

# Atuadores

## Aula 03 - Máquinas Elétricas: Motores Assíncronos

# Apresentação

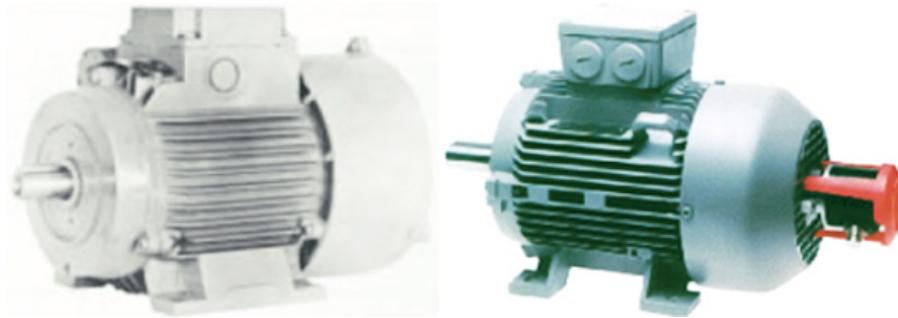
Nesta aula, daremos continuidade ao estudo dos motores elétricos, iniciando a apresentação das máquinas de corrente alternada trifásicas; começando o estudo com as máquinas assíncronas, também conhecidas como máquinas de indução, umas das máquinas mais utilizadas industrialmente pela simplicidade na construção e fácil manutenção.

## Objetivos

- Descrever as características de um motor de corrente alternada assíncrono.
- Mostrar o comportamento deste motor a partir das equações básicas de funcionamento.
- Mostrar descrição, vantagens e desvantagens do motor assíncrono.

# Motor de Indução Trifásico

O motor elétrico mais utilizado, em termos globais, é o motor assíncrono trifásico, mais conhecido como motor de indução. (Figura 1)



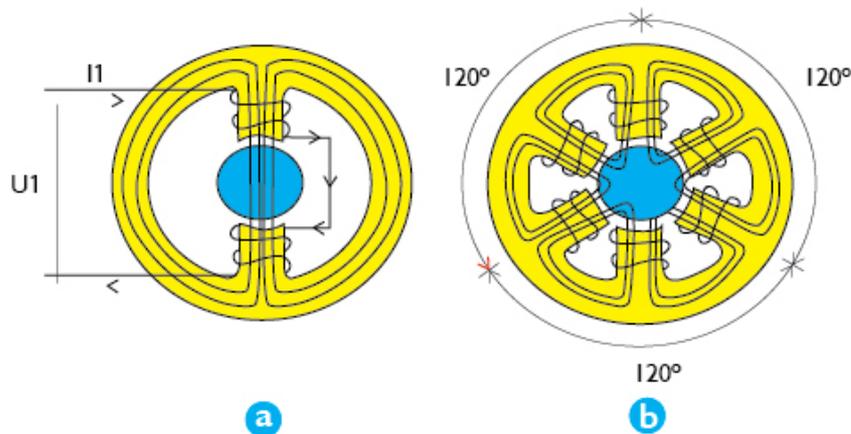
**Figura 1** - Motores de indução.  
**Fonte:** Fitzgerald; Kingsley e Umans (2006).

O termo assíncrono é utilizado, pois a velocidade de rotação do rotor não é igual à velocidade de rotação do campo girante criado pelo estator, isto é, o movimento do rotor não é síncrono com o movimento do campo girante do estator. Por outro lado, o termo indução utiliza-se, pois o movimento de rotação do rotor é o resultado do aparecimento de força eletromotriz (f.e.m.) induzida no rotor.

## 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.

Na figura 2(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 polos (um polo "norte" e um polo "sul"), cujos efeitos se somam para estabelecer o campo  $H$ . O fluxo magnético atravessa o rotor entre os dois polos e se fecha através do núcleo do estator. Se a corrente  $I$  é alternada, o campo  $H$  também é. O campo  $H$  é "pulsante", pois sua intensidade "varia" proporcionalmente à corrente, sempre na "mesma" direção norte-sul.



**Figura 2** - (a) Estator monofásico; (b) Estator trifásico.

**Fonte:** Fitzgerald; Kingsley e Umans (2006).

Na figura 2(b), é indicado um "enrolamento trifásico", que é transformado por três monofásicos espaçados entre si de  $120^\circ$ . Se esse enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos  $F_a$ ,  $F_b$  e  $F_c$ . Estes campos são espaçados entre si de  $120^\circ$ . Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, serão defasados no tempo, também de  $120^\circ$  entre si e podem ser representados por um gráfico igual ao da figura 2. O campo total  $F_m$  resultante, a cada instante, será igual à soma gráfica dos três campos  $F_a$ ,  $F_b$  e  $F_c$  naquele instante.

No instante (1), a figura 3 mostra que o campo  $F_a$  é máximo e os campos  $F_b$  e  $F_c$  são negativos e de mesmo valor, iguais a 0,5. Os três campos são representados na figura 3 (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 3, tendo a mesma direção do enrolamento da fase a. Repetindo a construção para os pontos 2, 3, 4, 5 e 6 da figura 3, observa-se que o campo resultante  $F_m$  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 polos girantes, de intensidade constante. Esse 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, conseqüentemente, um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo



## Velocidade Síncrona (nS)

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de polos ( $p$ ) do motor e da frequência ( $f$ ) da rede, em hertz. Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente (um "norte" e um "sul") ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um par de polos ( $p$ ) a cada ciclo. Assim, como o enrolamento tem polos ou  $p$  pares de polos, a velocidade do campo será:

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

Por exemplo, a rotação síncrona de um motor de 6 polos alimentado a 50 Hz é:

$$n_s = \frac{120 \times f}{2p} = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 (rpm)$$

Para motores de "dois polos", o campo percorre uma volta a cada ciclo. Assim, os graus elétricos equivalem aos graus mecânicos. Para motores com mais de dois polos, tem-se, de acordo com o número de polos, um giro "geométrico" menor, sendo inversamente proporcional a  $360^\circ$  em dois polos. Por exemplo: para um motor de seis polos tem-se, em um ciclo completo, um giro do campo de  $\frac{360 \times 2}{6} = 120^\circ$  geométricos. Isto equivale, logicamente, a  $1/3$  da velocidade em dois polos.

Conclui-se, assim, que:

**Graus geométricos = Graus mecânicos x  $p$ .**

## Atividade 02

1. Construa uma tabela para cálculo da velocidade síncrona do campo, para uma máquina de 2, 4, 6 e 8 polos, quando é alimentada trifasicamente. A uma frequência de 60 e 50 Hz. Utilizar para o cálculo a equação anterior.

## 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 do Rotor (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.

$$f_2 = s \times f_1$$

**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.

## Atividade 03

1. Explique o significado físico de escorregamento em uma máquina assíncrona.
2. Explique o que é fator de potência e por que com o aumento da carga no motor este parâmetro tende a aumentar.

## Circuito Equivalente do Motor Assíncrono

Nas situações em que o escorregamento é diferente de 0 e 1, haverá f.e.m. induzida no secundário e, conseqüentemente, 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 tal como mostra a figura 4.

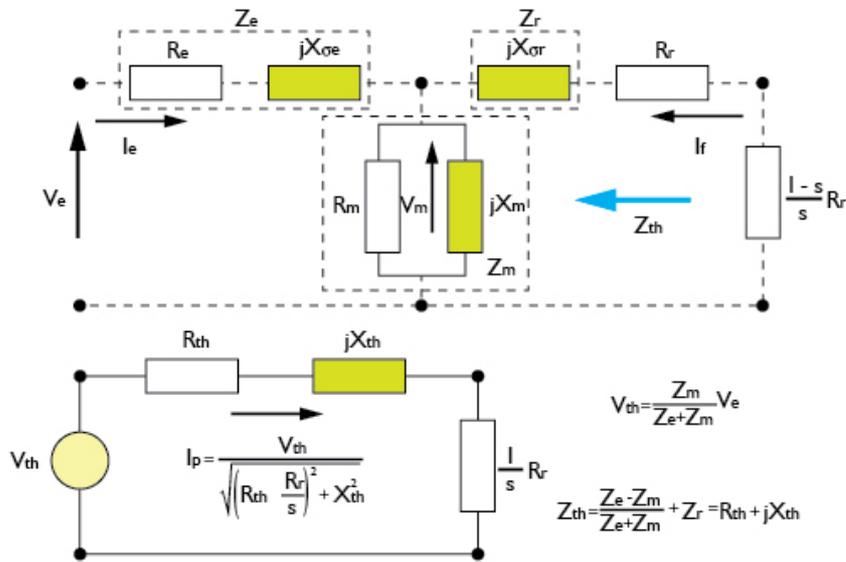


Figura 4 - Circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona com escorregamento  $s$ , com o rotor referido ao estator.

Fonte: Bim (2013).

Onde:

$R_e$ = Resistência estatórica	$V_e$ = Tensão estatórica
$X_{se}$ = Reatância estatórica	$I_e$ = Corrente estatórica
$R_r$ = Resistência rotórica	$I_r$ = Corrente rotórica
$X_{sr}$ = Reatância rotórica	$I_m$ = Corrente de magnetização
$X_m$ = Reatância de magnetização	$V_r$ = f.e.m. rotórica
$R_m$ = Resistência de magnetização	$S$ = escorregamento
$Z_{th}$ = Impedância Thévenin visto do rotor	$V_{th}$ = Tensão Thévenin visto do rotor
$R_{th}$ = Resistência Thévenin visto do rotor	$X_{th}$ = Reatância Thévenin visto do rotor

## Atividade 04

1. Explique o significado físico de cada parâmetro do modelo da máquina assíncrona.

### Equações da Máquina de Indução

O modelo clássico da máquina de indução é mostrado na Figura 4, pode-se extrair várias expressões úteis para determinar o comportamento da máquina em diferentes condições de funcionamento. Algumas dessas relações são:

1. As perdas de energia no rotor ficam concentradas, principalmente, na resistência dos enrolamentos do rotor. Estas perdas podem ser calculadas pela expressão:

$$P_{R_r} = 3I_r^2 R_r \quad (1)$$

2. Nas perdas de energia no estator: os condutores do estator têm resistência, e por esta razão nestes enrolamentos existem perdas de energia. Também na máquina podem ocorrer perdas por histerese de ferro e o material magnético por indução de correntes de Foucault. Todas estas perdas podem ser calculadas através da seguinte relação:

$$P_{per.est} = P_{R_e} + P_{fe} = 3I_e^2 R_e + 3 \frac{V_m^2}{R_m} \quad (2)$$

A tensão  $V_m$  pode ser calculada a partir da corrente do estator  $I_e$  e pela seguinte expressão:

$$V_m = V_e - (R_e + jX_{\sigma e})I_e \quad (3)$$

3. Energia mecânica no eixo do rotor: potência inserindo os eixos de máquinas elétricas de estator, uma parte é utilizada nos enrolamentos do estator e uma parte das perdas de ferro. O restante da potência de entrada através do intervalo de ar da máquina e atingir o circuito do rotor. Nesse circuito, a outra parte é perdida na resistência dos condutores. A diferença entre a potência de entrada e todas as perdas, está disponível no veio do rotor, como uma força mecânica:

$$P_{exe} = P_{rotor} - P_{R_r} = 3I_r^2 R_r \left[ \frac{1}{s} - 1 \right] = 3I_r^2 R_r \left[ \frac{1-s}{s} \right]$$

(4)

A equação (4) mostra que a potência mecânica disponível no eixo é igual à energia consumida na resistência de carga mostrada na Figura 4. A potência mecânica útil disponível no eixo mecânico pode ser menor do que o calculado pela expressão (4), porque há perdas mecânicas, tais como a fricção e de arrefecimento por ventiladores de máquina acoplados ao eixo mecânico, o que reduz o poder disponível no eixo.

4. Torque elétrico: o torque elétrico da máquina pode ser calculado a partir da relação entre a potência mecânica disponível sobre o eixo e a velocidade mecânica do rotor:

$$T_e = \frac{P_{exe}}{\omega_m} = 3I_r^2 R_r \frac{1-s}{s\omega_m} = 3I_r^2 R_r \frac{1-s}{s\omega_e(1-s)} = 3I_r^2 R_r \frac{1}{\omega_e s} = \frac{P_{rotot}}{\omega_e}$$

(5)

A equação (5) determina o torque elétrico a partir da energia mecânica disponível no eixo ( $P_{exe}$ ) e a velocidade mecânica do rotor  $\omega_m$ . Um método alternativo consiste em calcular o torque utilizando a energia elétrica que passa através do entreferro ( $P_{rotor}$ ) e à velocidade síncrona  $\omega_e$ .

## Equações da Máquina de Indução

Corrente do rotor: para determinar a potência no eixo  $P_{exe}$  e o torque elétrico  $T_e$ , é necessário obter a corrente do rotor  $I_e$ . Para calcular esta corrente é útil realizar o equivalente de Thévenin visto desde o rotor, tal

como mostra na figura 4. A **tensão Thévenin** no circuito da figura 4 é determinada mediante um divisor de tensão entre a impedância série do estator  $Z_e$  e a impedância de magnetização  $Z_m$ :

$$V_{th} = \frac{Z_m}{Z_m + Z_e} V_e$$

(6)

A impedância Thévenin do circuito é o resultado do paralelo entre  $Z_e$  e  $Z_m$ , em série com a impedância  $Z_r$ :

$$Z_{th} = \frac{Z_e Z_m}{Z_e + Z_m} + Z_r = R_{th} + jX_{th}$$

(7)

A corrente  $I_r$  é conseguida a partir do circuito Thévenin da figura 4:

$$I_r = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + \frac{R_r}{s})^2 + X_{th}^2}}$$

(8)

Substituindo a expressão (8) nas equações (4) e (5) é determinada a potência e o torque no eixo em função dos parâmetros elétricos da máquina, a tensão de Thévenin e o escorregamento do rotor:

$$P_{exe} = \frac{2V_{th}^2 R_r (\frac{1-s}{s})}{(R_{th} + \frac{R_r}{s})^2 + X_{th}^2}$$

(9)

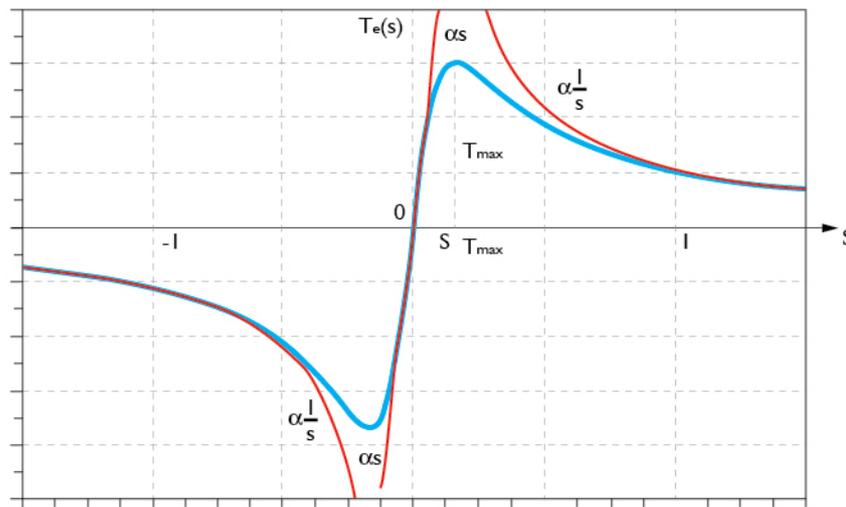
$$T_e = \frac{3 \frac{R_r}{\omega_e s} V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R_r}{s})^2 + X_{th}^2}$$

(10)

# Característica torque-escorregamento

A equação (10) determina o torque elétrico da máquina de indução. Se a tensão de alimentação  $V_e$  tem uma amplitude constante, a magnitude da tensão de Thévenin também será constante, porque a impedância do estator e a de magnetização é independente do escorregamento do rotor. Excluindo o escorregamento, todos os termos da equação (10) serão constantes para uma determinada máquina, considerando que a frequência de rede é constante.

Para entender o comportamento funcional deste recurso, é conveniente fazer aproximações assintóticas da equação (10) com relação a valores extremos de deslizamento. Quando o deslizamento é zero, a velocidade angular do eixo do rotor é igual à velocidade do campo magnético rotativo.



**Figura 5** - Características do torque da máquina de indução x escorregamento.

**Fonte:** Fitzgerald; Kingsley e Umans (2006).

Para escorregamentos muito pequenos  $s \rightarrow 0$ , mas diferentes de zero, o termo  $\frac{R_r}{s}$  é muito maior que a resistência e a reatância Thévenin. Nesse caso, é possível desconsiderar no denominador na expressão (10) a resistência e a reatância do Thévenin:

$$\frac{R_r}{s} \gg \sqrt{R_{th}^2 + X_{th}^2}$$

$$T_e \rightarrow \frac{3V_{th}^2}{\omega_e R_r} s; \text{ sim, } s \rightarrow 0$$

(11)

Para escorregamentos pequenos, a expressão (11) é válida. Nestas condições o comportamento torque-escorregamento é linear. Na prática, a equação (11) é de grande utilidade devido aos pontos de operação em regime permanente, os escorregamentos da máquina são suficientemente pequenos para satisfazer esta aproximação com precisão. No entanto, quando o escorregamento é grande, o termo  $\frac{R_r}{s}$  é desprezível e a característica torque-escorregamento pode aproximar-se a:

$$T_e \rightarrow \frac{3V_{th}^2}{\omega_e R_r} s; \text{ sim, } s \rightarrow 0$$

(12)

A expressão (12) representa uma variação de torque elétrica hiperbólica com o aumento do escorregamento. Os valores negativos do escorregamento, a abordagem acima são igualmente válidos, no entanto, neste caso, o torque elétrico é negativo. Na Figura 5, destacou um ponto importante da característica transcorrente, este ponto corresponde ao torque máximo da máquina. O torque é maximizado quando a potência que atravessa o entreferro é máxima, isto é, porque a velocidade síncrona depende da frequência das correntes injetadas no estator e, portanto, é constante. Para calcular a potência máxima que pode passar através da abertura se aplica o princípio da transferência de potência máxima ao equivalente de Thévenin da Figura 4. A máxima potência de transferência acontece quando a impedância da carga é  $\frac{R_r}{s}$  igual à impedância do equivalente Thévenin  $Z_{th}$ . Neste circuito a carga é puramente resistiva, enquanto a impedância Thévenin é fortemente indutiva, neste caso para transferir à máxima potência é necessário que os módulos das impedâncias sejam iguais:

$$\frac{R_r}{s} = Z_{th} = \sqrt{R_{th}^2 + X_{th}^2}$$

(13)

Desprezando na equação (13) de Thevenin  $R_{th}$  resistência, que é geralmente muito pequena, em comparação com retância  $X_{th}$  e substituindo esta expressão na equação (10) pode-se calcular que o binário máximo produzido pela máquina de indução:

$$T_{e\ max} \rightarrow \frac{3V_{th}^2}{2\omega_e X_{th}}$$

(14)

O escorregamento do que produz o torque máximo é obtido a partir da expressão (15)

$$S_{T_{max}} = \frac{R_r}{\sqrt{R_{th}^2 + X_{th}^2}}$$

(15)

Quando se considera a equação (10), mostra que a característica de torque de deslizamento não é completamente simétrica em torno da origem. O denominador dessa equação não é indiferente a assinar o recibo. Se a resistência Thévenin é nula ou insignificante, então a função é simétrica.

O escorregamento é a variável que define o ponto de funcionamento da máquina de indução. Conhecidos estes dados podem determinar as correntes, o torque elétrico, a entrada ou saída de potência, perdas, fator de potência e desempenho da máquina. Em máquinas com rotor bobinado é possível incluir a resistência em série com o circuito do rotor. Essa opção pode ser utilizada para reduzir a corrente durante o arranque ou a aumentar substancialmente a magnitude do torque elétrico durante esse processo. É ainda possível adicionar força suficiente para permitir que a máquina arranque com torque máximo:

$$S_{T_{max}} = \frac{R_r + R_{adicional}}{\sqrt{R_{th}^2 + X_{th}^2}} = 1 \rightarrow R_{adicional} = \sqrt{R_{th}^2 + X_{th}^2} - R_r$$

(16)

A grandeza do torque máximo não é afetada pela variação da resistência do rotor, mas a característica de binário de escorregamento é significativamente modificada, conforme mostrado na Figura 5.

## Atividade 05

1. Explique por que o torque é zero para escorregamento próximo a zero de escorregamento em uma máquina assíncrona.

## Curva de Torque X Velocidade

Conforme foi explicado anteriormente, o motor de indução tem conjugado igual a zero à velocidade síncrona. À medida que a carga vai aumentando, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o torque atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal. Se o torque da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor. Representando num gráfico a variação do conjugado com a velocidade para um motor normal, vai-se obter uma curva com aspecto representado na figura 6:

$T_0$  – Torque básico: é o torque calculado em função da potência e velocidade síncrona;

$$T_0(kgfm) = \frac{716 \times P(cv)}{n_s(rpm)} = \frac{794 \times P(kW)}{n_s(rpm)}$$

$$T_0(Nm) = \frac{7094 \times P(cv)}{n_s(rpm)} = \frac{9555 \times P(kW)}{n_s(rpm)}$$

$T_n$  – Torque nominal ou de plena carga: é o torque desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais;

$n_n$  – Rotação nominal;

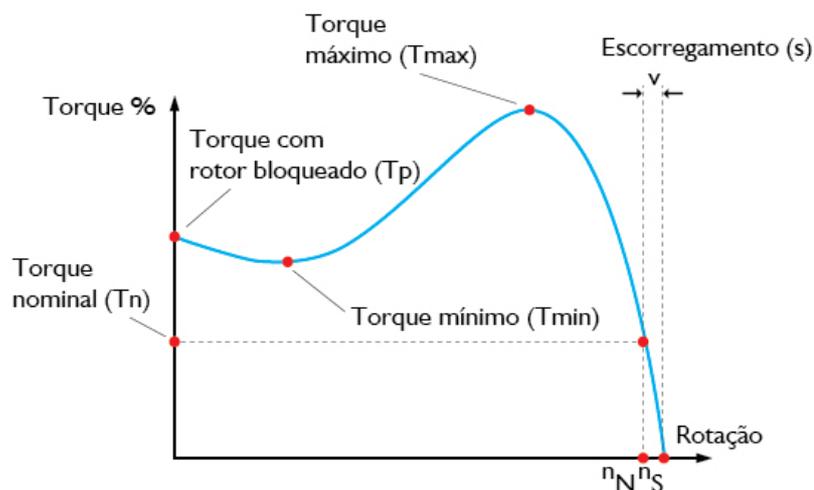
$n_s$  – Rotação síncrona;

$T_{\text{mín}}$  – torque mínimo: é o menor torque desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo.

Na prática, esse valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração, para que a partida não seja muito demorada, sobreaquecendo o motor, especialmente nos casos de alta inércia ou partida com tensão reduzida;

$T_{\text{máx}}$  – Torque máximo: é o maior torque desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominais, sem queda brusca de velocidade. Na prática, o torque máximo deve ser o mais alto possível, por duas razões principais: o motor deve ser capaz de vencer, sem grandes dificuldades, eventuais picos de carga como pode acontecer em certas aplicações, como em britadores, calandras, misturadores e outras. O motor não deve arriar, isto é, perder bruscamente a velocidade, quando ocorrem quedas de tensão, momentaneamente, excessivas.

$T_p$  – torque com rotor bloqueado ou conjugado de partida ou, ainda, conjugado de arranque: é o torque mínimo desenvolvido pelo motor bloqueado, para todas as posições angulares do rotor, sob tensão e frequência nominais;



**Figura 6** - Curva conjugado x rotação.  
Fonte: Nasar (1995).

# Categorias – valores mínimos normalizados

Conforme suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. Estas categorias são definidas em norma (NBR 7094), e são as seguintes:

## Categoria n

Torque de partida normal, corrente de partida normal, baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, com baixo torque de partida, como: bombas e máquinas operatrizes (torque linear e parabólico).

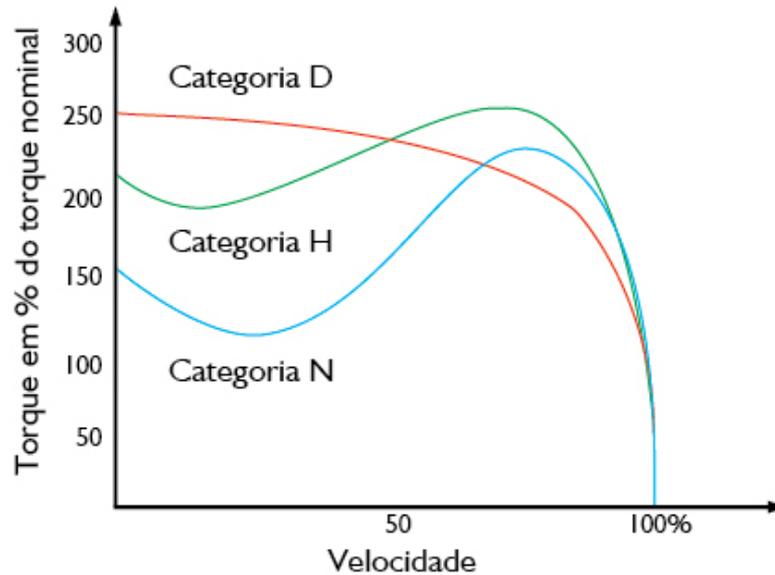
## Categoria h

Torque de partida alto, corrente de partida normal, baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior torque na partida, como peneiras, transportadores carregados, cargas de alta inércia, etc. (torque constante).

## Categoria d

Torque de partida alto, corrente de partida normal, alto escorregamento (mais de 5%). Os motores comerciais apresentam escorregamentos nas faixas de 5 a 8% e de 8 a 13%. Usados em prensas excêntricas e máquinas semelhantes, onde a carga apresenta picos periódicos e cargas que necessitam de torque de partida muito altos e corrente de partida limitada. As curvas torque x velocidade das diferentes categorias são mostradas na figura 7. A norma NBR-7094 especifica os

valores mínimos de conjugados exigidos para motores de categoria N, H e D. Esses valores de norma são mostrados nas tabelas (1.4.1.2.1) e (1.4.1.2.2).



**Figura 7** - Curvas Conjugados x Velocidade das Diferentes Categorias.  
Fonte: Nasar (1995).

## Resumo

A presente aula abordou o estudo das máquinas assíncronas ou também chamadas máquinas de indução, mostrando o princípio de funcionamento, definindo os principais parâmetros que caracterizam o funcionamento delas. Em seguida, foram mostradas as equações que modelam o comportamento do torque elétrico gerado por esse tipo de máquinas. A aula, então, finaliza com a apresentação dos tipos de máquinas assíncronas agrupadas por tipo de categorias que caracterizam o tipo de comportamento de torque.

## Autoavaliação

1. Para o enrolamento de estator trifásico de 8 polos, alimentado por uma fonte senoidal de 60 Hz, calcule o deslocamento da onda de fmm de estator em um quarto de ciclo da corrente.

2. Um motor de indução rotor gaiola, estator com 8 polos funciona com frequência de estator igual a 50Hz e rotor com velocidade de -600 rot/min. Calcule a frequência angular das correntes de rotor.
3. Se o motor de indução trifásica tem, idealmente, resistências das bobinas (estator e rotor) e perdas rotacionais (incluídas as de ferro) nulas, qual seria a consequência no seu funcionamento?
4. Por causa de sua maior reatância de dispersão, um motor de categoria N tem uma corrente de partida menor que seu equivalente de categoria M. Como este aumento da reatância de dispersão afeta (a); ob\_clean torque máximo do motor, (b); o escorregamento para o torque máximo e (c) o torque para torque nominal?

## Referências

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

BIM, Edson. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAe4isAB/maquinas-eletricas-maquinas-eletricas-acionamento-edson-bim-unicamp>>. Acesso em: 26 ago. 2013.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. [S.l.]: Bookman, 2006.

GOURISHANKAR, Vembu. **Conversão de energia eletromecânica**. São Paulo: Alfaomega, 1990.

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

NASAR, S. A. **Máquinas elétricas**. São Paulo: McGraw-Hill, 1995.

SAY, M. G. **Introduction to the unifiield theory of electromagnetic machines**. [S.l.]: Pitman, 1971.

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