

Atuadores

Aula 01 - Máquinas Elétricas

Apresentação

Nesta primeira aula, serão introduzidos brevemente alguns conceitos básicos sobre controle de processo, apesar de não ser o foco da disciplina. No entanto, um bom entendimento desses conceitos introdutórios possibilitará ao aluno visualizar como os sensores e atuadores são empregados na automação dos processos industriais, facilitando de forma significativa a compreensão dos assuntos abordados nas aulas seguintes. Em seguida, serão definidos os conceitos de sensor e atuador, e de outros termos associados a esses instrumentos, entrando assim no assunto propriamente dito.

Objetivos

- Entender a importância das máquinas elétricas como verdadeiros conversores de energia.
- Poder compreender as principais leis da física que determinam o funcionamento das máquinas elétricas, tais com a lei de Lenz e a lei de Faraday.
- Classificar as máquinas conforme o princípio de funcionamento.
- Poder definir os principais parâmetros elétricos e mecânicos que caracterizam esses tipos de equipamentos.

Conceitos Básicos

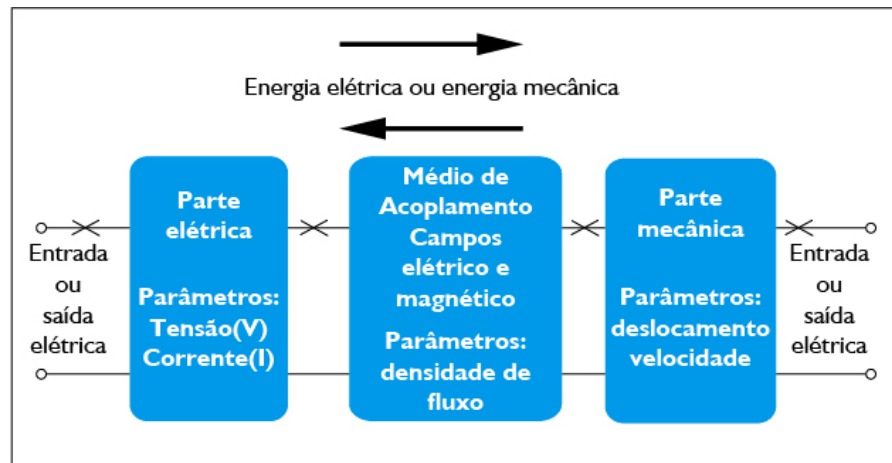


Figura 1 - Efeito de fluxo de energia visto como um transdutor.

Fonte: Autoria Própria

A eletricidade é a única forma de energia cujo controle, utilização e conversão em outras formas de energia são relativamente fáceis, ela provavelmente continuará a ser a forma principal de energia utilizada pelo homem.

A primeira indicação da possibilidade de intercâmbio entre energia elétrica e mecânica foi apresentada por Michael Faraday em 1831. Esta descoberta é considerada por alguns como o maior avanço individual no progresso da ciência para atingir o aperfeiçoamento final da humanidade.

A conversão eletromagnética de energia relaciona as forças elétricas e magnéticas do átomo com a força mecânica aplicada à matéria e ao movimento. Como resultado desta relação, a energia mecânica pode ser convertida em energia elétrica e vice-versa, através das **MÁQUINAS ELÉTRICAS**. A principal etapa para realizar esta conversão de energia em uma máquina elétrica é mostrada na Figura 2.

A energia elétrica produzida através dessa conversão eletromecânica de energia pode ser reconvertida várias vezes, antes que a energia seja finalmente convertida à forma que realizará o trabalho útil.

- ⇒ Mecânica (motores)
- ⇒ Térmica (estufas)
- ⇒ Luminosa (lâmpadas)

- ⇒ Química (processos eletroquímicos)
- ⇒ Outras formas de energia elétrica

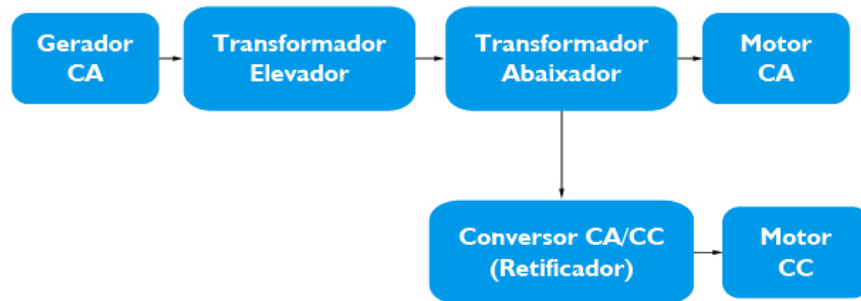


Figura 2 - As principais etapas do sistema elétrico e as máquinas elétricas.

Fonte: Autoria Própria

Atividade 01

1. Descreva o funcionamento do sistema de conversão de energia mecânica a elétrica.
2. Quais são os tipos de conversores (de elétrico a mecânico) mais utilizados?

Fundamentos dos Geradores e Motores Elétricos

Quase todas as pessoas vivem e trabalham no extremo de um circuito elétrico. Diferentes formas de energia podem ser convertidas em eletricidade (energia elétrica) e, do mesmo modo, a eletricidade pode ser convertida em diferentes formas de energia. O gerador elétrico é o dispositivo que transforma energia mecânica em energia elétrica. O motor elétrico, essencialmente um gerador usado de modo diferente, transforma energia elétrica em energia mecânica. Os geradores são usados para fornecer quase toda a energia elétrica usada atualmente. Um dos nossos principais problemas é encontrar fontes de energia para o acionamento desses geradores. Por esse motivo, torna-se cada vez maior a necessidade de novas fontes alternativas de energia.

Embora seja grande a variedade de geradores e motores elétricos, verificaremos que todos eles são basicamente muito semelhantes. Todos os geradores e motores elétricos usam a interação entre condutores em movimento e campos magnéticos (ou vice-versa). Nesse ponto, é conveniente rever o que foi estudado sobre magnetismo e efeitos magnéticos (em **Conceitos de Eletricidade**), antes de prosseguir com o estudo dos geradores e dos motores elétricos.

É importante lembrarmos que o funcionamento dos geradores e motores de CC e de CA depende simplesmente da **interação de campos magnéticos e condutores percorridos por corrente elétrica**.

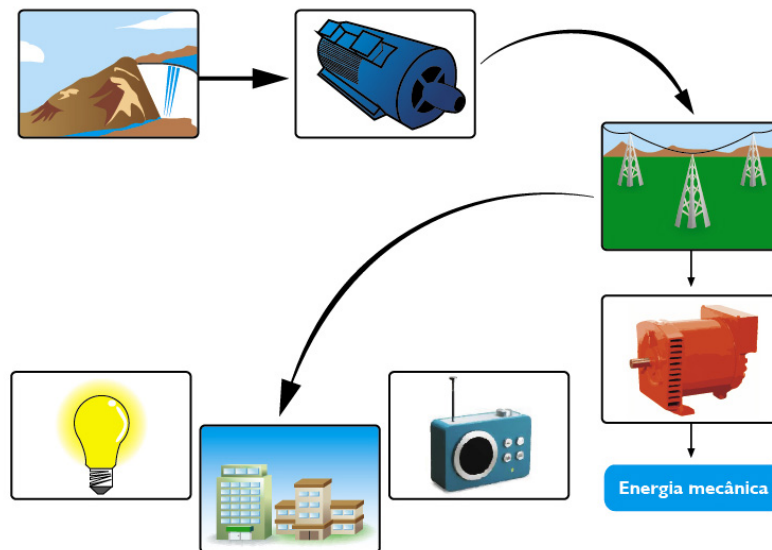


Figura 3 - A conversão eletromecânica da energia nos geradores e motores elétricos.
Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAABaAAF/teoria-conversao>. Acesso em: 30 set. 2013.

Como vimos anteriormente, uma **FEM (força eletromotriz)** é induzida em um condutor que se move através de um campo magnético. Todas as usinas geradoras, que proporcionam quase toda a energia elétrica consumida atualmente no mundo, usam este princípio simples para converter uma forma qualquer de energia em energia elétrica.

A maioria das estações geradoras usa a energia térmica produzida pela queima de combustíveis fósseis, tais como carvão, óleo ou gás natural para obter vapor. O vapor é utilizado então para acionar uma turbina acoplada a um gerador. Ocorrem, assim, várias transformações de energia: primeiro, a energia química do combustível é convertida em calor;

depois, a energia térmica é transformada em energia mecânica, ou de movimento, na turbina; e, finalmente, a energia mecânica é convertida em energia elétrica no gerador. Independentemente da fonte original de energia – carvão, óleo, gás, plutônio, urânio, queda d'água, sol, vento – a etapa final é sempre a conversão da energia mecânica de rotação em energia elétrica, em um gerador. O mesmo acontece em todos os pequenos conjuntos geradores nos navios e nos veículos motorizados, e também nas fontes de energia de emergência.

É de grande importância lembrarmos que no Brasil a energia elétrica é quase que totalmente produzida em usinas hidrelétricas, que é uma das formas mais baratas e limpas de se produzir eletricidade. Também devemos lembrar que o potencial hidrelétrico do Brasil já foi praticamente esgotado, o que exige uma busca incessante por fontes alternativas de energia. No nosso Estado, por exemplo, teremos em breve a implantação de uma usina termelétrica que utilizará o gás natural como combustível para obter o vapor que acionará as pás da turbina. Por fazer uso de um combustível abundante na região, o preço do kWh produzido será bastante baixo, o que viabilizará o investimento. Na Figura 4 são resumidos os principais métodos utilizados para a produção da energia elétrica.



Figura 4 - As principais formas de se produzir energia elétrica.

Fonte: <http://estudantes43.blogspot.com.br/2010/08/principais-fontes-de-energia.html>. Acesso em: 30 set. 2013.

Leitura complementar

O Rio Grande do Norte tem crescido muito no potencial eólico, e já possui um dos maiores potenciais do Brasil, vamos ler o texto abaixo e conhece mais sobre esse potencial energetico.

[http://jucern.rn.gov.br/Conteudo.asp?](http://jucern.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=54487&ACT=null&PAGE=null&PARM=null&LBL=NOT%C3%8DCIA)

[TRAN=ITEM&TARG=54487&ACT=null&PAGE=null&PARM=null&LBL=NOT%C3%8DCIA](http://jucern.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=54487&ACT=null&PAGE=null&PARM=null&LBL=NOT%C3%8DCIA)

Atividade 02

1. Dos métodos de produzir energia elétrica, qual é o que tem mais eficiência? Por quê?
2. Compare os métodos de geração de energia eólica e solar.

Produção de Eletricidade por Meio do Eletromagnetismo

Você sabe que se pode produzir eletricidade movimentando um fio em um campo magnético. Desde que haja movimento relativo entre o condutor e o campo magnético, há produção de eletricidade. A tensão obtida é conhecida como tensão induzida ou **fem** induzida, e o processo para obtê-la, cortando o campo magnético com um condutor, é chamado de indução e explicado pela Lei de Faraday.

O valor da tensão induzida no condutor que corta o campo magnético depende de diversos fatores:

- quando se aumenta a VELOCIDADE de corte das linhas do campo magnético pelo condutor, a **fem** também aumenta;
- quando a INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO aumenta, a **fem** induzida também aumenta;

- se o NÚMERO DE ESPIRAS que corta o campo magnético é aumentado, a **fem** induzida é novamente aumentada.

A polaridade da **fem** induzida será tal que a corrente resultante criará um campo magnético que reagirá com o campo do ímã e se oporá ao movimento da bobina. Esse fenômeno ilustra o princípio conhecido como Lei de Lenz. Esta lei afirma que, quando existe indução eletromagnética, o sentido da **fem** induzida é tal que o campo magnético dela resultante se opõe ao movimento que produz a **fem**, **tal como é mostrado na Fig.5.**

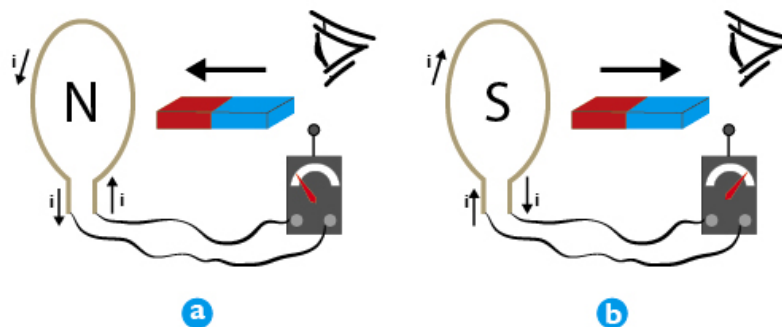


Figura 5 - Fenômeno da lei de Lenz verificada pela **fem** induzida.

Fonte: http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/2011/11/cursos-do-blog-eletricidade_09.html. Acesso em: 30 set. 2013.

De acordo com a Lei de Faraday, um fluxo magnético variável com o tempo, enlaçando uma bobina ou enrolamento, induz nesta uma fem (tensão induzida):

$$E = \frac{-N\Delta\phi}{\Delta t}$$

Simplificando, a tensão induzida (E) em cada condutor é proporcional à intensidade do campo magnético multiplicada pela velocidade do condutor no campo:

$$E \approx \textit{fluxo} \times \textit{velocidade}.$$

Você também sabe que a polaridade da tensão induzida, e, portanto, o sentido da corrente gerada é determinado pelo **sentido do movimento relativo** entre o campo magnético e o condutor que o corta (**Lei de Lenz**), como mostra a Fig.5.

Resumindo, o que você já sabe sobre a eletricidade produzida pelo magnetismo:

1. O movimento de um condutor através de um campo magnético gera uma fem que pode estabelecer a circulação de uma corrente elétrica, no caso de haver um circuito fechado.
2. Quanto mais rápido for o movimento, quanto maior o número de espiras e quanto maior a intensidade do campo magnético, tanto maior será a fem induzida e mais intensa será a corrente.
3. Invertendo-se o sentido do movimento do condutor, a polaridade da fem induzida também é invertida e, portanto, o sentido da corrente.
4. Não importa qual se mova, se o condutor ou o campo magnético, porque o resultado será sempre o mesmo.

Atividade 03

1. Descreva o princípio da lei de Faraday e explique como ele é aplicado numa máquina de corrente contínua.
2. Descreva o princípio da lei de Lenz e explique como ele é aplicado numa máquina de corrente contínua.

Conceitos Fundamentais de Motores Elétricos

Antes de falar sobre um motor elétrico específico serão mostradas algumas definições paramétricas comuns a todas elas. O universo das máquinas elétricas encontra-se descrito na Figura 6, em que as duas grandes famílias de motores elétricos são os motores CC e CA, que serão analisadas nos próximos capítulos.

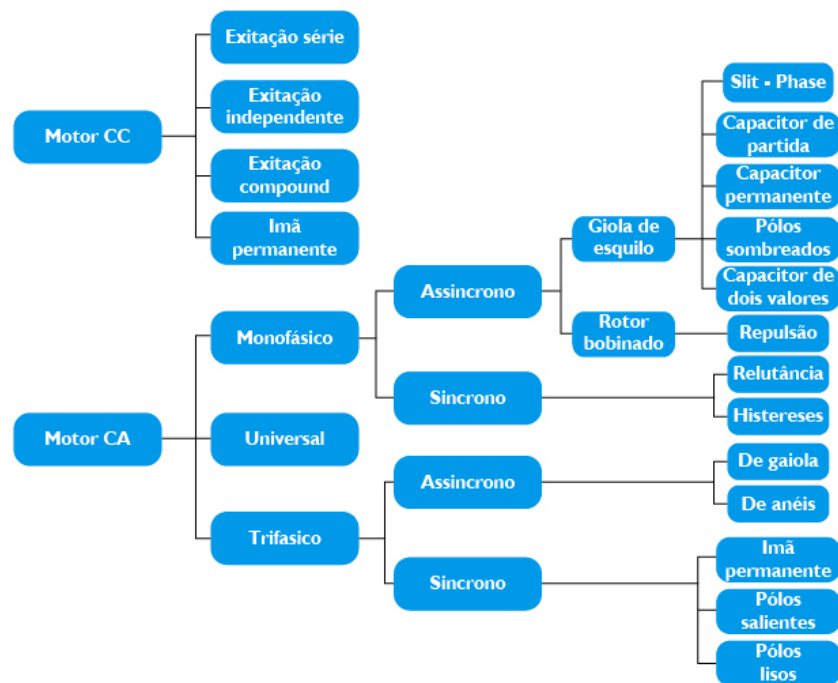


Figura 6 - Família de motores elétricos.
 Fonte: WEG Indústrias Ltda (2005).

Conceitos Básicos

A seguir, serão discutido alguns parâmetros mecânicos e elétricos básicos que determinam o comportamento das máquinas elétricas.

Conjugado

O conjugado, também chamado de torque ou binário, é a medida do esforço necessário para girar o eixo. Para medir o esforço necessário para fazer girar o eixo não basta definir a força empregada, é preciso também dizer a que distância do eixo a força é aplicada. O esforço é medido pelo conjugado, que é produto da força pela distância, isto pode ser apreciado na Figura 7, no exemplo da polia.

$$C = F \times L$$

A unidade utilizada para o conjugado do Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Newton.metro (N.m).

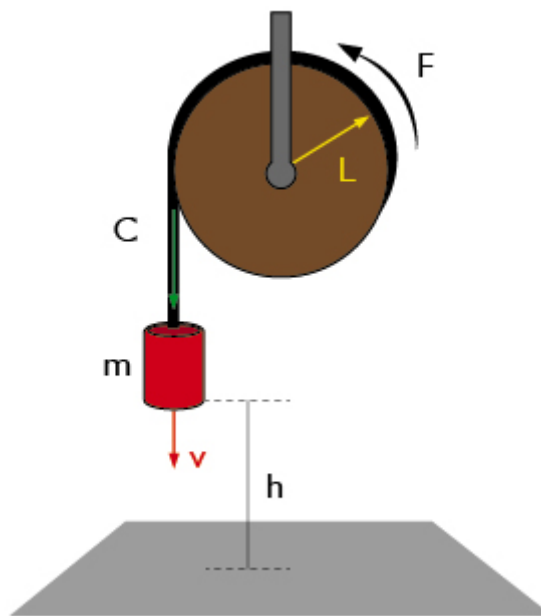


Figura 7 - Efeito do conjugado em uma polia.

Fonte: http://www.ipv.pt/millennium/arq8_fly.htm. Acesso em: 30 set. 2013.

Energia e Potência Mecânica

A potência mede a rapidez com que a energia é aplicada ou consumida. Como no exemplo da Figura 7, a energia gasta ou trabalho realizado para trazer o balde do fundo até a superfície é sempre a mesma, porém a potência expressa a rapidez com que esta energia é aplicada para erguer o balde até a boca. Ou seja, a potência é a energia ou trabalho total realizado dividido pelo tempo total para realizá-lo. A unidade utilizada para a potência mecânica no SI é o Watt (W), porém a unidade mais utilizada é o cv (cavalo - vapor) equivalente a 736 W.

$$P_{mec} = \frac{F \times d}{t} (W)$$

$$P_{mec} = \frac{F \times d}{t \times 736} (cv)$$

$$v = \frac{\pi d n}{60} (m/s)$$

Onde:

F = força em N

v = velocidade angular em m/s

d = diâmetro da peça em m

n = velocidade em rpm

Energia e potência elétrica

Embora a energia seja uma só, ela pode ser obtida de forma diferente. Ao ligar-se uma resistência a uma rede elétrica com tensão, passará uma corrente elétrica que irá aquecer a resistência. A resistência absorve a energia e a transforma em calor, que também é uma forma de energia. Um motor elétrico absorve energia elétrica da rede e a transforma em energia mecânica disponível na ponta do eixo.

Circuito de corrente contínua

A potencia elétrica, em circuitos de corrente contínua, pode ser obtida através da relação de tensão(U), corrente (I) e resistência (R), envolvidos em um circuito elétrico, ou seja:

$$P = U \times I$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = R \times I^2 \text{ (W)}$$

Onde:

U = tensão em volt

I = Corrente em amperes

R = resistência em ohm

P = potência média em watt

Atividade 04

1. Uma máquina de corrente contínua é alimentada por uma fonte de 150VDC. Se a resistência interna é de 100ohms e a força contraeletromotriz induzida no estator é de 50 VDC. Qual é a potência consumida pela máquina CC?
2. Para o sistema da Figura 7, uma massa de 0,5kg é deslocada a uma velocidade de 5m/s. Se a força da corda é de 10kg, qual a potência necessária para elevar essa massa?

Circuito de Corrente Alternada

A potência elétrica absorvida da rede alternada:

- A potência é calculada multiplicando-se a tensão da rede pela corrente, se a carga (resistência) for monofásica.

$$P = U \times I \quad (W)$$

No sistema trifásico, a potência em cada fase da carga será $P_f = U_f \times I_f$, como de fosse um sistema monofásico independente. A potência total será a soma das potências das três fases, ou seja:

$$P = 3 \times P_f = 3 \times U_f \times I_f$$

Lembrando que o sistema trifásico é ligado em estrela ou triângulo, têm-se as seguintes relações:

Ligação estrela: $U = \sqrt{3} \times U_f \quad e \quad I = I_f$

Ligação triangular: $U = U_f \quad e \quad I = \sqrt{3} \times I_f$

Assim, a potência total, para ambas as ligações, será:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \quad (W)$$

- Carga reativa

Para as "cargas reativas", em que existe defasagem, como é o caso dos motores de indução, esta defasagem tem que ser levada em conta. Assim, a expressão fica:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \quad (W)$$

A unidade de medida usual para potência elétrica é o watt (W), correspondente a 1 volt x 1 ampère. Esta unidade é utilizada para medida de potência mecânica.

Corrente Nominal

É a corrente que o motor absorve da rede quando funciona a potência nominal, sobre tensão e potência nominal. O valor da corrente nominal depende do rendimento (η) e do fator de potência ($\cos\varphi$) do motor:

$$I = \frac{P(kW) \times 1000}{\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos\phi} = \frac{P(c.v) \times 736}{\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos\phi}$$

Os valores de corrente (I), rendimento (η) e fator de potência ($\cos\varphi$) dos motores são localizados nos dados de placas do motor.

Potência aparente, ativa e reativa

Potência aparente (S):

É o resultado da multiplicação da tensão pela corrente ($S = U \times I$, para sistemas monofásicos e $S = \sqrt{3} \times U \times I$, para sistemas trifásicos). Corresponde à potência real ou "potência ativa" que existiria se não

houvesse defasagem de corrente, se a carga fosse formada por resistência. Então:

$$S = \frac{P}{\cos \phi(va)}$$

Para as cargas resistivas, $\cos \phi = 1$ e a potência ativa se confundem com a potência aparente. A unidade de medida para potência aparente é volt-ampère (v.a.) ou seus múltiplos, o quilovolt-ampère (kva).

Potência ativa (P):

É a parcela da potência aparente que realiza trabalho, que é transformada em energia.

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \phi \quad (W)$$

ou

$$P = S \times \cos \phi \quad (W)$$

Potência reativa (Q):

É a parcela de potência aparente que não realiza trabalho. Apenas é transferida e armazenada nos elementos passivos (capacitivos e indutivos).

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin \phi \quad (v.a.r.)$$

ou

$$Q = S \times \sin \phi \quad (v.a.r.)$$

Potência Equivalente

Um motor elétrico deverá suprir a potência necessária, sendo recomendável que haja uma margem de folga, pois algumas sobrecargas poderão ocorrer. Dependendo do regime de serviço, o motor pode eventualmente suprir mais ou menos potência. Apesar das inúmeras formas normalizadas de descrição das condições de funcionamento de um motor, é frequentemente necessário, na prática, avaliar a solução imposta ao motor por um regime mais complexo que aqueles descritos nas normas. Uma forma usual é calcular a potência equivalente pela fórmula:

$$(P_m)^2 = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt$$

Onde:

P_m = Potência média equivalente solicitada ao motor

P(t) = Potência instantânea pelo tempo, solicitada ao motor

T = Duração total do ciclo (período)

O método é baseado na hipótese de que a carga efetivamente aplicada ao motor acarretará a mesma solicitação térmica que uma carga fictícia, equivalente, que solicita continuamente a potência P_m. Baseia-se também no fato de ser assumida uma variação das perdas com o quadrado da carga, e que a elevação de temperatura é diretamente proporcional às perdas. Isto é verdade para motores que giram continuamente, mas são solicitados intermitentemente, como mostra a fig.8, uma máquinas com solicitação intermitente de seis passos. Assim:

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4 + P_5^2 \cdot t_5 + P_6^2 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}}$$

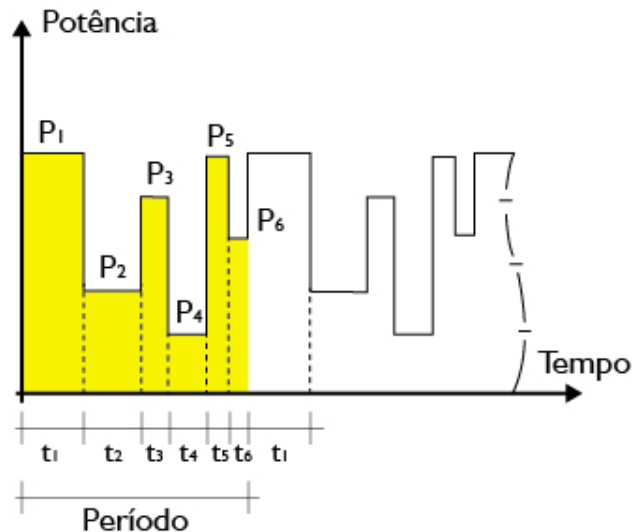


Figura 8 - Funcionamento contínuo com solicitação intermitente.

Fonte: WEG Indústrias Ltda (2005).

No caso de o motor ficar em repouso entre os tempos de carga, como mostra a Fig. 9, a refrigeração deste será prejudicada. Assim, para os motores em que a ventilação está vinculada ao funcionamento do motor (por exemplo, motores totalmente fechados, com ventiladores externos montados no próprio eixo do motor), a potência equivalente é calculada pela fórmula:

$$(P_m)^2 = \frac{\sum(P_i^2 \cdot t_i)}{\sum(t_i + \frac{1}{3}t_r)}$$

Onde:

t_i = Tempo de carga

t_r = Tempo de repouso

P_i = Carga correspondente

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_3^2 \cdot t_3 + P_5^2 \cdot t_5 + P_6^2 \cdot t_6}{t_1 + t_3 + t_5 + t_6 + \frac{1}{3}(t_2 + t_4 + t_7)}}$$

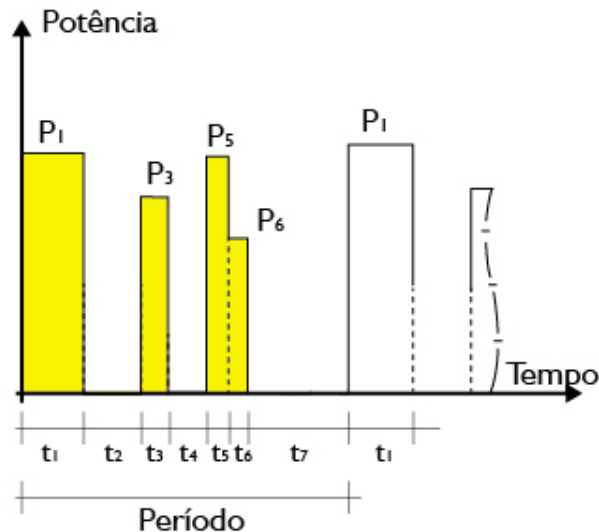


Figura 9 - Funcionamento com carga variável e com repouso entre os tempos de carga.

Fonte: WEG Indústrias Ltda (2005).

Rendimento

O motor elétrico absorve energia elétrica da linha e a transforma em energia mecânica disponível no eixo. O rendimento define a eficiência com que é feita esta transformação. Chamada potência útil (P_u), a potência mecânica disponível no eixo; e potência absorvida (P_a), a potência elétrica que motor retira da rede. O rendimento será a relação entre as duas:

$$\eta\% = \frac{P_u(W)}{P_a(W)} \times 100 = \frac{P(W)}{\sqrt{3} \cdot U I \cos \phi} \times 100 = \frac{736 \cdot P(c.v)}{\sqrt{3} \cdot U I \cos \phi} \times 100$$

Atividade 05

1. Explique a diferença entre potência ativa e reativa.
2. Como se interpreta o rendimento (η) do fator de potência ($\cos \phi$) num motor elétrico?

Resumo

Nesta aula, tivemos a abordagem dos motores elétricos, iniciando com conceitos básicos que dão origem ao funcionamento dos motores elétricos. Foram mostradas a família de motores elétricos e os principais parâmetros, independente do tipo de máquina.

Autoavaliação

1. Descreva o funcionamento do sistema de conversão de energia mecânica a elétrica.
2. Quais são os tipos de conversores (de elétrico a mecânico) mais utilizados?
3. Para o sistema da Figura 7, uma massa de 1,5kg é deslocada a uma velocidade de 10m/s. Se a força da corda é de 20kg, qual a potência necessária para elevar essa massa?
4. Defina a lei de Faraday e como é aplicado no funcionamento dos motores elétricos

Referências

ADKINS, B.; HARLEY, R. G. **The general theory of alternating current machines**. London: Chapman and Hall, 1975.

FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.; KUSKO, A. **Teoria e análise das máquinas elétricas**. [s.l.]: Hispano Europa, 1984.

GOURISHANKAR, Vembu. **Conversão de energia eletromecânica**. [s.l.]: Alfaomega, 1990.

KOSTENKO, M. P.; PIOTROVSKI, L. M. **Máquinas eléctricas**. 2 ed. Moscou: Editorial Mir, 1979. v. 2.

McPHERSON, G.; LARAMORE, R. D. **An introduction to electrical machines and transformers**. New York: John Wiley & Sons, 1990.

SAY, M. G. **Introduction to the unified theory of electromagnetic machines.** Great Britain: Pitman Press, 1971.

WEG Indústrias Ltda. **Módulo 1 e 2** - Comando e proteção. Santa Catarina: Centro de Treinamento WEG, 2005.

WHITE, D. C.; WOODSON, H. H. **Electromechanical energy conversion.** New York: John Wiley & Sons, 1959.