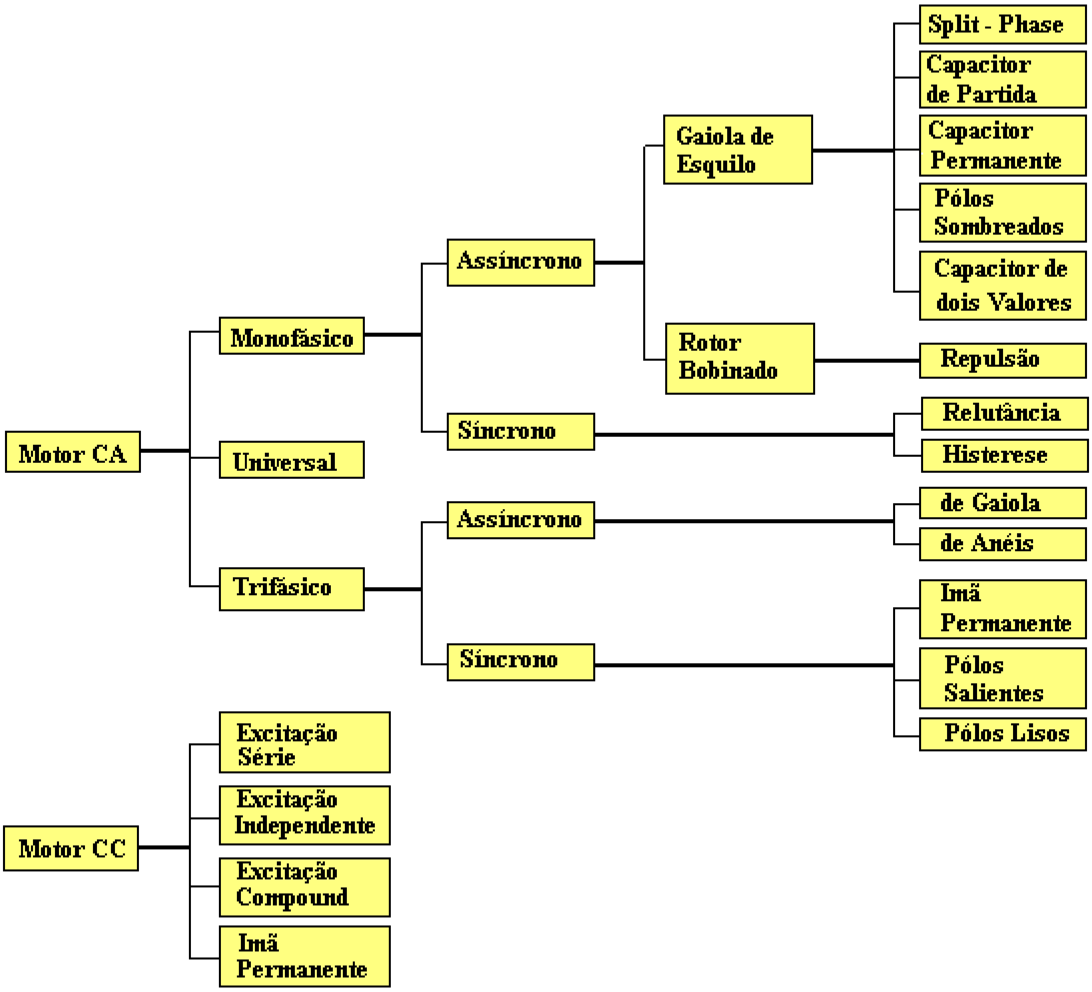
1.2 NOÇÕES FUNDAMENTAIS

1.2.1 MOTORES ELÉTRICOS



O Universo Tecnológico em Motores Elétricos

1.2.1.1 MOTOR SÍNCRONO

Os motores síncronos são motores de velocidade constante e proporcional com a frequência da rede. Os pólos do rotor seguem o campo girante imposto ao estator pela rede de alimentação trifásica. Assim, a velocidade do motor é a mesma do campo girante.

Basicamente, o motor síncrono é composto de um enrolamento estatórico trifásico, que produz o que se designa de campo girante, e de um rotor bobinado (de pólos salientes ou de pólos lisos) que é excitado por uma tensão CC. Esta tensão CC de excitação gera um campo estacionário no rotor que interagindo com o campo girante produzido pelo enrolamento estatórico, produz torque no eixo do motor com uma rotação igual ao próprio campo girante.

Figura 1.1 - Motor síncrono

O maior conjugado que o motor pode fornecer está limitado pela máxima potência que pode ser cedida antes da perda de sincronismo, isto é, quando a velocidade do rotor se torna diferente da velocidade do campo girante, ocasionando a parada do motor (tombamento). A excitação determina também as porcentagens de potência ativa e reativa que o motor retira da rede, para cada potência mecânica solicitada pela carga.

Este tipo de motor tem a sua aplicação restrita a acionamentos especiais, que requerem velocidades invariáveis em função da carga (até o limite máximo de torque do motor). A sua utilização com conversores de frequência pode ser recomendada quando se necessita uma variação de velocidade aliada a uma precisão de velocidade mais apurada.

A rotação do eixo do motor (rotação síncrona) é expressa por:

$$n_S = \frac{120 \times f}{2p}$$

Onde: n_S = Rotação síncrona (rpm);
f = Frequência (Hz);
2p = Número de pólos.

1.2.1.2 MOTOR ASSÍNCRONO

Os motores assíncronos ou de indução, por serem robustos e mais baratos, são os motores mais largamente empregados na indústria. Nestes motores, o campo girante tem a velocidade síncrona, como nas máquinas síncronas.

Teoricamente, para o motor girando em vazio e sem perdas, o rotor teria também a velocidade síncrona. Entretanto ao ser aplicado o conjugado externo ao motor, o seu rotor diminuirá a velocidade na justa proporção necessária para que a corrente induzida pela diferença de rotação entre o campo girante (síncrono) e o rotor, passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado externamente aplicado.

Este tipo de máquina possui várias características próprias, que são definidas e demonstradas em uma larga gama de obras dedicadas exclusivamente a este assunto. Nesta apostila veremos os princípios e equações básicas necessárias para o desenvolvimento do tema voltado à aplicação de conversores de frequência para a variação de velocidade.

A rotação do eixo do motor é expressa por:

$$n_S = \frac{120 \times f}{2p} \times (1 - s)$$

Onde: n_S = Rotação síncrona (rpm);
f = Frequência (Hz);
$2p$ = Número de pólos;
s = Escorregamento.

Basicamente os motores assíncronos se subdividem em dois tipos principais, os quais são:

1.2.1.2.1 ROTOR GAIOLA

Os motores deste tipo também são comumente chamados de motores de GAIOLA DE ESQUILO, pois seu enrolamento rotórico tem a característica de ser curto-circuitado, assemelhando-se a tal, como mostrado na figura a seguir :

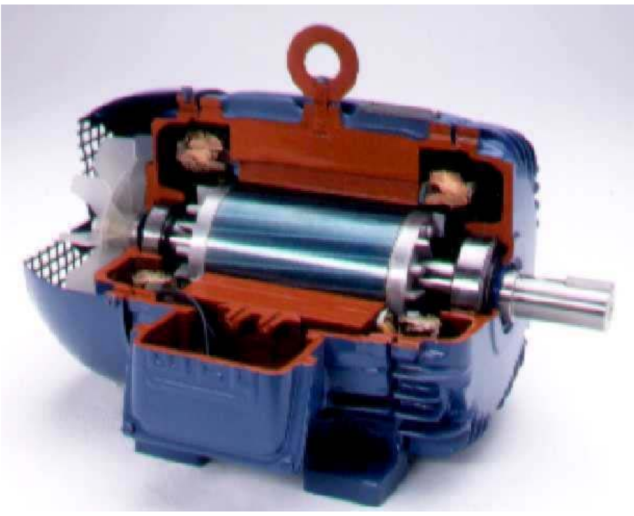


Figura 1.2 – Motor assíncrono de rotor gaiola

1.2.1.2.2 ROTOR BOBINADO

O motor de anéis possui a mesma característica construtiva do motor de indução com relação ao estator, mas o seu rotor é bobinado com um enrolamento trifásico, acessível através de três anéis com escovas coletoras no eixo.

Graças a característica do ajuste da curva de conjugado x rotação em função do aumento da resistência rotórica pela inclusão de resistores externos, são estes motores largamente utilizados no acionamento de sistemas de elevada inércia e nos casos em que o conjugado resistente em baixas rotações seja alto comparativamente ao conjugado nominal.

Por outro lado, para acionamentos com baixa inércia, estes motores podem apresentar correntes de aceleração reduzidas.

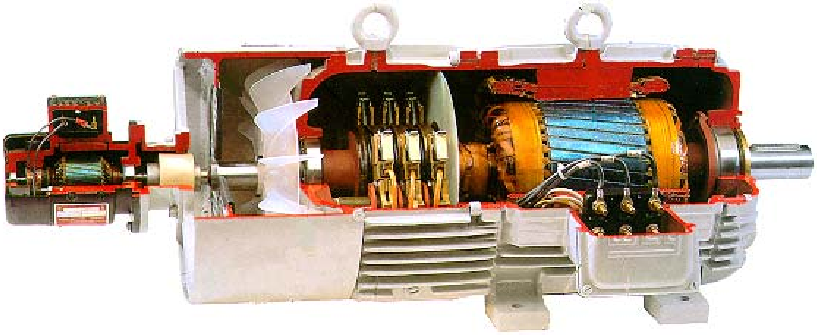


Figura 1.3 – Motor assíncrono de rotor de anéis

1.2.1.3 MOTOR CC

As máquinas de corrente contínua, em função do seu princípio de funcionamento, permitem variar a velocidade de zero até a velocidade nominal aliada com a possibilidade de se ter conjugado constante. Esta característica é de fundamental importância, pois dessa forma torna-se possível fazer o acionamento em várias aplicações que exigem ampla faixa de variação de velocidade com uma ótima regulação e precisão de velocidade.

Sendo um sistema específico e direcionado a aplicações dedicadas, os motores de corrente contínua são dimensionados de forma a ter as suas características definidas especialmente ao acionamento, vindo com isto a acarretar em uma elevação dos custos de produção e ser considerado como uma máquina diferenciada, onde na maior parte das situações é produzida sob encomenda.

O sistema de acionamento por corrente contínua é ainda um sistema largamente utilizado, pois em muitas aplicações é necessário que se tenha uma ótima precisão de velocidade (até 0,01%), principalmente nas aplicações de sincronismo entre vários motores.

Para que isto possa ocorrer, a maioria dos acionamentos CC são realimentados, isto é, possuem no motor CC um tacogerador acoplado ao seu eixo que fornece informação da velocidade do motor com o intuito de melhorar a sua regulação de velocidade.

Outra característica destes motores é que possuem em sua maioria ventilação independente e classe de isolamento melhorada (classe F), para que permitam a sua operação em velocidades reduzidas sem problemas de sobreaquecimento e redução de sua vida útil. A rotação do motor de corrente contínua é expressa por:

$$n = \frac{U_A - (R_A \times I_A)}{k \times \Phi_m}$$

Onde: U_A = Tensão de armadura (Vcc);
I_A = Corrente de armadura (Acc);
R_A = Resistência de armadura;
k = Constante;
Φ_m = Fluxo magnetizante;
n = Rotação (rpm).

Os motores de corrente contínua permitem também a operação com rotações além da rotação nominal, utilizando-se o que se caracteriza por "ENFRAQUECIMENTO DE CAMPO", que é o aumento da rotação através da redução do fluxo magnetizante e conseqüente redução de torque, conforme descrito na região II da figura a seguir:

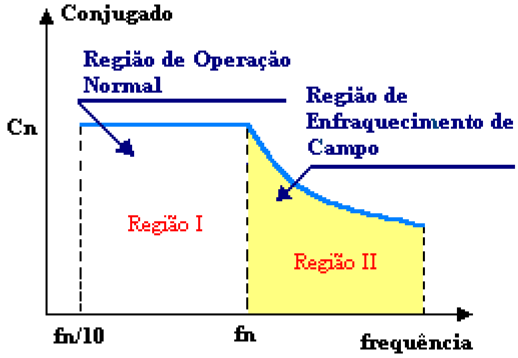


Figura 1.4 - Característica do conjugado x rotação do motor CC

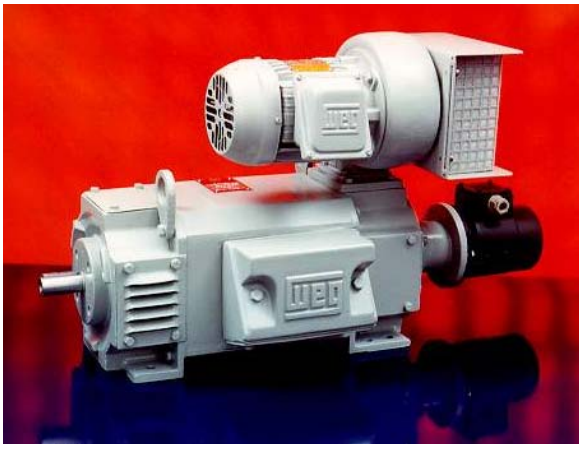


Figura 1.5 – Motor Corrente Contínua

1.2.2 CONCEITOS BÁSICOS

1.2.2.1 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 o produto da força pela distância.

$$C = F \times \ell \qquad (1.2.2.1.1)$$

A unidade utilizada para o conjugado no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Newton.metro (N.m).

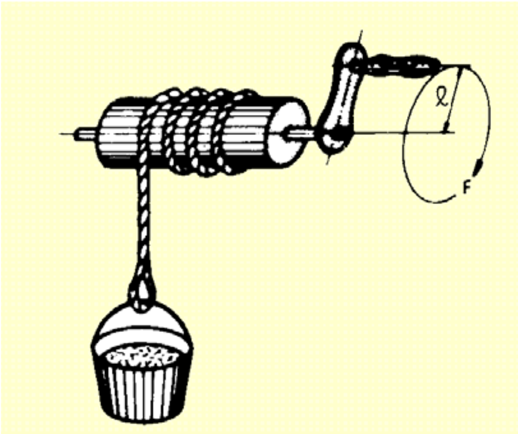


Figura 1.6

Exemplo: Deseja-se levantar um peso por um processo semelhante ao usado em poços, onde, a força F que é preciso aplicar à manivela, depende do comprimento (ℓ) da manivela. Quanto maior for a manivela, menor será a força necessária para suspender o balde. Se o balde pesa 20N e o diâmetro do tambor é 0,20m, a corda transmitirá uma força de 20N na superfície do tambor, isto é, a 0,10m do centro do eixo. Para contrabalançar esta força , precisam de 10N na manivela, se o comprimento ℓ for de 0,20m. Se ℓ for o dobro, isto é, 0,40m, a força F será a metade, ou seja 5N. Neste caso, o conjugado será:

$$C = F \times \ell = 20N \times 0{,}10m = 10N \times 0{,}20m = 5N \times 0{,}40m$$

$$C = 2{,}0N.m$$

1.2.2.2 ENERGIA E POTÊNCIA MECÂNICA

A potência mede a rapidez com que a energia é aplicada ou consumida. Como no exemplo anterior, a energia gasta ou o trabalho realizado para trazer o balde do fundo até a superfície é sempre a mesma, porém a potência exprime a rapidez com que esta energia é aplicável 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 usual para a potência mecânica é o c.v.(cavalo-vapor), equivalente a 736W.

$$W_{mec} = F \times d \qquad \text{(N.m)}$$

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

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

lembrando que, 1N.m = 1J = W.Δt. Para movimentos circulares.

$$C = F \times r \qquad \text{(N.m)}$$

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

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

Onde: C = conjugado em N.m;
F = força em N;
ℓ = braço de alavanca em m;
r = raio da polia em m;
v = velocidade angular em m/s;
d = diâmetro da peça em m;
n = velocidade em rpm.

1.2.2.3 ENERGIA E POTÊNCIA ELÉTRICA

Embora a energia seja uma só, ela pode ser obtida de formas diferentes. Se ligar uma resistência a uma rede elétrica com tensão, passará uma corrente elétrica que irá aquecer a resistência. A resistência absorve 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.

1.2.2.3.1 CIRCUITOS DE CORRENTE CONTÍNUA

A "potência elétrica", em circuitos de corrente contínua, pode ser obtida através da relação da tensão (U), corrente (I) e resistência (R), envolvidas no circuito, ou seja:

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

Onde: U = tensão em volt;
I = corrente em ampères;
R = resistência em ohm;
P = potência média em watt.

1.2.2.3.2 CIRCUITOS DE CORRENTE ALTERNADA

- ***Resistência***

No caso de “resistências”, quanto maior a tensão da rede, maior será a corrente e mais depressa a resistência irá se aquecer. Isto quer dizer que a potência elétrica será maior. A potência elétrica absorvida da rede, no caso da resistência, é calculada multiplicando-se a tensão da rede pela corrente, se a resistência (carga), for monofásica.

$$P = U \times I \qquad \text{(W)}$$

No sistema trifásico a potência em cada fase da carga será $P_f = U_f \times I_f$, como se 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, tem-se as seguintes relações:

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

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

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

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

Obs.: esta expressão vale para a carga formada por resistências, onde não há defasagem da corrente em relação a tensão.

- ***Cargas Reativas***

Para as “cargas reativas”, ou seja, onde existe defasagem, como é o caso dos motores de indução, esta defasagem tem que ser levada em conta e a expressão fica:

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

A unidade de medida usual para potência elétrica é o watt (W), correspondente a 1 volt x 1 ampère, ou seu múltiplo, o quilowatt = 1000 watts. Esta unidade também é utilizada para a medida de potência mecânica.

A unidade de medida usual para energia elétrica é o quilowatt-hora (kWh) correspondente à energia fornecida por uma potência de um quilowatt funcionando durante uma hora – é a unidade que aparece, para cobrança, nas contas de luz.

1.2.2.4 VELOCIDADE NOMINAL

É a velocidade (rpm) do motor funcionando à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. A velocidade nominal depende do escorregamento e da velocidade síncrona.

$$n = n_S \times \left(1 - \frac{s\,\%}{100}\right) \qquad \text{(rpm)}$$

A velocidade síncrona n_S é função do número de pólos e da frequência de alimentação:

$$n_S = \frac{120 \times f}{2p} \qquad \text{(rpm)}$$

1.2.2.5 CORRENTE NOMINAL

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

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

Os valores típicos de corrente, rendimento e fator de potência dos motores WEG de II, IV, VI e VIII pólos, são mostrados nos catálogos.

1.2.2.6 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 a potência real ou “potência ativa” que existiria se não houvesse defasagem da corrente, ou seja, se a carga fosse formada por resistência. Então,

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad \text{(va)} \qquad (1.2.2.6.1)$$

Para as cargas resistivas, $\cos\varphi = 1$ e a potência ativa se confunde com a potência aparente. A unidade de medidas para potência aparente é o volt-ampère (va) ou seu múltiplo, o quilovolt-ampère (kva).

Potência ativa (P):

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

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \quad \text{(W)} \qquad (1.2.2.6.2)$$

ou, $$P = S \times \cos\varphi \quad \text{(W)} \qquad (1.2.2.6.3)$$

Potência reativa (Q):

É a parcela da potência aparente que "não" realiza trabalho. Apenas é transferida e armazenada nos elementos passivos (capacitores e indutores) do circuito.

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \operatorname{sen}\varphi \quad \text{(v.a.r.)} \qquad (1.2.2.6.4)$$

$$Q = S \times \operatorname{sen}\varphi \quad \text{(v.a.r.)} \qquad (1.2.2.6.5)$$

1.2.2.7 POTÊNCIA EQUIVALENTE

Evidentemente um motor elétrico deverá suprir à máquina acionada a potência necessária, sendo recomendável que haja uma margem de folga, pois pequenas sobrecargas poderão ocorrer; ou ainda, 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 freqüentemente necessário na prática, avaliar a solicitação imposta ao motor por um regime mais complexo que aqueles descritos nas normas. Uma forma usual é calcular a potência equivalente pela fórmula:

$$(P_m)^2 = \frac{1}{T}\int_0^T P(t).dt \qquad (1.2.2.7.1)$$

Onde:
- P_m = potência equivalente solicitada ao motor;
- $P(t)$ = potência, variável 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 verdadeiro para motores que giram continuamente, mas são solicitados intermitentemente. Assim:

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2.t_1 + P_2^2.t_2 + P_3^2.t_3 + P_4^2.t_4 + P_5^2.t_5 + P_6^2.t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}} \qquad (1.2.2.7.2)$$

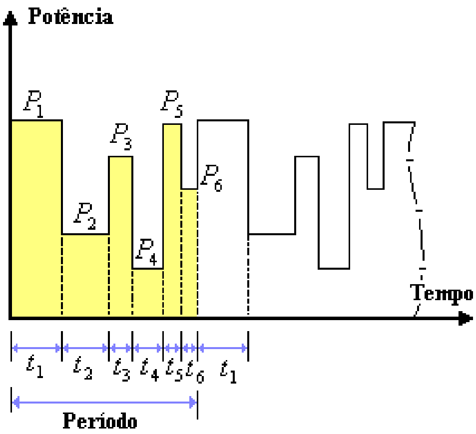


Figura 1.7 – Funcionamento contínuo com solicitações intermitentes

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

$$(P_m)^2 = \frac{\sum\left(P_i^2 . t_i\right)}{\sum\left(t_i + \frac{1}{3} t_r\right)} \qquad (1.2.2.7.3)$$

Onde: t_i = tempo em carga;
t_r = tempo em repouso;
P_i = cargas correspondentes.

$$P_m = \sqrt{\frac{P_1^2 . t_1 + P_3^2 . t_3 + P_5^2 . t_5 + P_6^2 . t_6}{t_1 + t_3 + t_5 + t_6 + \frac{1}{3}\left(t_2 + t_4 + t_7\right)}} \qquad (1.2.2.7.4)$$

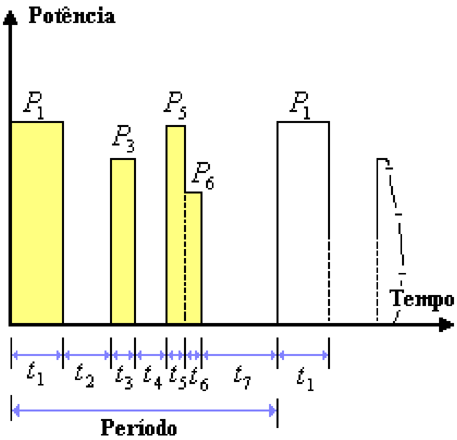


Figura 1.8 – Funcionamento com carga variável e com repouso entre os tempos de carga

1.2.2.8 TRIÂNGULO DE POTÊNCIA

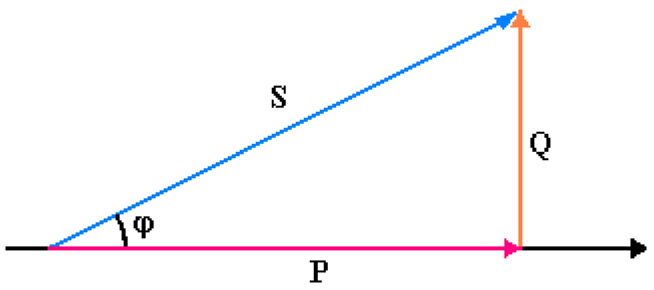


Figura 1.9 – Triângulo de potências

Onde: S = potência aparente;
P = potência ativa;
Q = potência reativa.

1.2.2.9 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência, indicado por cosφ, onde φ é o ângulo de defasagem da tensão em relação à corrente; é a relação entre a potência real (ativa) P e a potência aparente S.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P(W)}{\sqrt{3}\times U\times I} \qquad (1.2.2.9.1)$$

Assim,

- Carga Resistiva: cosφ =1;
- Carga Indutiva: cosφ atrasado;
- Carga Capacitiva: cosφ adiantado.

Os termos, atrasado e adiantado, referem-se à fase da corrente em relação à fase da tensão.

1.2.2.10 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. Chamado potência útil (Pu), a potência mecânica disponível no eixo e, potência absorvida (Pa), a potência elétrica que o motor retira da rede, o rendimento será a relação entre as duas, ou seja:

$$\eta\% = \frac{Pu(W)}{Pa(W)}\times 100 = \frac{P(W)}{\sqrt{3}.U.I.\cos\varphi}\times 100 = \frac{736.P(c.v)}{\sqrt{3}.U.I.\cos\varphi}\times 100 \qquad (1.2.2.10.1)$$

1.2.2.10.1 IMPORTÂNCIA DO RENDIMENTO

É importante que o motor tenha um rendimento alto, por dois motivos:

- Primeiro, porque, um rendimento alto significa perdas baixas e, portanto, um menor aquecimento do motor;
- Segundo, porque, quanto maior o rendimento, menor a potência absorvida da linha, e, portanto, menor o custo da energia elétrica paga nas contas mensais. O rendimento varia com a carga do motor. Os catálogos dos motores WEG, indicam os valores típicos do rendimento em função da carga. Estes valores são representados genericamente na figura 1.10.

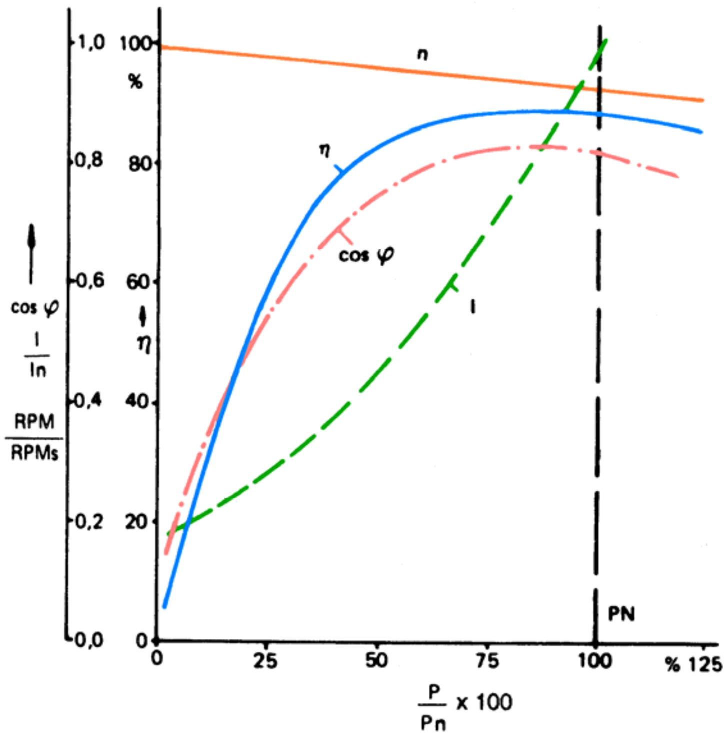


Figura 1.10 – Curvas características típicas de motores de indução trifásicos

Onde:

I	– corrente;
I_n	– corrente nominal;
P	– potência;
P_n	– potência nominal;
rpm	– rotação;
rpms	– rotação síncrona;
η	– rendimento;
cos φ	– fator de potência.

1.2.2.11 RELAÇÃO ENTRE UNIDADES DE POTÊNCIA

$$P(kW) = 0{,}736.P(c.v) \qquad P(c.v) = 1{,}359.P(kW)$$

1.2.2.12 RELAÇÃO ENTRE CONJUGADO E POTÊNCIA

Quando a energia mecânica é aplicada sob a forma de movimento rotativo, a potência desenvolvida depende do conjugado C e da velocidade de rotação n. As relações são:

$$P(c.v) = \frac{C(kgfm) \times n(rpm)}{716} = \frac{C(Nm) \times n(rpm)}{7024}$$

$$P(kW) = \frac{C(kgfm) \times n(rpm)}{974} = \frac{C(Nm) \times n(rpm)}{9555}$$

Inversamente:

$$C(kgfm) = \frac{716 \times P(c.v)}{n(rpm)} = \frac{974 \times P(kW)}{n(rpm)}$$

$$C(Nm) = \frac{7024 \times P(c.v)}{n(rpm)} = \frac{9555 \times P(kW)}{n(rpm)}$$

1.2.2.13 SISTEMAS DE CORRENTE ALTERNADA MONOFÁSICA

1.2.2.13.1 GENERALIDADES

A corrente alternada caracteriza-se pelo fato de que a tensão (voltagem), em vez de permanecer fixa, como entre os pólos de uma bateria, varia com o tempo, mudando de sentido alternadamente, donde o seu nome. No sistema monofásico uma tensão alternada U (volt) é gerada e aplicada entre dois fios, aos quais se liga a carga, que absorve uma corrente I (ampère).

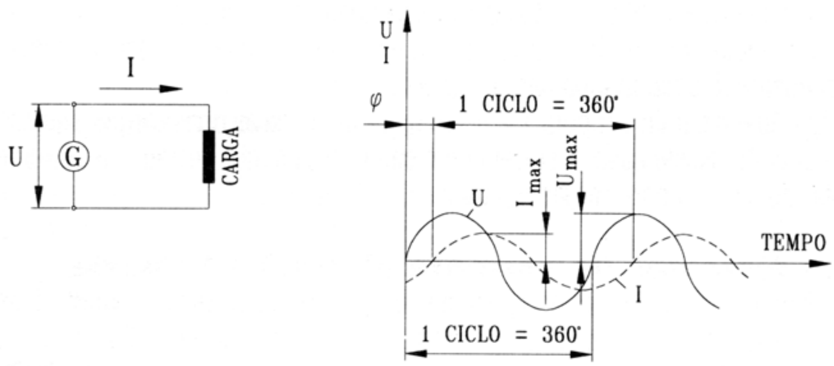


Figura 1.11

Representando em um gráfico os valores de U e I, a cada instante, vamos obter a figura 1.11, estão também indicadas algumas grandezas que serão definidas em seguida. Note que as ondas de tensão e de corrente não estão em fase, isto é, não passam pelo valor zero ao mesmo tempo, embora tenha a mesma frequência, isto acontece para muitos tipos de carga, por exemplo, enrolamentos de motores (cargas reativas).

- **Frequência:** É o número de vezes por segundo que a tensão muda de sentido e volta a condição inicial. É expressa em ciclos por segundo ou hertz, simbolizada por Hz;
- **Tensão Máxima ($U_{máx}$):** É o valor de pico da tensão, ou seja, o maior valor instantâneo atingido pela tensão durante um ciclo (este valor é atingido duas vezes por ciclo, uma vez positivo e uma vez negativo).
- **Corrente Máxima ($I_{máx}$):** É o valor de pico da corrente;
- **Valor eficaz de tensão e corrente (U e I):** É o valor da tensão e corrente contínuas que desenvolvem potência correspondente àquela desenvolvida pela corrente alternada. Pode-se demonstrar que o valor eficaz vale:

$$U = \frac{U_{máx}}{\sqrt{2}} \qquad \text{e} \qquad I = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$$

Exemplo: Quando se liga uma resistência a um circuito de corrente alternada ($\cos\varphi = 1$) com $U_{máx}$= 311 volts e $I_{máx}$= 14,14 ampères, a potência desenvolvida será:

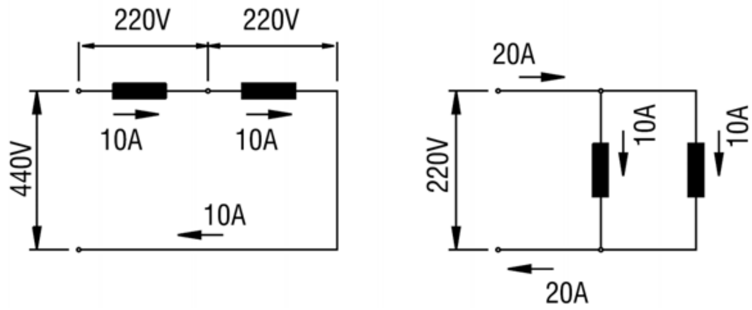
$$P = U.I.\cos\varphi = \frac{1}{2}.U_{máx}.I_{máx}.\cos\varphi$$

$$P = 2200 \text{ watts}$$

Obs.: Na linguagem normal quando se fala em tensão e corrente, por exemplo, 220 volts ou 10 ampères, sem especificar mais nada, referem-se a valores eficazes da tensão ou da corrente, que são empregados na prática.

- **Defasagem (φ):** É o atraso da onda da corrente em relação a onda da tensão. Em vez de ser medido em tempo (segundos), este atraso é geralmente medido em ângulo (grau) correspondente à fração de um ciclo completo, considerando 1 ciclo = 360°. Mas comumente a defasagem é expressa pelo coseno do ângulo.

1.2.2.13.2 LIGAÇÕES EM SÉRIE E PARALELO



(a) (b)

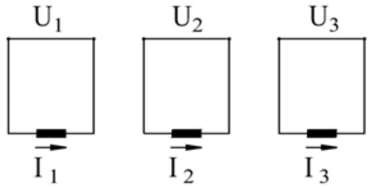
Figura 1.12 – (a) ligação em série, (b) ligação em paralelo

Se ligar duas cargas iguais a um sistema monofásico, esta ligação pode ser feita de dois modos:

- Ligação em série (figura 1.12 – (a)), em que duas cargas são atravessadas pela corrente total do circuito. Neste caso, a tensão em cada carga será a metade da tensão do circuito para cargas iguais;
- Ligação em paralelo (figura 1.12 – (b)), em que é aplicada às duas cargas a tensão do circuito. Neste caso, a corrente em cada carga será a metade da corrente total do circuito para cargas iguais.

1.2.3 SISTEMAS DE CORRENTE ALTERNADA TRIFÁSICA

O sistema trifásico é formado pela associação de três sistemas monofásicos de tensões U_1, U_2 e U_3 tais que a defasagem entre elas seja de 120°, ou seja, os “atrasos” de U_2 em relação a U_1, de U_3 em relação a U_2 e de U_1 em relação a U_3 sejam iguais a 120° (considerando um ciclo completo = 360°). O sistema é equilibrado, isto é, as três tensões têm o mesmo valor eficaz $U_1 = U_2 = U_3$ conforme figura 1.13:



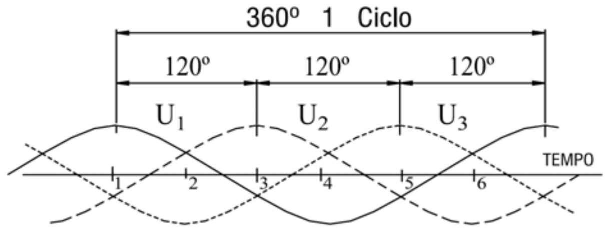


Figura 1.13

Ligando entre si os três sistemas monofásicos e eliminando os fios desnecessários, tem-se um sistema trifásico: três tensões U_1, U_2 e U_3 equilibradas, defasadas entre si de 120° e aplicadas entre os três fios do sistema. A ligação pode ser feita de duas maneiras, representadas nos esquemas seguintes. Nestes esquemas costuma-se representar as tensões com setas inclinadas ou valores girantes, mantendo entre si o ângulo correspondente à defasagem (120°).

1.2.3.1 LIGAÇÃO TRIÂNGULO

Ligando-se os três sistemas monofásicos entre si, como indica a figura abaixo, pode-se eliminar três fios, deixando apenas um em cada ponto de ligação, e o sistema trifásico ficará reduzido a três fios L_1, L_2 e L_3.

Tensão de linha (U): É a tensão nominal do sistema trifásico aplicada entre dois quaisquer dos três fios L_1, L_2 e L_3.

Corrente de linha (I_L): É a corrente em qualquer um dos três fios L_1, L_2, e L_3.

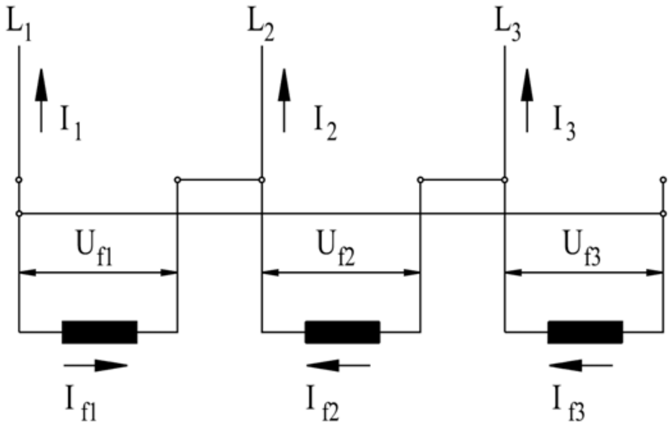


Figura 1.14 – ligação triângulo.

Tensão e corrente de fase (U_1 e I_1): É a tensão e corrente de cada um dos três sistemas monofásicos considerados.

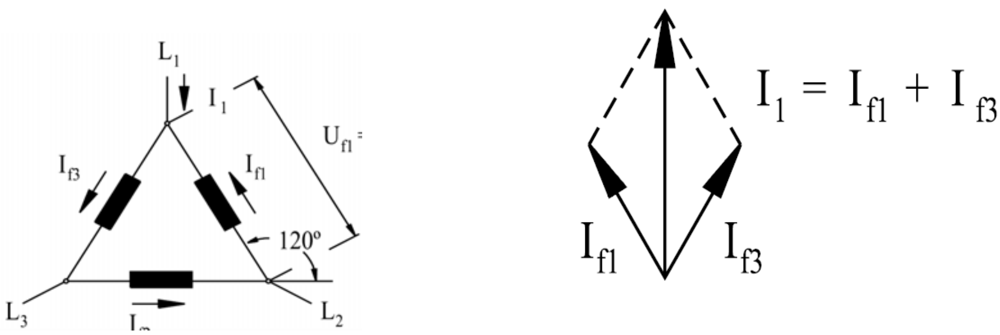


Figura 1.15 – ligação triângulo.

Examinando o esquema da figura, vê-se que:

$$U_1 = U_f$$

$$I_1 = \sqrt{3}.I_f = 1{,}732.I_f$$

Exemplo: Tem-se um sistema equilibrado de tensão nominal 220 volts. A corrente de linha medida é 10 ampères. Ligando a este sistema uma carga trifásica composta de três cargas iguais em triângulo, qual a tensão e a corrente em cada uma das cargas?

Tem-se $U_1 = U_f$ = 220 volts em cada uma das cargas.

Se $I_1 = 1{,}732.I_f$, tem-se $I_f = 0{,}577 I_1$ = 0,577 x 10 = 5,77 ampères em cada uma das cargas.

1.2.3.2 LIGAÇÃO ESTRELA

Ligando um dos fios de cada sistema monofásico a um ponto comum aos três, os três fios restantes formam um sistema trifásico em estrela. Às vezes, o sistema trifásico em estrela é "a quatro fios", ou "com neutro". O quarto fio é ligado ao ponto comum às três fases. A tensão de linha ou tensão nominal do sistema trifásico e a corrente de linha, são definidas do mesmo modo que na ligação triângulo.

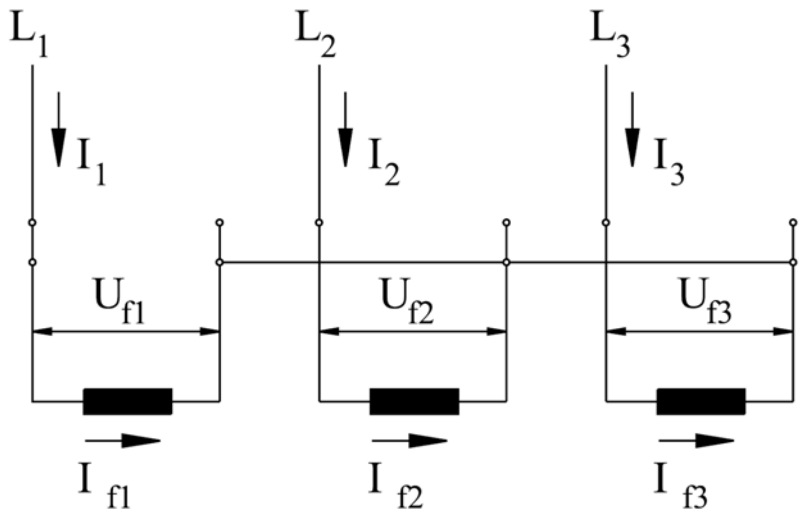


Figura 1.16 – Ligação estrela

Quando se liga uma carga trifásica em estrela, e a potência das cargas em cada fase for igual, não há necessidade de se ligar o ponto central (comum) ao neutro, pois não irá circular corrente alguma por este ponto, neste caso tem-se um sistema equilibrado.

Caso as potências forem diferentes deve-se ligar o ponto central ao neutro, pois do contrário ficariam tensões diferentes em cima de cada carga e teríamos um sistema desequilibrado.

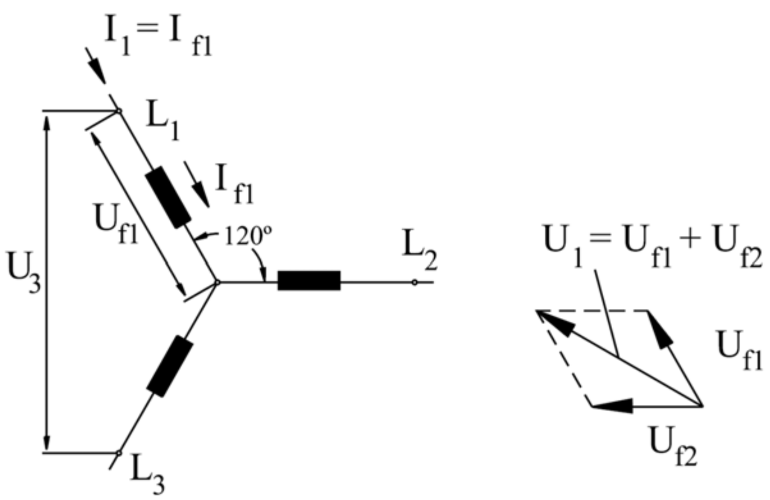


Figura 1.17 – Ligação estrela

Examinando o esquema da figura acima vê-se que:

$$I_1 = I_f$$

$$U_1 = \sqrt{3}.U_f = 1{,}732.U_f$$

Exemplo: Tem-se uma carga trifásica composta de três cargas iguais; cada carga é feita para ser ligada a uma tensão de 220 volts, absorvendo 5,77 ampères. Qual a tensão nominal do sistema trifásico que alimenta esta carga em suas condições normais (220 volts e 5,77 ampères)? Qual a corrente de linha?

Tem-se U_f = 220 volts (normal de cada carga);
U_l = 1,732 x 220 = 380 volts
$I_l = I_f$ = 5,77 ampères

1.2.4 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

1.2.4.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente.

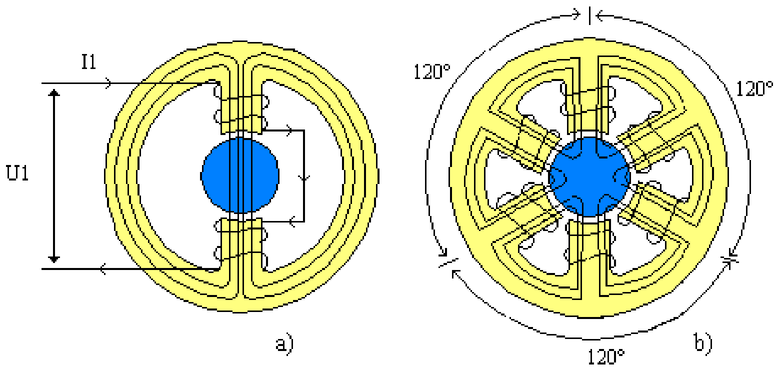


Figura 1.18

- Na figura (a) é indicado um "enrolamento monofásico" atravessado por uma corrente I, e o campo H é criado por ela; o enrolamento é constituído de um par de pólos (um pólo "norte" e um pólo "sul"), cujos efeitos se somam para estabelecer o campo H. O fluxo magnético atravessa o rotor entre os dois pólos e se fecha através do núcleo do estator. Se a corrente I é alternada, o campo H também é, e o seu valor a cada instante será representado pelo mesmo gráfico da figura 1.11, inclusive invertendo o sentido a cada ciclo. O campo H é "pulsante", pois, sua intensidade "varia" proporcionalmente à corrente, sempre na "mesma" direção norte-sul.

- Na figura (b) é indicado um "enrolamento trifásico", que é transformado por três monofásicos espaçados entre si de 120°. Se este enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes I_1, I_2 e I_3 criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos H_1, H_2 e H_3. Estes campos são espaçados entre si de 120° . Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, serão defasados no tempo, também de 120° entre si e podem ser representados por um gráfico igual ao da figura 1.19. O campo total H resultante, a cada instante, será igual à soma gráfica dos três campos H_1, H_2 e H_3 naquele instante.

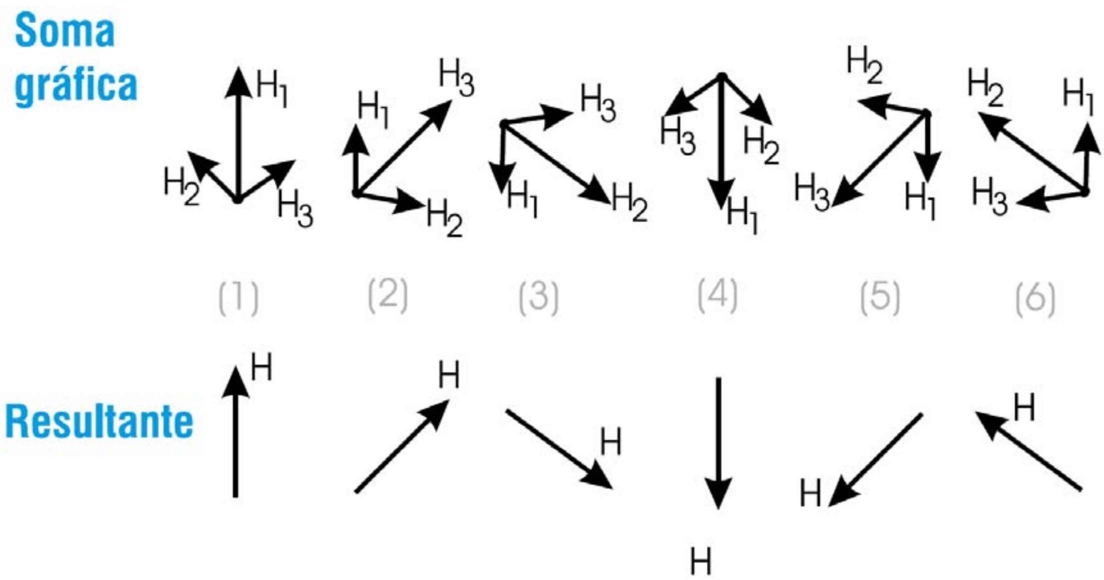


Figura 1.19 – Soma gráfica dos campos para seis instantes sucessivos

No instante (1), a figura 1.19 mostra que o campo H_1 é máximo e os campos H_2 e H_3 são negativos e de mesmo valor, iguais a 0,5. Os três campos são representados na figura 1.19 (1), parte superior, levando em conta que o campo negativo é representado por uma seta de sentido oposto ao que seria normal; o campo resultante (soma gráfica) é mostrado na parte inferior da figura 1.19, tendo a mesma direção do enrolamento da fase 1. Repetindo a construção para os pontos 2, 3, 4, 5 e 6 da figura 1.19, observa-se que o campo resultante H tem intensidade "constante", porém sua direção vai "girando", completando uma volta no fim de um ciclo.

Assim, quando um enrolamento trifásico é alimentado por correntes trifásicas, cria-se um "campo girante", como se houvesse um único par de pólos girantes, de intensidade constante. Este campo girante, criado pelo enrolamento trifásico do estator, induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo cortam as barras do rotor) as quais geram correntes, e consequentemente, um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo girante. Como campos opostos se atraem e como o campo do estator (campo girante) é rotativo, o rotor tende a acompanhar a rotação deste campo. Desenvolve-se então, no rotor, um conjugado motor que faz com que ele gire, acionando a carga.

1.2.4.2 VELOCIDADE SÍNCRONA (n_S)

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de pólos (2p) do motor e da frequência (f) da rede, em hertz.

Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de pólos, que se distribuem alternadamente (um "norte" e um "sul") ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um par de pólos (p) a cada ciclo. Assim, como o enrolamento tem pólos ou p pares de pólos, a velocidade do campo será:

$$n_S = \frac{60 \times f}{p} = \frac{120 \times f}{2p} \quad \text{(rpm)} \qquad (1.2.4.2.1)$$

Exemplo: Qual a rotação síncrona de um motor de 6 pólos, 50Hz?

$$n_S = \frac{120 \times f}{2p} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000\, rpm$$

Note que o número de pólos do motor terá que ser sempre par, para formar os pares de pólos. Para as frequências e "polaridades" usuais, as velocidades síncronas são:

Nº de pólos	**Rotação síncrona por minuto**	
	60 Hz	**50Hz**
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750

Tabela 1.2.4.2.1 – Velocidades síncronas para os diferentes números de pólos

Para motores de "dois pólos", o campo percorre uma volta a cada ciclo. Assim, os graus elétricos equivalem aos graus mecânicos. Para motores com mais de dois pólos, tem-se, de acordo com o número de pólos, um giro "geométrico" menor, sendo inversamente proporcional a 360° em dois pólos.

Por exemplo: Para um motor de seis pólos tem-se, em um ciclo completo, um giro do campo de $\frac{360^o \times 2}{6} = 120^o$ geométricos. Isto equivale, logicamente, a 1/3 da velocidade em dois pólos. Conclui-se, assim, que:

Graus geométricos = Graus mecânicos* x *p

1.2.4.3 ESCORREGAMENTO (s)

Em um motor elétrico assíncrono, o rotor sempre irá girar com rotação abaixo da rotação do campo girante e, portanto, haverá corrente e torque (conjugado eletromecânico) induzidos. A diferença relativa entre as velocidades do rotor e do fluxo do estator (síncrona) é conhecida como "escorregamento" e é representada por:

$$s_{\%} = \frac{n_S - n}{n_S} \times 100$$

Onde:
- n_S = Velocidade síncrona (rpm);
- n = Velocidade rotórica (rpm);
- s = Escorregamento.

Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona (rotação do campo girante), o enrolamento do rotor corta as linhas de força magnéticas do campo girante e, pelas leis do eletromagnetismo, circularão nele correntes induzidas. Quanto maior a carga, maior terá que ser o conjugado necessário para acioná-la. Para obter um maior conjugado, proporcionalmente terá que ser maior a diferença de velocidades entre rotor e o campo girante no estator para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Portanto, à medida que a carga aumenta, cai a rotação do motor. Quando a carga for zero (motor a vazio) o rotor irá girar praticamente na rotação síncrona.

A frequência da corrente induzida no rotor é igual ao escorregamento vezes a frequência do estator. Ou seja:

$$f_2 = s \times f_1$$

Onde: f_1 = Frequência da corrente estatórica (Hz);
f_2 = Frequência da corrente rotórica (Hz).

A vazio o escorregamento é muito pequeno, portanto, como no rotor, sua reatância e sua f.e.m. induzida são todas muito pequenas. Assim, a corrente do rotor é reduzida, apenas suficiente para produzir o torque necessário a vazio. O fator de potência é extremamente baixo e em atraso, com cos $\varphi < 0,3$, pois a corrente que circula pelo motor é utilizada apenas para a sua magnetização.

Quando uma carga mecânica é aplicada ao rotor, a velocidade decresce um pouco. O pequeno decréscimo na velocidade causa um aumento no escorregamento, na frequência da corrente rotórica, na sua reatância e na sua força eletromotriz induzida. O aumento da corrente induzida no rotor reflete-se num aumento da corrente primária do estator (componente esta que produz potência). Uma corrente maior será produzida no estator, com um melhor fator de potência, tendendo a produzir mais potência mecânica e solicitar mais potência da linha. À plena carga o motor de indução irá girar a um escorregamento que promove o equilíbrio entre o torque desenvolvido pelo motor e o torque resistente da carga.

O fator de potência a plena carga varia de 0,8 (em pequenos motores de aproximadamente 1 cv) a aproximadamente 0,95 (nos grandes motores, acima de 150 cv). Em primeira análise pode parecer que aumentos além da plena carga produzirão melhoria no fator de potência, e aumento na corrente de fase do estator. Porém, com o aumento da carga e do escorregamento, a frequência da corrente rotórica continua a aumentar e o aumento na reatância do rotor produz uma diminuição no fator de potência do mesmo. Portanto, com cargas acima da plena carga, o fator de potência aproxima-se de um máximo e então decresce rapidamente.

1.2.4.4 EQUACIONAMENTO

1.2.4.4.1 CIRCUITO EQUIVALENTE

Nas situações em que o escorregamento é diferente de 0 e 1, haverá f.e.m. induzida no secundário e, consequentemente haverá conversão eletromecânica com potência em jogo, onde tem-se então um circuito equivalente com os parâmetros e variáveis para o primário e para o secundário:

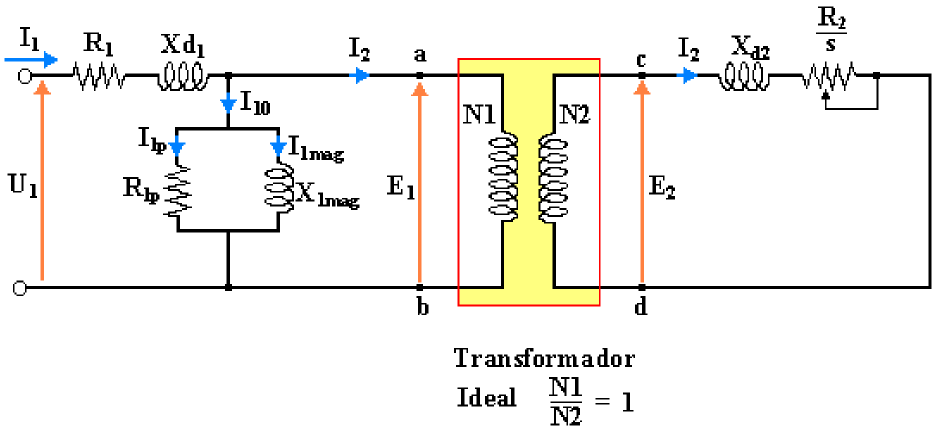


Figura 1.20 – Circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona com escorregamento s, com secundário (rotor) não referido ao primário (estator).

Onde: R_1 = Resistência estatórica;
X_{d1} = Reatância estatórica;
R_2 = Resistência rotórica;
X_{d2} = Reatância rotórica;
X_{1mag} = Reatância de magnetização;
R_{1p} = Resistência de perdas;
E_2 = f.e.m. rotórica.

U_1 = Tensão estatórica;
I_1 = Corrente estatórica;
I_{1p} = Corrente de perdas;
I_{1mag} = Corrente de magnetização;
I_2 = Corrente rotórica;
E_1 = f.c.e.m. estatórica;

1.2.4.4.2 FORÇA ELETROMOTRIZ E CORRENTE INDUZIDA

Considere a máquina com um escorregamento não nulo. Haverá indução de f.e.m. no rotor e ela pode ser definida em função do escorregamento. Com o rotor parado, o campo rotativo estatórico gira com a mesma velocidade relativamente aos enrolamentos do rotor e estator, induzindo no rotor, f.e.m. proporcionais à frequência f_1 (frequência da corrente estatórica).

Pela teoria, para motor com rotor bloqueado, tem-se que as tensões induzidas no rotor (f.e.m) e no estator (f.c.e.m) são dadas respectivamente por:

$$E_1 = 4{,}44.f_1.N1.\Phi_m.k_{e1}$$

$$E_2 = 4{,}44.f_2.N2.\Phi_m.k_{e2}$$

Onde: E_1 = Força contra eletromotriz induzida no estator;
E_2 = Força eletromotriz induzida no rotor;
k_{e1} e k_{e2} = Fator de enrolamento do estator e rotor, respectivamente;
N_1 e N_2 = Número de espiras do estator e rotor, respectivamente;
Φ_m = Fluxo de magnetização;
$f_2 = f_1$ para rotor bloqueado.

Na presença de escorregamento tem-se:

$$f_2 = s \times f_1$$

Portanto:

$$E_{2s} = 4{,}44.s.f_1.N2.\Phi_m.k_{e2} \cong s.E_2$$

Esta equação pode ser simplificada, para um estudo mais aproximado da máquina, por:

$$\Phi_m \approx \frac{E_1}{f_1}$$

Que determina sucintamente a relação do fluxo de magnetização entre rotor e estator com a tensão e a frequência aplicada na máquina (estatórica), frequência esta que está relacionada com a rotação no eixo da máquina, não considerando o escorregamento existente entre rotor e estator.

1.2.4.4.3 CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO

A interação entre a corrente do rotor e o fluxo produzido por cada pólo unitário do campo magnético girante que concatena o condutor do rotor, resulta o conjugado motor, o qual é dado por:

$$C = k.\Phi_m.I_{2s}.\cos\varphi_{2s}$$

Onde: k = Constante de conjugado para o número de pólos, o enrolamento, as unidades empregadas, etc.;
$\cos\varphi_{2s}$ = Fator de potência do circuito rotórico;
Φ_m = Fluxo de magnetização;
I_{2s} = Corrente rotórica.

Da mesma forma, para um estudo mais aproximado da máquina, esta equação poderá ser simplificada por:

$$C \approx \Phi_m.I_{2s}$$

Que determina a relação existente entre o torque desenvolvido (solicitado) pela máquina, o fluxo de magnetização entre rotor e estator e a corrente induzida rotórica, que é dada por:

$$I_{2s} = \frac{s \times E_2}{\sqrt{R_2^2 + SX_{d2}^2}} = \frac{s \times E_2}{Z_{2s}}$$

Onde: Z_{2s} = Impedância rotórica;
E_2 = Força eletromotriz induzida no rotor;
s = Escorregamento.

Nota-se então que o conjugado desenvolvido é função do escorregamento, isto é, com o aumento da carga aplicada à máquina, aumenta-se o escorregamento e consequentemente o torque desenvolvido. Esta relação apresenta um limite, com o qual se consegue obter o conjugado máximo, e a partir do qual, aumentando-se o escorregamento aumenta-se a impedância rotórica diminuindo-se o conjugado, conforme descrito no item a seguir.

1.2.4.4.4 CONJUGADO DE PARTIDA

Do desenvolvimento do modelo matemático da máquina assíncrona, demonstra-se que o conjugado é descrito por:

$$C_p = k.E_1^2.\left(\frac{R_2}{R_2^2 + X_{d2}^2}\right)$$

Onde: C_p = Conjugado de partida;
k = Constante de conjugado para o número de pólos, o enrolamento, as unidades empregadas, etc.;
E_1 = Tensão estatórica;
R_2 = Resistência rotórica;
X_{d2} = Reatância rotórica.

Da equação acima pode-se fazer as seguintes considerações:

- No instante da partida, o conjugado não é afetado pela natureza da carga aplicada;
- Desde que para um dado motor de indução tipo gaiola a resistência efetiva do rotor e a reatância de rotor bloqueado sejam constantes, a expressão pode ser escrita por:

$$C_p = k' \times E_1^2$$

Ou seja, o torque de partida é apenas função da tensão aplicada ao enrolamento do estator. Ao reduzir-se a tensão nominal, também se reduzirá a corrente secundária e a primária. Este processo de diminuição da corrente de partida é bastante utilizado nos médios e grandes motores do tipo gaiola, nos casos onde a acentuada redução do conjugado de partida não comprometa o acionamento da carga.

1.2.4.4.5 DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIAS E PERDAS

No caso de um acionamento em que a potência solicitada ao motor permanece constante ao longo do tempo, a determinação da potência é relativamente simples, conhecidos o conjugado resistente da carga e a rotação de funcionamento, tem-se:

$$P = \frac{C \times n}{k}$$

É importante ter em mente que a potência solicitada ao motor é definida pelas características da carga, isto é, independentemente da potência nominal do motor.

A potência transmitida à carga pelo eixo do motor é menor que a potência absorvida da rede, devido às perdas no motor. Essas perdas podem ser classificadas em:

- Perdas joule no enrolamento estatórico (perdas no cobre);
- Perdas joule no enrolamento (ou gaiola) rotórico;
- Perdas por atrito e ventilação;
- Perdas magnéticas no núcleo (perdas no ferro).

A figura a seguir representa a distribuição destas perdas:

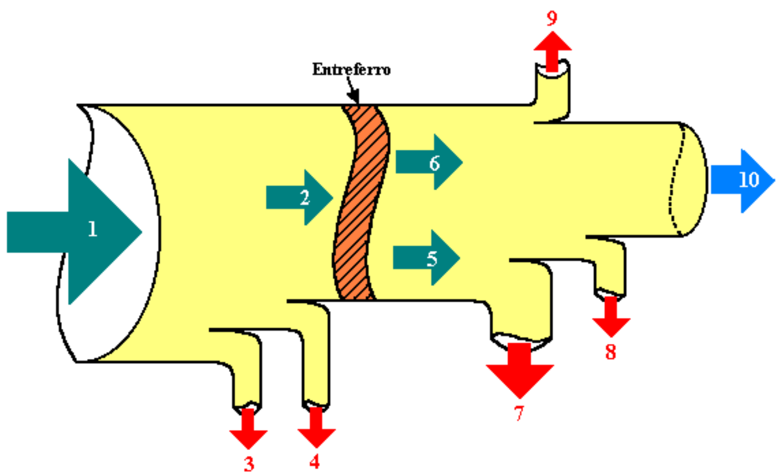


Figura 1.21 – Distribuição da potência e de perdas em máquinas assíncronas.

Onde:

(1) Potência aparente elétrica da rede [(1) = (2)+(3)+(4)];
(2) Potência aparente elétrica do estator a ser transferida ao rotor [$E_1.I_2' = E_2.I_2$];
(3) Perdas primárias (estator) no ferro;
(4) Perdas primárias (estator) no cobre;
(5) Potência aparente elétrica no rotor [$sE_2.I_2$]→ perdas devido ao escorregamento;
(6) Potência mecânica no eixo [$(1- s).E_2.I_2$];
(7) Potência elétrica no rotor que pode ser recuperável, no caso do rotor estar ligado a uma rede externa por meio de anéis;
(8) Perdas elétricas dissipadas no rotor;
(9) Perdas por atrito e ventilação;
(10) Potência resultante no eixo [potência mecânica (6) - perdas por atrito e ventilação (9)];

Para o caso de acionamento de um motor de indução por conversor de frequência, a forma de onda da corrente produzida pelos conversores não é perfeitamente senoidal, pois contém harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem. Portanto as perdas nos motores são maiores.

Além disso, para operações acima da frequência nominal (50 ou 60 Hz), haverá uma redução adicional de conjugado, a qual se deve ao aumento das perdas no ferro do motor.

Para utilização de motores em frequências superiores à nominal devem, portanto ser considerados o aumento das perdas no ferro e também as velocidades limites, função da força centrífuga nos enrolamentos rotóricos e outras partes mecânicas, como por exemplo, esforço adicional nos rolamentos devido ao desbalanceamento do rotor bem como a velocidade limite do mesmo.

1.2.5 DEFINIÇÕES DE TERMOS TÉCNICOS USUAIS

- ***Frequência***: é o número de vezes por segundo que a tensão muda de sentido e volta à condição inicial. É expressa em "ciclos por segundo" ou "Hertz", simbolizada por Hz.
- ***Tensão Máxima ($U_{máx}$)***: é o valor "de pico" da tensão, ou seja, o maior valor instantâneo atingido pela tensão durante um ciclo (este valor é atingido duas vezes por ciclo, uma vez positivo e uma vez negativo).
- ***Corrente Máxima ($I_{máx}$)***: é o valor "de pico" da corrente.
- ***Valor eficaz de Tensão e Corrente (U_{ef} e I_{ef})***: é o valor da tensão e corrente contínuas que desenvolvem potência correspondente a desenvolvida pela corrente alternada. Pode-se demonstrar que o valor eficaz vale:

$$U_{ef} = \frac{U_{máx}}{\sqrt{2}} \qquad \text{e} \qquad I_{ef} = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$$

- ***Defasagem (ϕ)***: é o "atraso" da onda de corrente em relação a onda da tensão. Em vez de ser medido em tempo (segundos), este atraso é geralmente medido em ângulo (graus) correspondente a fração de um ciclo completo, considerando 1 ciclo = 360°. A defasagem é freqüentemente expressa pelo coseno do ângulo.