: <https://www.weg.net>

Tipos de motores elétricos

Motores trifásicos de corrente alternada:

- Os motores trifásicos de corrente alternada são utilizados quando se tiver disponível uma rede de energia trifásica, em substituição aos motores de indução monofásicos, para as mais diversas aplicações, como por exemplo: uso geral, alta eficiência, em atmosferas explosivas, bombas, ventiladores, linhas dedicadas, dentre outras.



Uso geral



Alta eficiência



Atmosferas explosivas



Bombas



Ventiladores



Linhas dedicadas

Exemplos de motores de indução trifásicos

Fonte: <https://www.weg.net>

Tipos de motores elétricos

Motores de corrente contínua:

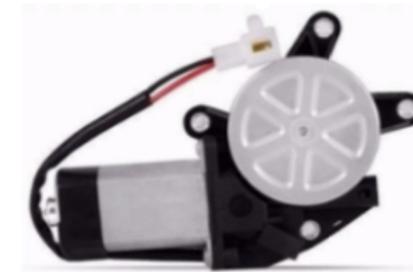
- Os motores de corrente contínua são utilizados em diferentes aplicações associados ou não aos equipamentos eletrônicos, tais como: impressoras, limpadores de para-brisas, vidros elétricos, fresadoras, robótica, brinquedos, parafusadeiras, furadeiras, motores de partida, dentre outras.



Impressora



Limpador de para-brisa



Vidro elétrico



Brinquedo



Parafusadeira



Fresadora



Automação



Partida veículos

Exemplos de motores de corrente contínua

Fonte: <https://www.americanas.com.br>

Tipos de motores elétricos

Motores de passo:

- Os motores de passo são utilizados em situações onde se precisa realizar deslocamentos precisos, por exemplo em impressoras, fresadoras, braços robóticos, injeção eletrônica de automóveis, mesas digitalizadoras, dentre outras aplicações.



Impressora



Fresadora



Robótica



Injeção eletrônica

Exemplos de motores de passo

Fonte: <https://www.americanas.com.br>

Tipos de motores elétricos

Servomotores:

- Os motores do tipo servomotores (ou atuadores) podem ser para corrente contínua ou alternada, aplicados quando é necessário o controle de movimento com posicionamento de alta precisão, reversão rápida e alto desempenho, como por exemplo em robótica, sistemas automatizados, máquinas CNC (controle numérico computadorizado), freio eletromagnético, dentre outras.
- Os servomotores tem semelhanças e diferenças em relação aos motores de passo. Enquanto os motores de passo têm velocidade e torque intermediários, onde o torque cai com o aumento da velocidade, nos servomotores se tem, em geral, torque constante até a velocidade nominal máxima da máquina.



Automação



Esteiras



Robótica



Brinquedos

Exemplos de servomotores

Fonte: <https://www.filipeflop.com> e <https://www.americanas.com.br>

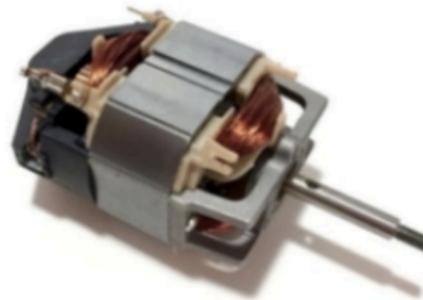
Tipos de motores elétricos

Motores universais:

- Os motores universais são aplicados em eletrodomésticos, ferramentas elétricas, ventiladores, dentre outras aplicações.



Ventilação



Aparador de grama



Aspirador de pó



Furadeira

Exemplos de motores universais

Fonte: <https://www.americanas.com.br>

Tipos de motores elétricos

Motores brushless (sem escovas):

- Os motores brushless (sem escovas) tem maior vida útil e velocidade constante, pois são motores de corrente contínua sem escovas, sendo utilizados em drones, aeromodelos, ferramentas elétricas, instrumentação, robótica, veículos elétricos, empilhadeiras, máquinas de costura, dentre outras;
- Estes motores podem operar em velocidades muito altas, requeridas em diversas aplicações, como aeromodelos, nautimodelos (pequenos barcos) e automodelos (pequenos carros elétricos).



Drone



Automodelo ou nautimodelo



Automação



Aeromodelo

Exemplos de motores sem escovas

Fonte: <https://www.tekkno.com.br> e <https://www.americanas.com.br>

Principais grandezas elétricas e mecânicas

Grandezas elétricas:

- Tensão elétrica - Tensão de operação do motor, em corrente contínua será o valor médio e em corrente alternada será o valor eficaz;
- Potência elétrica - A potência elétrica nos motores pode ser apresentada em watts ou unidades específicas, como cavalo vapor (hp ou cv), onde 1 hp equivale a 746 W e 1 cv equivale a 736 W. A potência elétrica na entrada do motor é diferente da potência mecânica disponível no eixo do mesmo em virtude das perdas internas no motor, sendo que, em geral, a potência apresentada na placa corresponde a potência útil em termos mecânicos para a carga acoplada ao eixo do motor;
- Corrente elétrica - De modo similar a tensão elétrica, em corrente contínua será a corrente média drenada pelo motor, em corrente alternada será o valor eficaz. A corrente pode variar conforme o acionamento do motor, por exemplo se for utilizada modulação por largura de pulsos (PWM), corrente máxima será diferente da corrente média, mesmo para motores de corrente contínua. Além disso, a corrente em regime permanente é diferente da corrente de partida, conforme o tipo de motor e sua carga (no eixo do mesmo);



Principais grandezas elétricas e mecânicas

Grandezas elétricas:

- Frequência - Para motores de corrente alternada se apresenta a frequência de operação dos mesmos, em geral sendo 50 ou 60 Hz;
- Fator de potência - Corresponde a relação entre a potência ativa e aparente do motor, sendo indutivo devido a característica eletromagnética dos motores;
- Rendimento - É a relação entre a potência ativa (em watts) na saída e a potência consumida na entrada do motor, isto é, corresponde a relação entre a potência mecânica útil no eixo do motor e a potência elétrica na entrada da máquina.

Principais grandezas elétricas e mecânicas

Grandezas mecânicas:

- Potência mecânica - É a potência útil em watts disponível no eixo do motor, que será utilizada para o dimensionamento da carga acoplada ao mesmo;
- Conjugado - É a medida do esforço necessário para girar o eixo, também é chamado de torque, momento ou binário, sendo medido em Newton metro (Nm);
- Rotação - É o número de giros (voltas) do eixo do motor por unidade de tempo, sendo normalmente expressa em rotações por minuto (rpm). Para motores de indução, onde o número de polos do campo magnético pode ser de 2 a 8, se teria: 2 polos rotação de 3.600 rpm, 4 polos rotação de 1.800 rpm, 6 polos rotação de 1.200 rpm e 8 polos rotação de 900 rpm. A rotação pode ser apresentada como sendo síncrona, correspondendo neste caso ao valor nominal sem escorregamento;
- Escorregamento - É a diferença entre a rotação ou velocidade síncrona e a rotação efetiva no eixo do motor, variando em função da carga ou da tensão de alimentação do motor. Se aplica aos motores assíncronos, sendo que nos motores síncronos o escorregamento será considerado nulo;



Principais grandezas elétricas e mecânicas

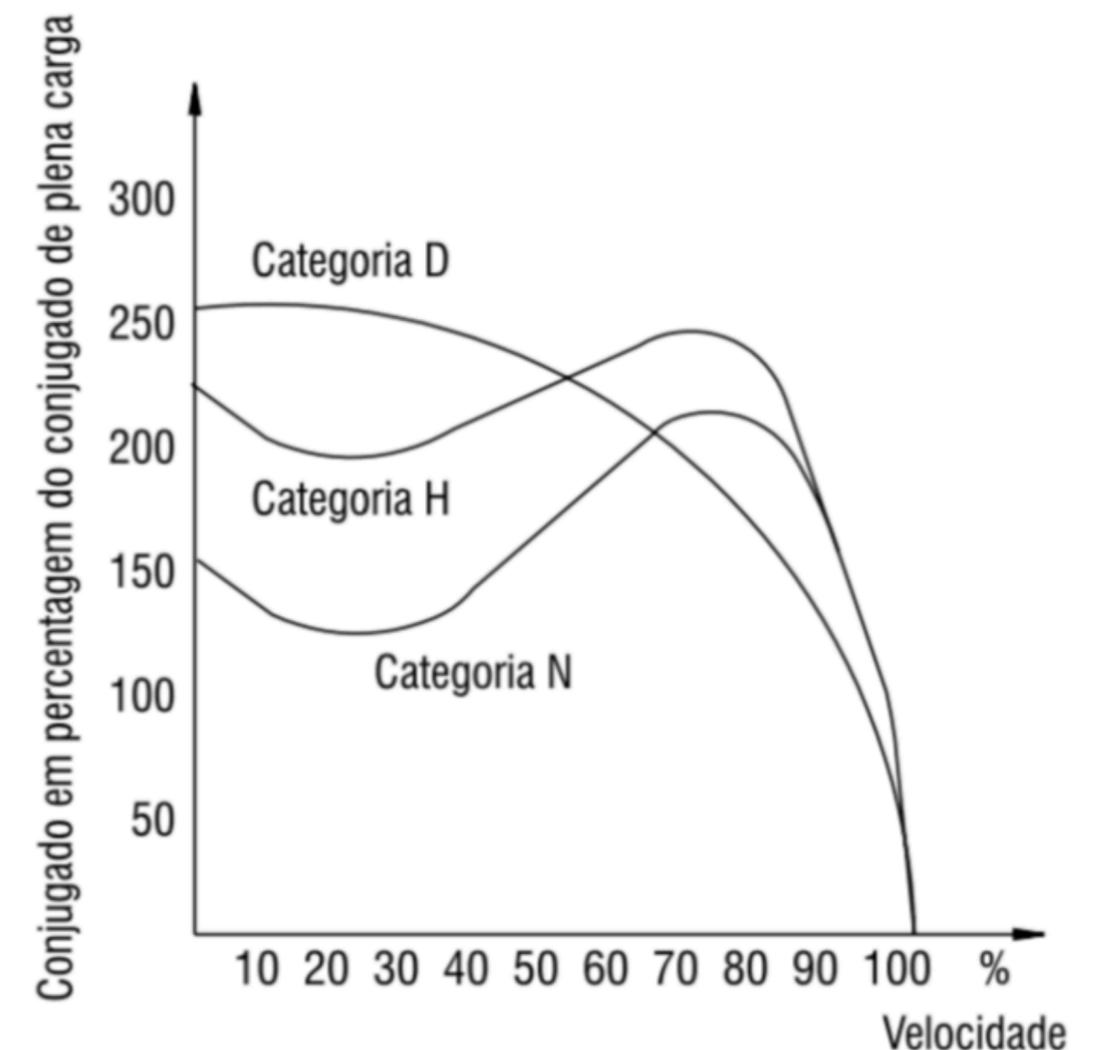
Grandezas mecânicas:

- Grau de proteção - É a proteção do motor contra a entrada de elementos (corpos) estranhos, tais como poeiras, fibras, etc; também contra contato acidental e penetração de água. O grau de proteção é identificado por um código, do tipo IPxx, onde o código IP21 e IP23 caracteriza motores abertos, enquanto IP55, IP56, IP65 e IP66 se aplica a motores fechados, por exemplo;
- Regime de serviço - Representa o grau de regularidade da carga acoplada ao motor. Podem ser para regime contínuo, para operação com carga constante ou regime variável, onde a carga é alterada ao longo do tempo;
- Fator de serviço - Indica a carga permissível a ser aplicada acima da potência nominal no eixo do motor. Assim, um motor com fator de serviço $FS = 1$ indica que o motor foi projetado para operar continuamente com potência igual ou inferior a nominal;
- Carcaça - Apresenta as medidas e o desenho geométrico da parte mecânica externa do motor;
- Ventilação - Característica relativa a refrigeração do motor, onde os motores abertos tem ventilação interna, enquanto os motores fechados tem ventilação externa.

Principais grandezas elétricas e mecânicas

Outras grandezas:

- Classe de isolamento - Especifica o isolamento térmico do motor, isto é, determina a máxima temperatura que o bobinado do motor pode suportar sem danos ao mesmo. Por exemplo, motores classe B suportam 135 °C, classe F 150 °C e classe H 180 °C;
- Temperatura ambiente - Temperatura ambiente máxima para operação adequada do motor;
- Conjugado versus velocidade - Os motores podem ser classificados em categorias, conforme suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida. A categoria N apresenta conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento; categoria H tem alto conjugado de partida, corrente de partida normal e baixo escorregamento; e categoria D tem alto conjugado de partida, corrente de partida normal e alto escorregamento.



Curva conjugado x velocidade

Fonte: <https://www.weg.net>

Máquinas de corrente contínua

