

SEL 404 – ELETRICIDADE II

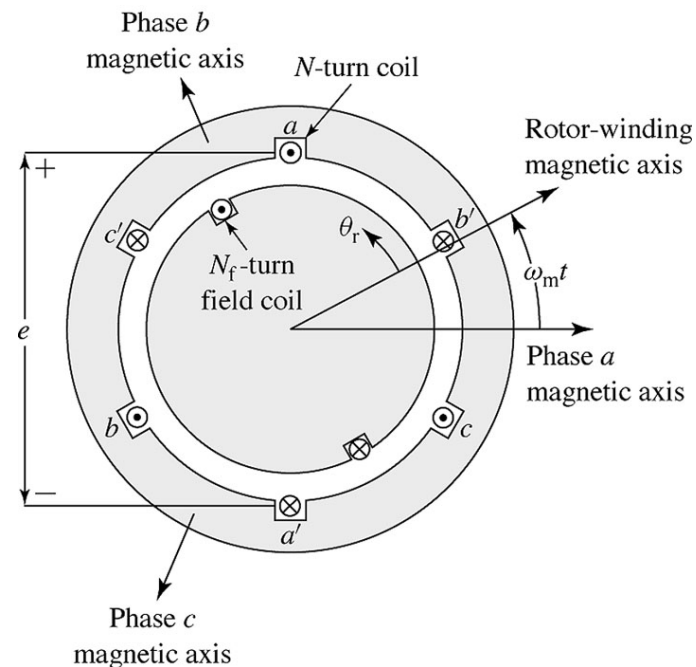
Aula 15

Aula de Hoje

- Introdução à máquina de indução trifásica (MIT)

Características Básicas de uma MIT

- Os enrolamentos do estator (armadura) são conectados a uma fonte de alimentação CA;
- O fluxo produzido nos enrolamentos do estator, e que atravessa o entreferro e o rotor, é girante, com a velocidade síncrona da tensão de alimentação;
- O fluxo girante (variável) induz tensão nos enrolamentos do rotor;



Características Básicas de uma MIT

- Se os enrolamentos do rotor estiverem em curto-circuito, surgirão correntes induzidas;
- As correntes induzidas produzem uma segunda distribuição de fluxo no rotor;
- A produção de torque na máquina de indução ocorre devido à busca de alinhamento entre os fluxos girantes do estator e do rotor;

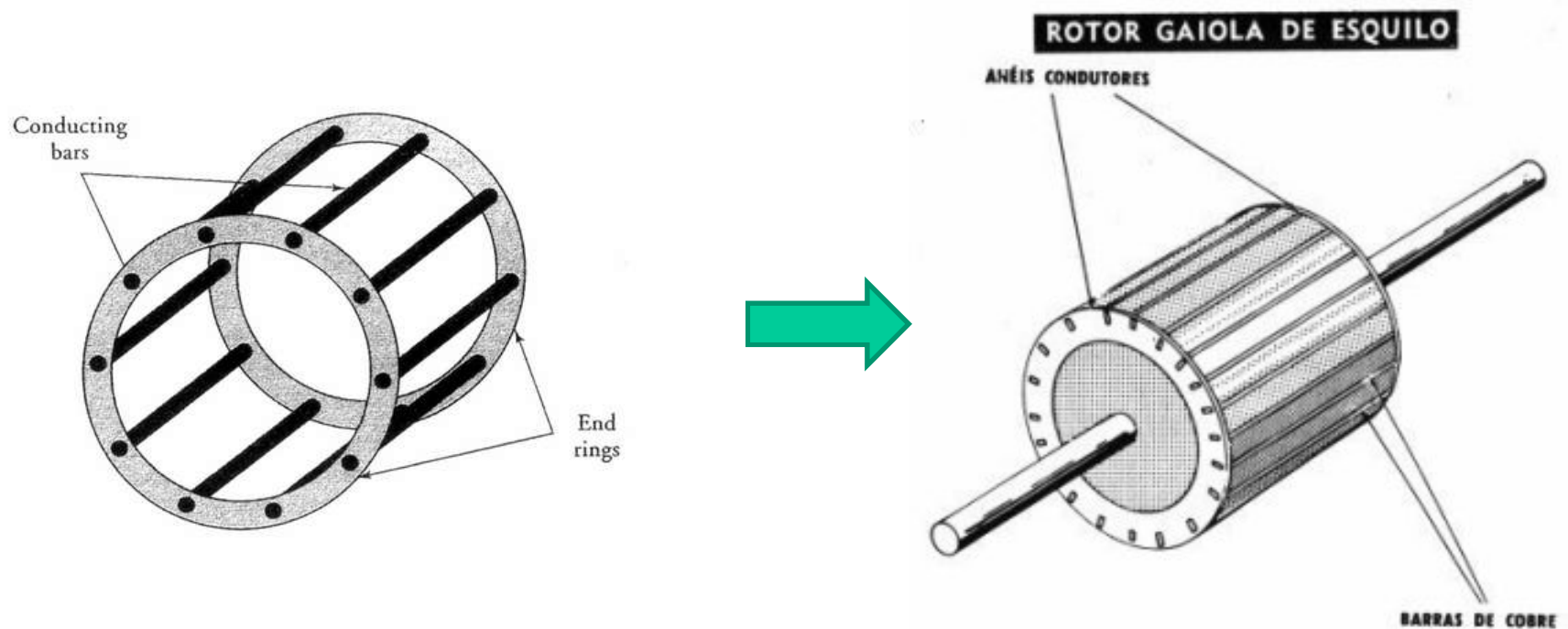


Características Básicas de uma MIT

- A velocidade de regime do eixo nunca será síncrona com o campo girante do estator, pois assim, o enrolamento do rotor estaria sujeito a fluxo magnético constante, e não haveria correntes induzidas, e nem torque; (60 Hz → 377 rad/s → 3600 rpm)
- Por isso, o motor de indução sempre gira um pouco abaixo da velocidade síncrona, e é denominado motor assíncrono.
- Um único enrolamento é alimentado por corrente alternada, o outro enrolamento (do rotor) é alimentado por indução;

Características Básicas de uma MIT

- O enrolamento do rotor pode ser bobinado como o do estator, ou em forma de gaiola, formado por barras metálicas acomodadas nas ranhuras do rotor e curto-circuitadas nos finais por anéis metálicos (cobre ou alumínio);

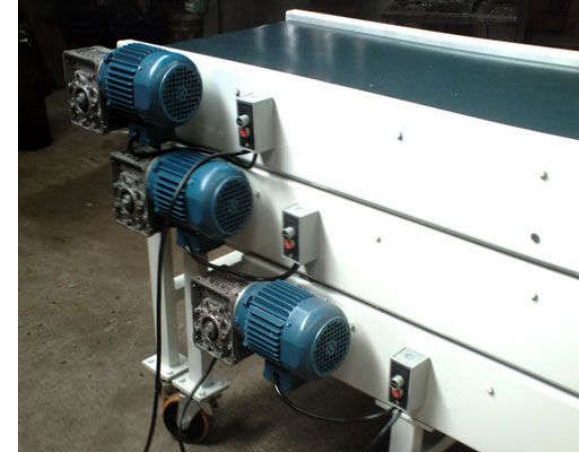
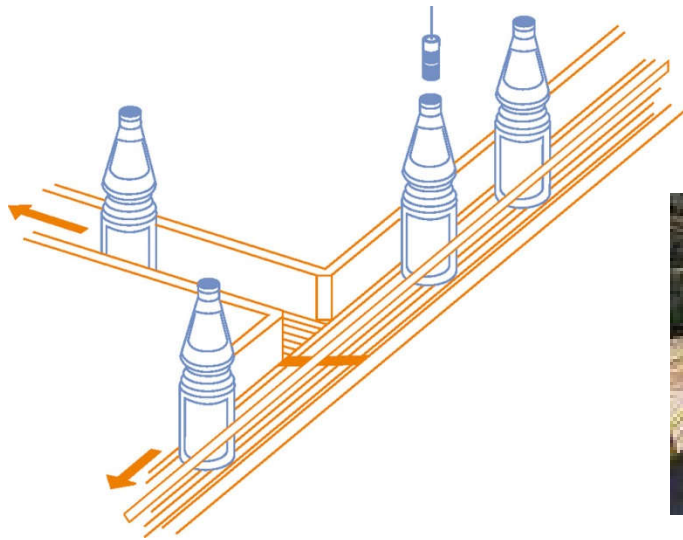


Características Básicas de uma MIT

- Rotor bobinado



Uso de MITs



ELEVADOR PERSONAS Y MATERIALES EPM-1500/150

Características Técnicas

Altura máxima	m. 150
Distancia entre anclajes	m. 6
Carga útil	Kg. 1500
Capacidad como Ascensor (personas)	14
Largo Cabina	mm. 2000
Ancho Cabina	mm. 1750
Alto Cabina	mm. 2000
Tensión trifásica	220/380 - 50 Hz.
Velocidad de subida	m/min. 30
Potencia motor con variador de frecuencia	Kw. 8

FRENO DE EMERGENCIA CENTRIFUGO-MECÁNICO



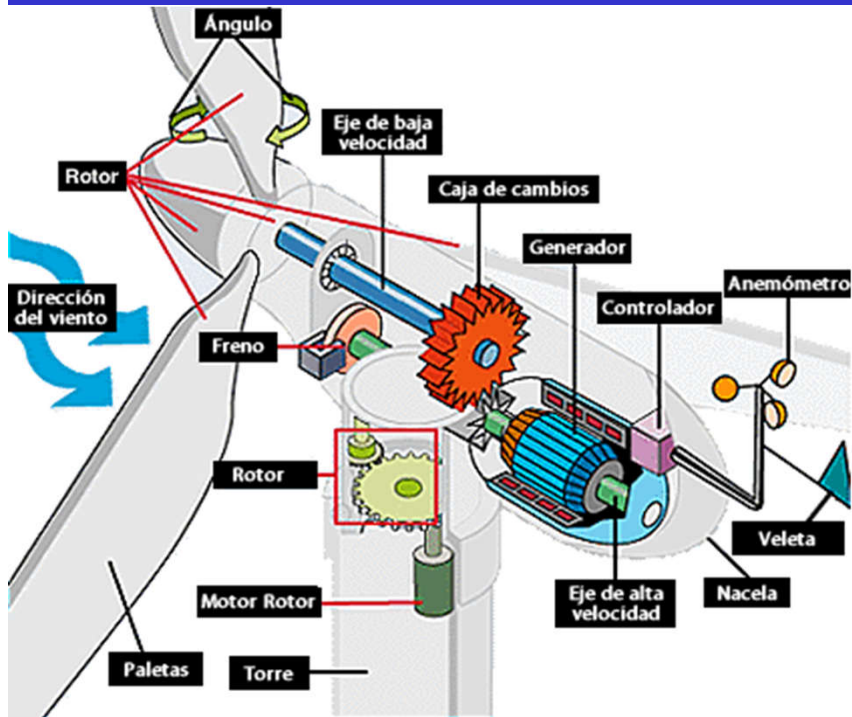
1500 Kg
3 x 1200 Kg
6 x 600 Kg
10 x 300 Kg
14 x 150 Kg

EPM-1500/150



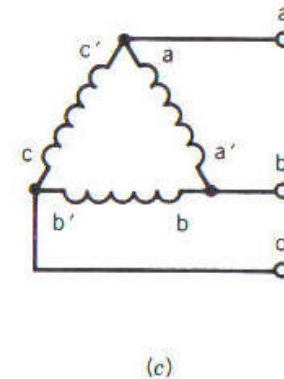
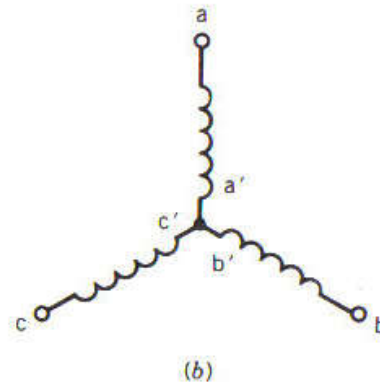
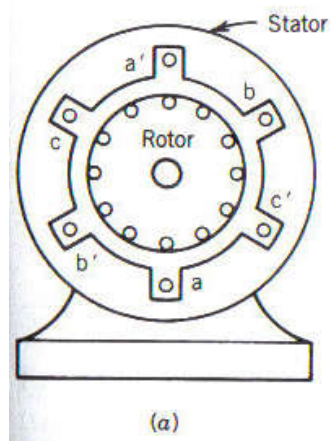
Em países industrializados de 40 a 75% da carga é formada por motores de indução

Uso de MITs – Turbinas Eólicas



MIT - Estator

- Estator com enrolamento trifásico. Cada bobina é posicionada a 120° da outra e é alimentada por um sistema trifásico. Podem ser conectadas à fonte elétrica em Y ou Δ ;
- Produz um campo girante no entreferro, com a mesma frequência da tensão de alimentação;
- O campo girante induz tensão no enrolamento do rotor, o qual não é alimentado diretamente, mas por INDUÇÃO;



MIT - Rotor

- Pode ter enrolamento bobinado como o do estator, ou pode ter rotor em gaiola;
- O campo girante do estator induz tensão no enrolamento do rotor;
- Se o enrolamento do rotor for curto-circuitado surgirão correntes induzidas, que produzirão um campo magnético no rotor em oposição à variação do campo do estator, resultando na produção de torque e no giro do rotor em uma dada velocidade;
- Para existirem correntes induzidas no rotor, a velocidade do eixo deverá ser sempre diferente da velocidade do campo girante, caso contrário um condutor sobre o rotor estaria sujeito a um campo fixo, e não haveria correntes induzidas. Daí a denominação de **máquina assíncrona**.

Operação da MIT – Rotor Aberto

- Não há corrente induzida, e o rotor permanecerá parado.
- O campo girante no entreferro induz tensão nos enrolamentos do rotor e do estator (com a mesma frequência);

$$E_1 = 4,44 f_1 N_1 \phi_p k_{w1} \Rightarrow \text{estator}$$

$$E_2 = 4,44 f_1 N_2 \phi_p k_{w2} \Rightarrow \text{rotor}$$

Daí:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 N_1 \phi_p k_{w1}}{4,44 f_1 N_2 \phi_p k_{w2}} = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

- Com o enrolamento do rotor em aberto e o eixo estacionário o MI funciona como um transformador, em que o estator representa o primário e o rotor representa o secundário;

Operação da MIT – Rotor Em Curto-Circuito

- A tensão induzida no rotor produz corrente induzida, que interage com o campo girante no entreferro produzindo torque;
- O rotor começará a girar;
- O rotor gira na direção do campo girante, de forma a diminuir a velocidade relativa entre os dois (Lei de Lenz);
- O rotor chega a uma velocidade de equilíbrio em regime permanente (n) menor do que a velocidade síncrona (n_s) do campo girante do estator;

$$n_s = \frac{60 f_1}{\frac{p}{2}} = \frac{120 f_1}{p}$$

- Se $n = n_s$, não há corrente induzida no rotor, e o torque é nulo

Operação da MIT – Rotor Em Curto-Circuito

- A diferença entre a velocidade do campo girante do estator e a velocidade do rotor define o **escorregamento** da MI;

$$\left\{ \begin{array}{l} s = \frac{n_s - n}{n_s} \\ n = (1 - s)n_s \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} n = 0 \text{ (máquina parada)} \Rightarrow s = 1 \\ n = n_s \text{ (torque nulo)} \Rightarrow s = 0 \end{array} \right.$$

- $n_s - n = sn_s$ é a velocidade relativa do rotor em relação ao campo girante do estator;
- A frequência da corrente induzida no enrolamento do rotor é:

$$f_2 = \frac{p}{120} (n_s - n) = \frac{p}{120} sn_s = s \frac{p}{120} n_s = sf_1$$

- f_2 é denominada por frequência de escorregamento;

Operação da MIT – Rotor Em Curto-Circuito

- A tensão induzida no enrolamento do rotor para um dado escorregamento é:

$$E_2 \Big|_s = 4,44 f_2 N_2 \phi_p k_{w2} = 4,44 s f_1 N_2 \phi_p k_{w2} = s E_2 \Big|_{\substack{s=1 \\ n=0}}$$

- A velocidade do campo girante produzido pelo enrolamento do rotor é:

$$n_2 = \frac{120 f_2}{p} = \frac{120 s f_1}{p} = s n_s$$

- Como o rotor gira a n RPM, o campo girante do rotor gira no entreferro a $n+n_2$:

$$n + n_2 = (1 - s)n_s + s n_s = n_s$$

Operação da MIT – Rotor Em Curto-Circuito

- Ou seja, os campos girantes do rotor e do estator giram no entreferro com a mesma velocidade síncrona (n_s);
- Eles são estacionários entre si, no entanto, o campo do rotor é atrasado em relação ao do estator;
- A tendência de alinhamento entre os dois campos é que produz torque.

Exemplo 1

- Considere um MI trifásico, 460V, 100 HP, 60 Hz, 4 pólos, atendendo carga nominal, com escorregamento de 5%. Calcule:
- a) a velocidade síncrona e a velocidade do motor;

$$n_s = \frac{120 f_1}{p} = \frac{120 * 60}{4} = 1800 \text{ RPM}$$

$$n = (1 - s)n_s = (1 - 0,05) * 1800 = 1710 \text{ RPM}$$

Exemplo 1

- Considere um MI trifásico, 460V, 100 HP, 60 Hz, 4 pólos, atendendo carga nominal, com escorregamento de 5%. Calcule:
- b) a velocidade do campo girante no entreferro;

$$\text{velocidade síncrona} = 1800 \text{ RPM}$$

- c) A frequência do circuito do rotor:

$$f_2 = sf_1 = 0,05 * 60 = 3 \text{ Hz}$$

Exemplo 1

➤ Considere um MI trifásico, 460V, 100 HP, 60 Hz, 4 pólos, atendendo carga nominal, com escorregamento de 5%. Calcule:

d) O escorregamento em RPM;

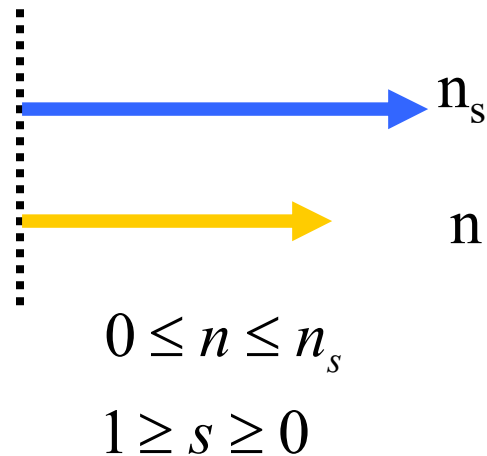
$$sn_s = 0,05 * 1800 = 90 \text{ RPM} \quad \text{ou} \quad n_s - n = 1800 - 1710 = 90 \text{ RPM}$$

e) A velocidade do campo do rotor em relação a:

1. Estrutura do rotor: 90 RPM
2. Estrutura do estator: $90 + 1710 = 1800$ RPM
3. Ao campo girante do estator: $1800 - 1800 = \text{zero}$

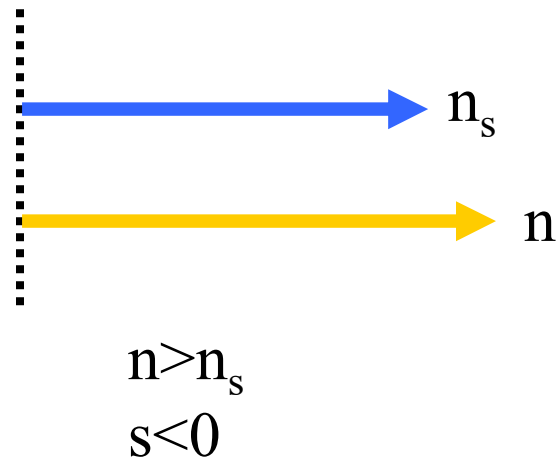
Operação como Motor

- O rotor gira na direção do campo girante do estator
- A velocidade do rotor é menor do que a do campo girante;



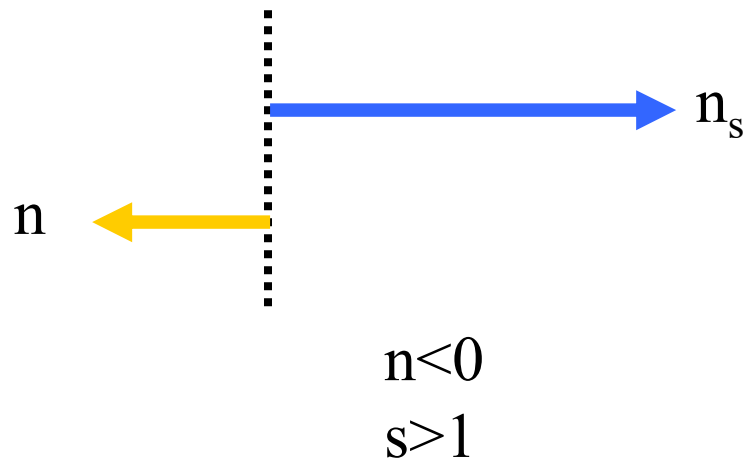
Operação como Gerador

- O rotor gira na direção do campo girante do estator
- A velocidade do rotor é maior do que a do campo girante;

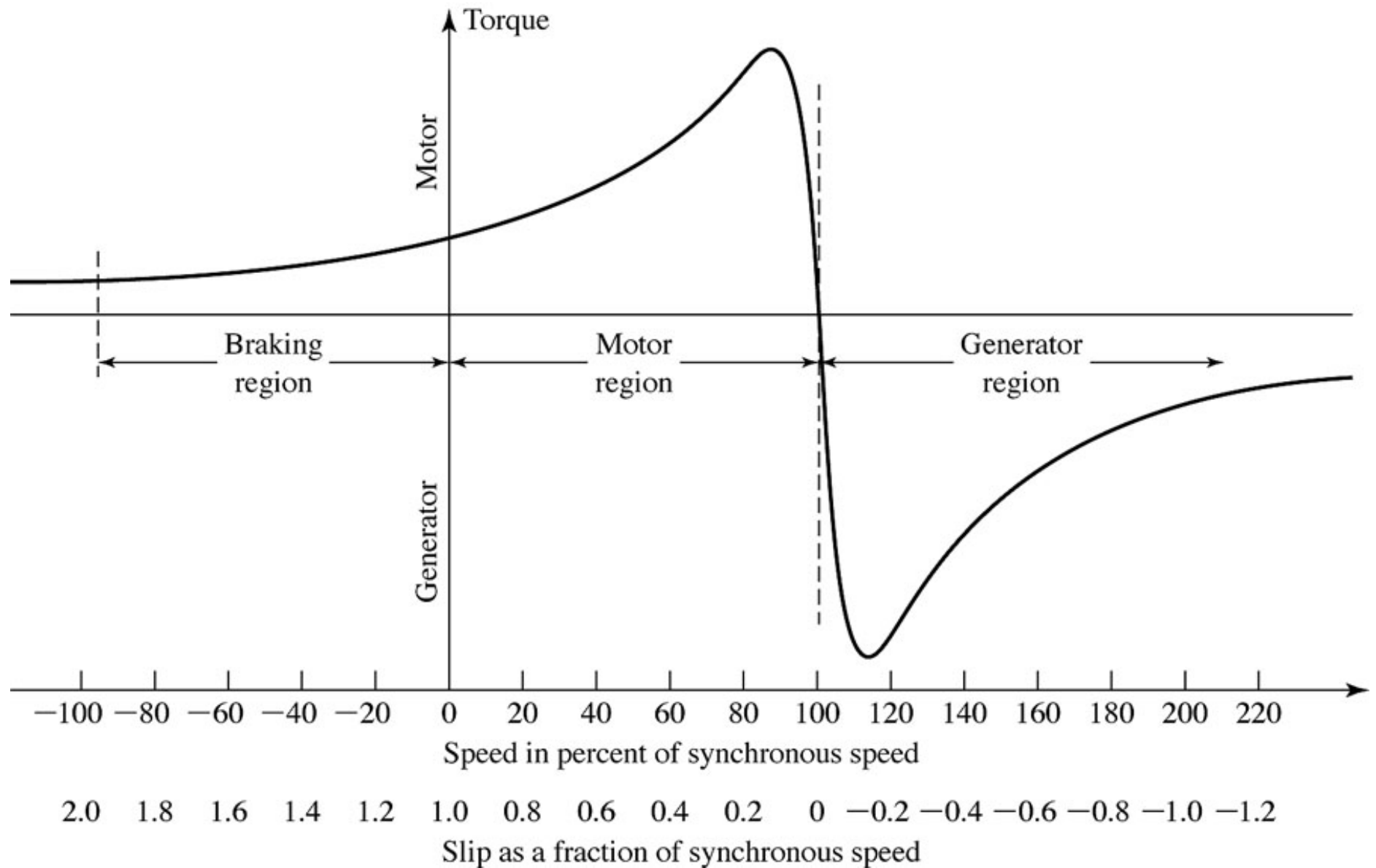


Operação como em Modo Frenante

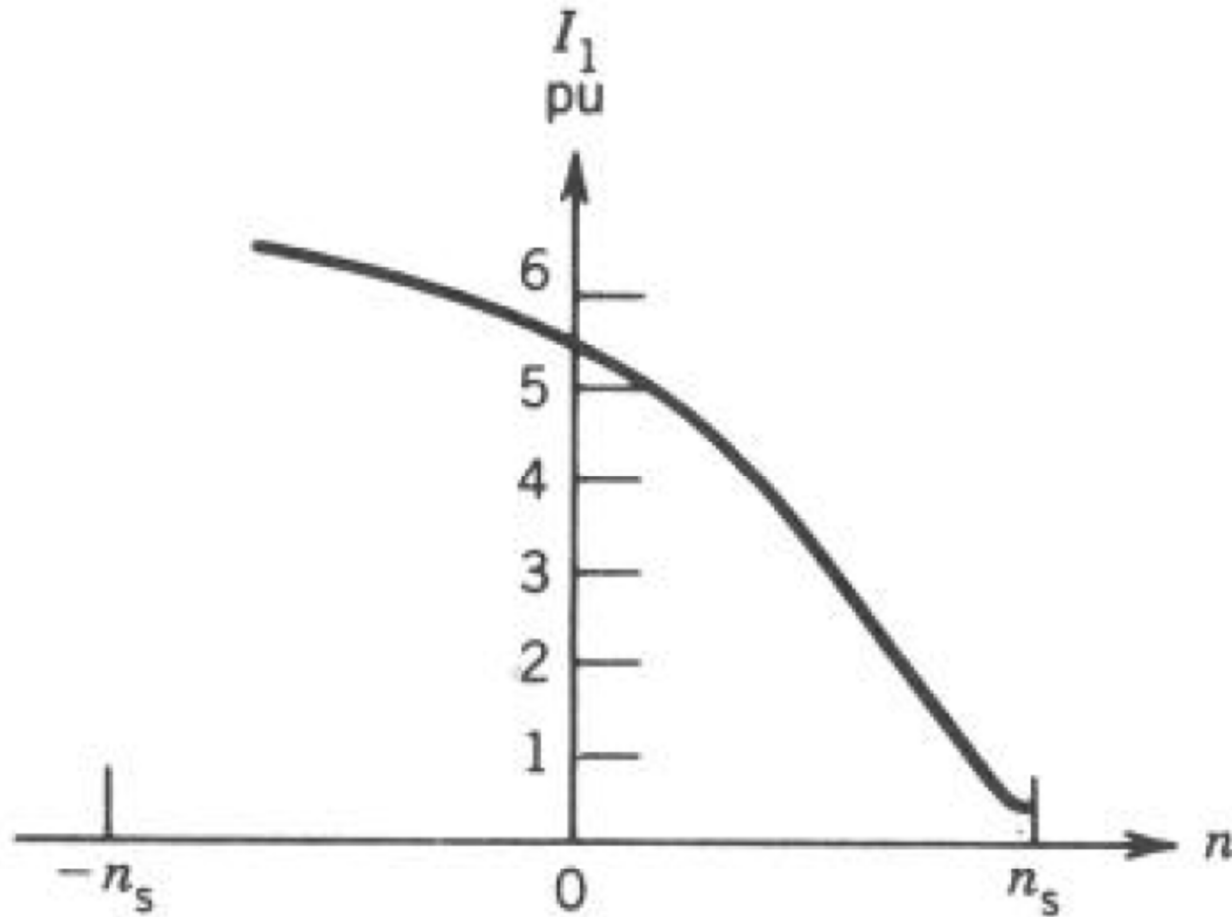
- O rotor gira na direção oposta do campo girante do estator
- O torque produzido é frenante;



Curva Torque x Velocidade de uma MIT



Corrente do Estator



Em caso de motores de grande porte, é necessário empregar algum método de partida para reduzir a corrente, evitando que elevadas correntes sejam exigidas da rede.

Análise da Partida de Motores

⇒ Categorias de partida: (motores com rotor gaiola de esquilo)

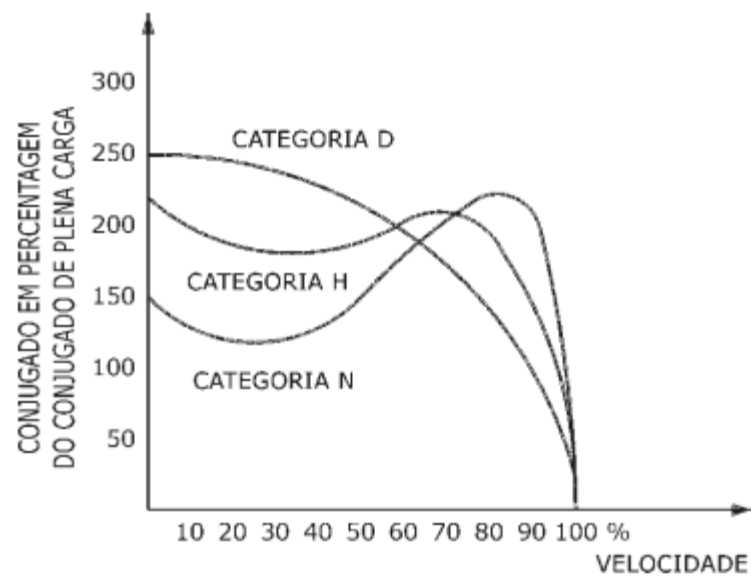
⇒ **Categoria N:** acionamento de bombas, ventiladores e outras cargas consideradas normais;

⇒ **Categoria H:** acionamento de cargas que exigem elevado conjugado na partida: peneiras, transportadores, britadores etc

⇒ **Categoria D:** acionamento de prensas excêntricas e outras cargas que apresentem picos periódicos de conjugado. Também empregados em cargas que exijam elevado torque de partida.

Análise da Partida de Motores

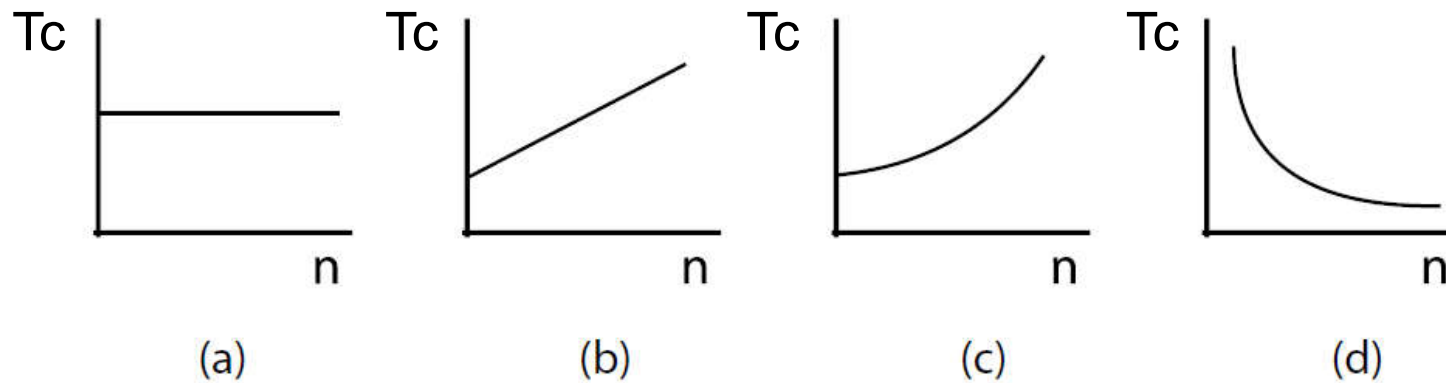
Categorias de partida	Torque de partida	Corrente de partida	Escorregamento
N	Normal	Normal	Baixo
H	Alto	Normal	Baixo
D	Alto	Normal	Alto



Fonte: Guia de Aplicação – Inversores de Frequência - WEG

Análise da Partida de Motores

⇒ Basicamente, existem os seguintes tipos de cargas em um ambiente industrial:



(a) pontes rolantes, esteiras, guinchos, elevadores e semelhantes

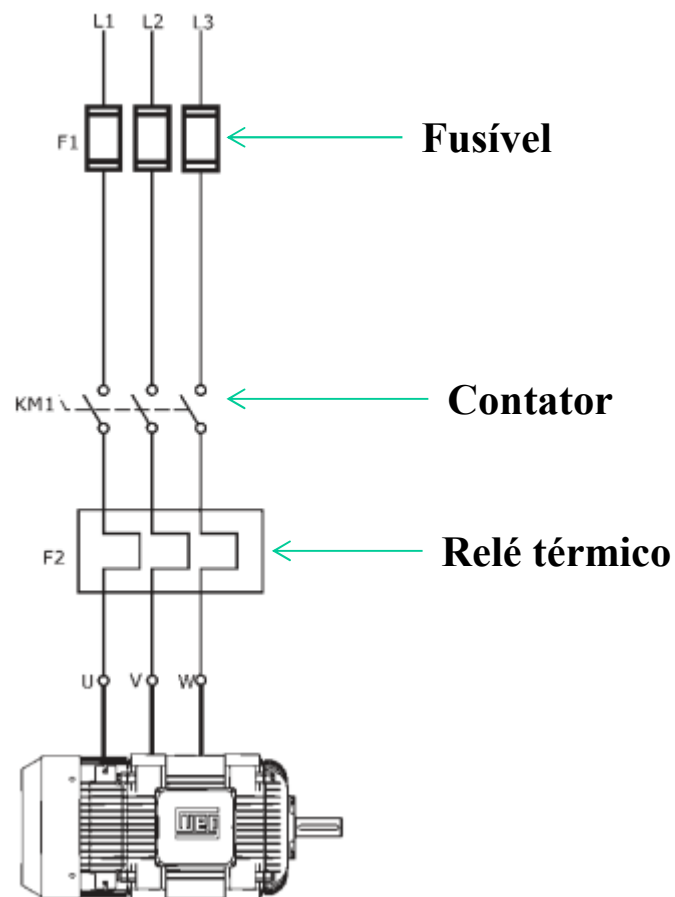
(b) moinhos de rolo, bombas de pistão, plainas e serras

(c) ventiladores, misturadores, bombas centrífugas, exaustores e compressores

(d) máquinas operatrizes, frezadoras, mandriladoras e bobinadeiras

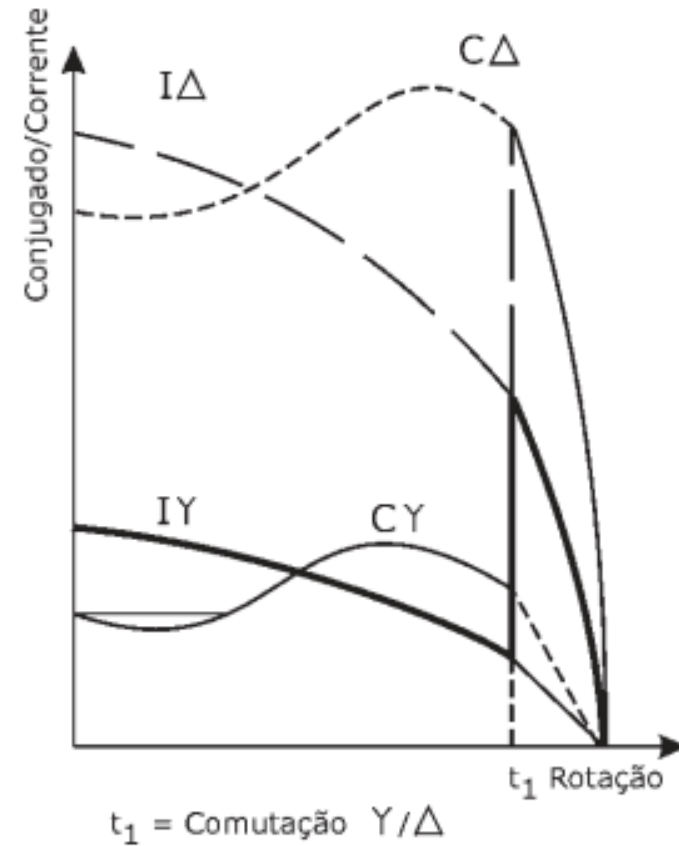
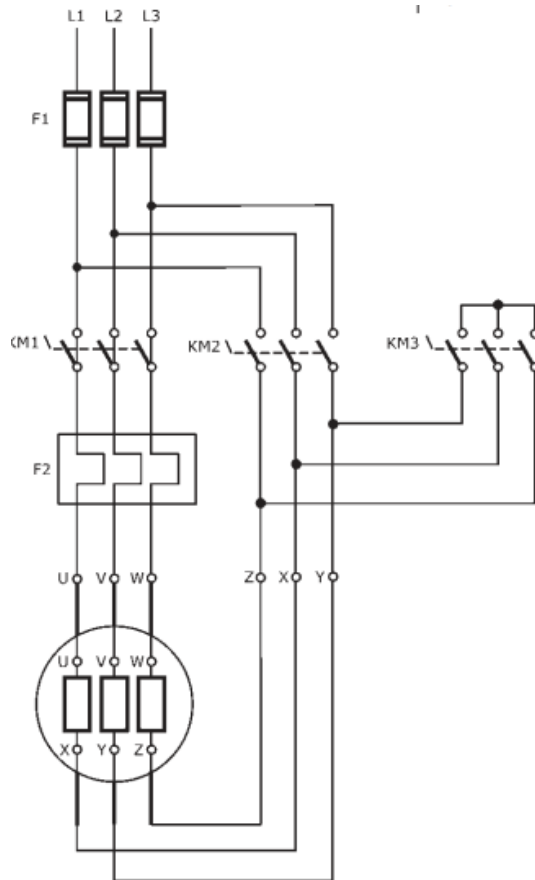
Análise da Partida de Motores

⇒ Partida direta:



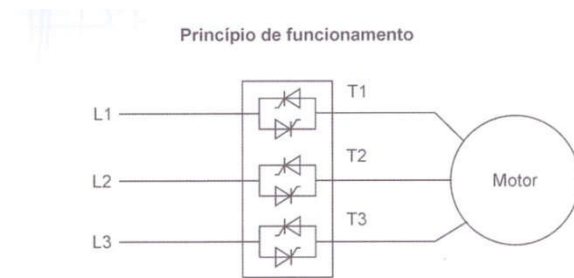
Análise da Partida de Motores

⇒ Partida estrela-triângulo:



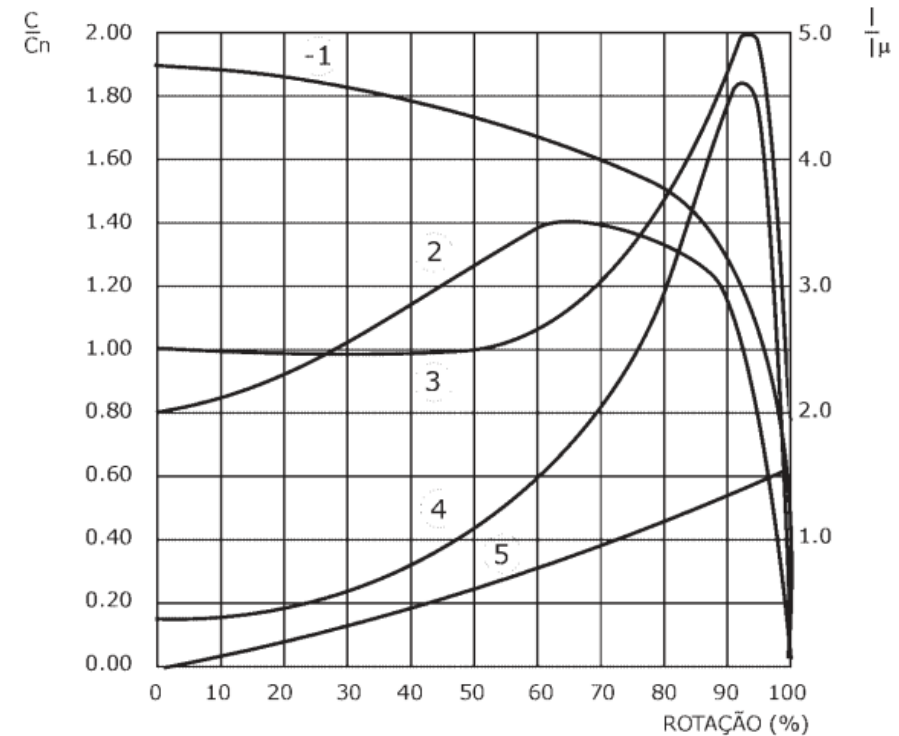
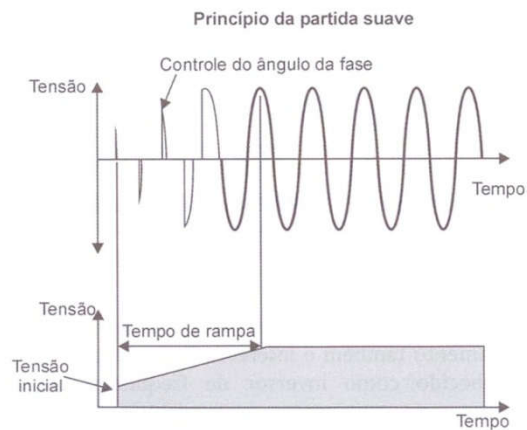
Análise da Partida de Motores

⇒ Partida com soft-starter:



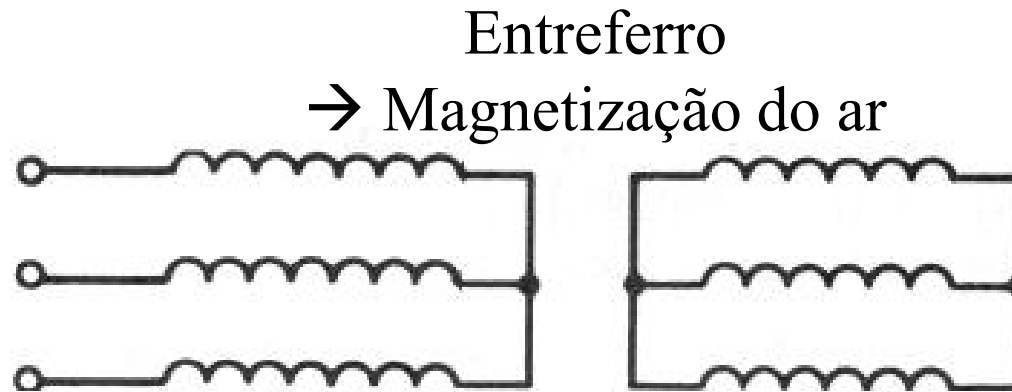
Soft-starters basicamente reduzem a corrente de partida do motor, controlando a tensão.

O controle é feito por tiristores



- 1 - CORRENTE DE PARTIDA DIRETA
- 2 - CORRENTE DE PARTIDA C/SOFT-STARTER
- 3 - CONJUGADO COM PARTIDA DIRETA
- 4 - CONJUGADO COM SOFT-STARTER
- 5 - CONJUGADO DA CARGA

Circuito Equivalente de uma MIT



ESTATOR

-primário

- f_1

- N_1

- $E_1 = 4,44f_1 N_1 \Phi_p k_{w1}$

ROTOR

-secundário

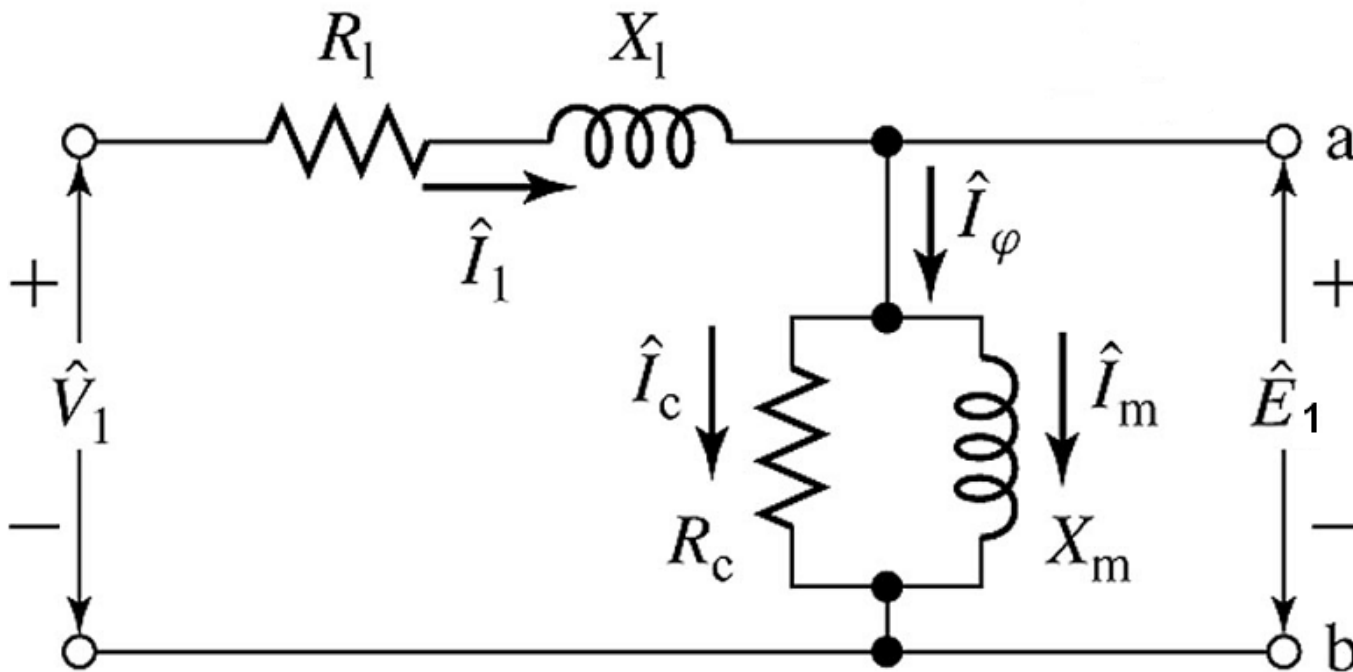
- f_2

- N_2

- $E_2 = 4,44f_2 N_2 \Phi_p k_{w2}$
 $= 4,44sf_1 N_2 \Phi_p k_{w2}$
 $= sE_2|_{\text{parada}} (n=0)$

Os circuitos do estator e do rotor têm frequências diferentes

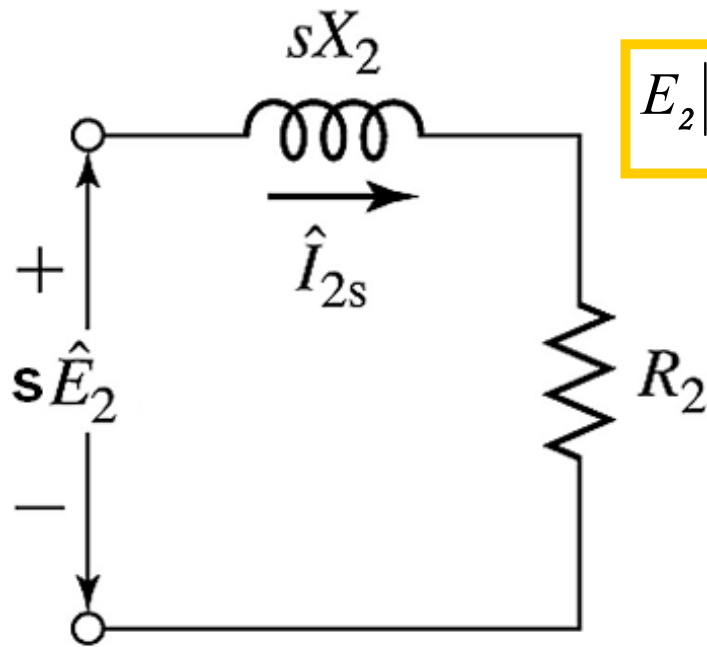
Circuito Equivalente do Estator por Fase (Ver Aula 10)



A corrente de magnetização varia de 30 a 50% da corrente nominal

- $V_1 \rightarrow$ Tensão terminal por fase;
- $E_1 \rightarrow$ Tensão induzida no estator por fase;
- $R_1 \rightarrow$ resistência do enrolamento do estator por fase (perda cobre);
- $X_1 \rightarrow$ reatância de dispersão do estator por fase; $X_1=2\pi f_1 L_1$
- $X_m \rightarrow$ reatância de magnetização por fase; $X_m=2\pi f_1 L_m$
- $R_c \rightarrow$ perda no núcleo do estator por fase;

Circuito Equivalente do Rotor por Fase

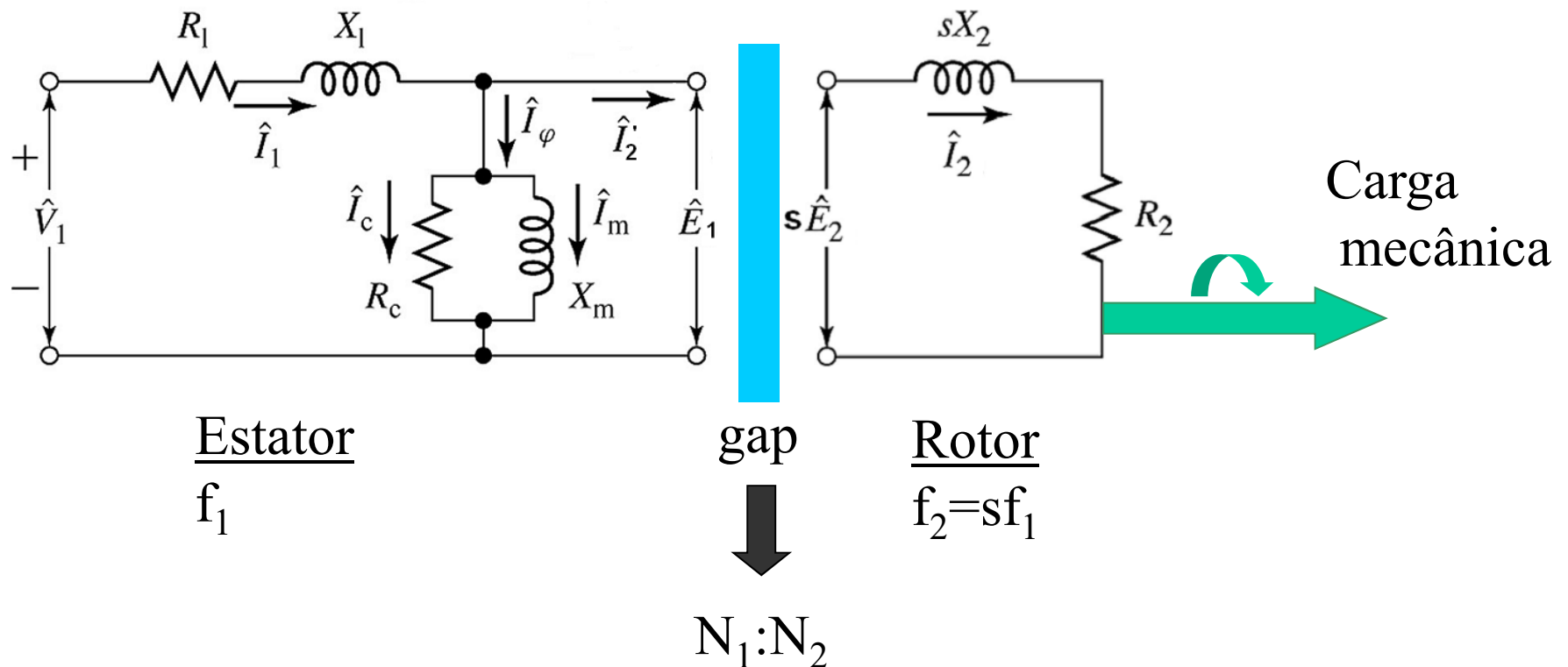


$$E_2|_s = 4,44 f_2 N_2 \phi_p k_{w2} = 4,44 s f_1 N_2 \phi_p k_{w2} = s E_2|_{\substack{s=1 \\ n=0}}$$

$$X_2|_s = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s X_2|_{\substack{s=1 \\ n=0}}$$

- $E_2 \rightarrow$ Tensão induzida no enrolamento do rotor parado ($s=1$, $n=0$);
- $R_2 \rightarrow$ resistência do enrolamento do rotor por fase (perda cobre);
- $X_2 \rightarrow$ reatância de dispersão do rotor por fase parado;
- $I_2 \rightarrow$ corrente por fase no rotor
- $f_2 \rightarrow$ frequência do circuito do rotor \neq da frequência do estator f_1

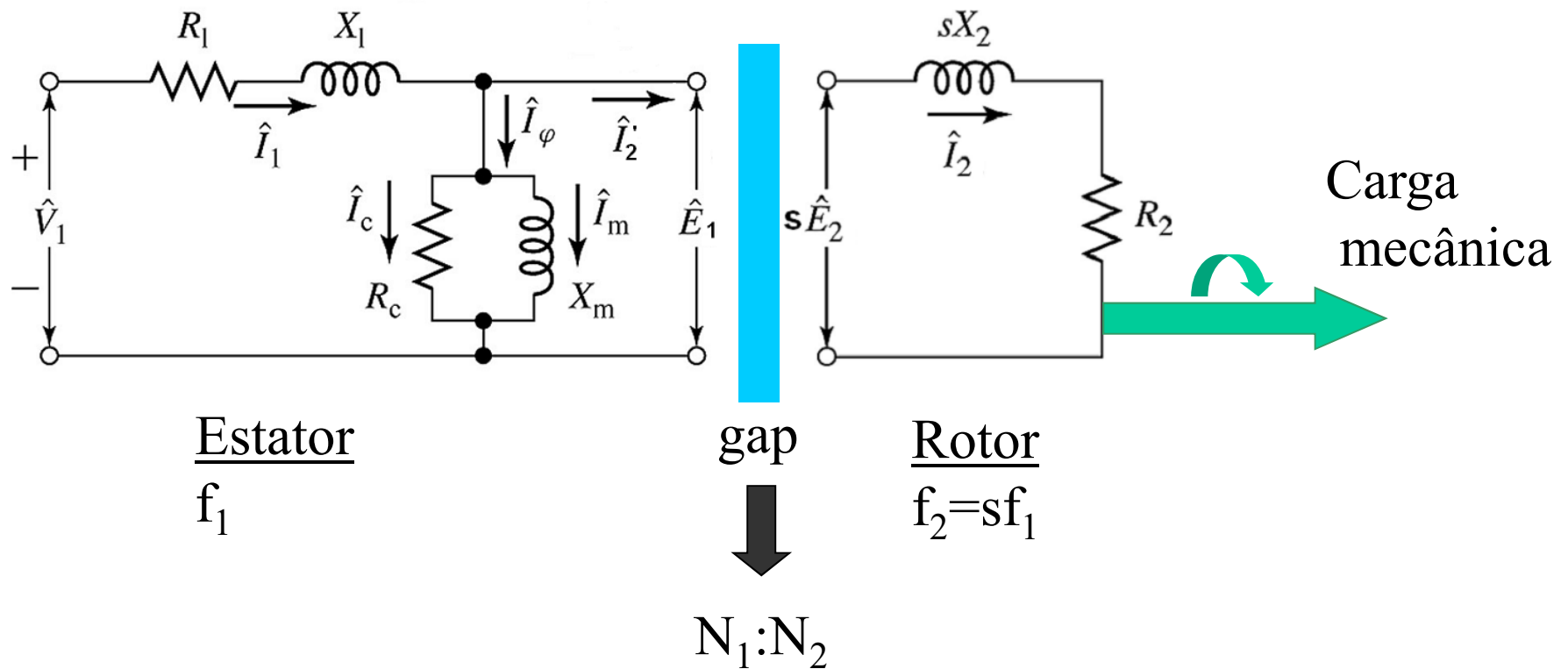
Circuito Equivalente Estator-Rotor



É um circuito difícil de ser analisado por duas razões:

- Tem frequências diferentes: I_2 e I_2' representam a mesma corrente (da carga), mas estão em frequências diferentes;
- Estão separados pelo campo magnético em primário e secundário, devendo respeitar a relação de espiras $a = N_1/N_2$

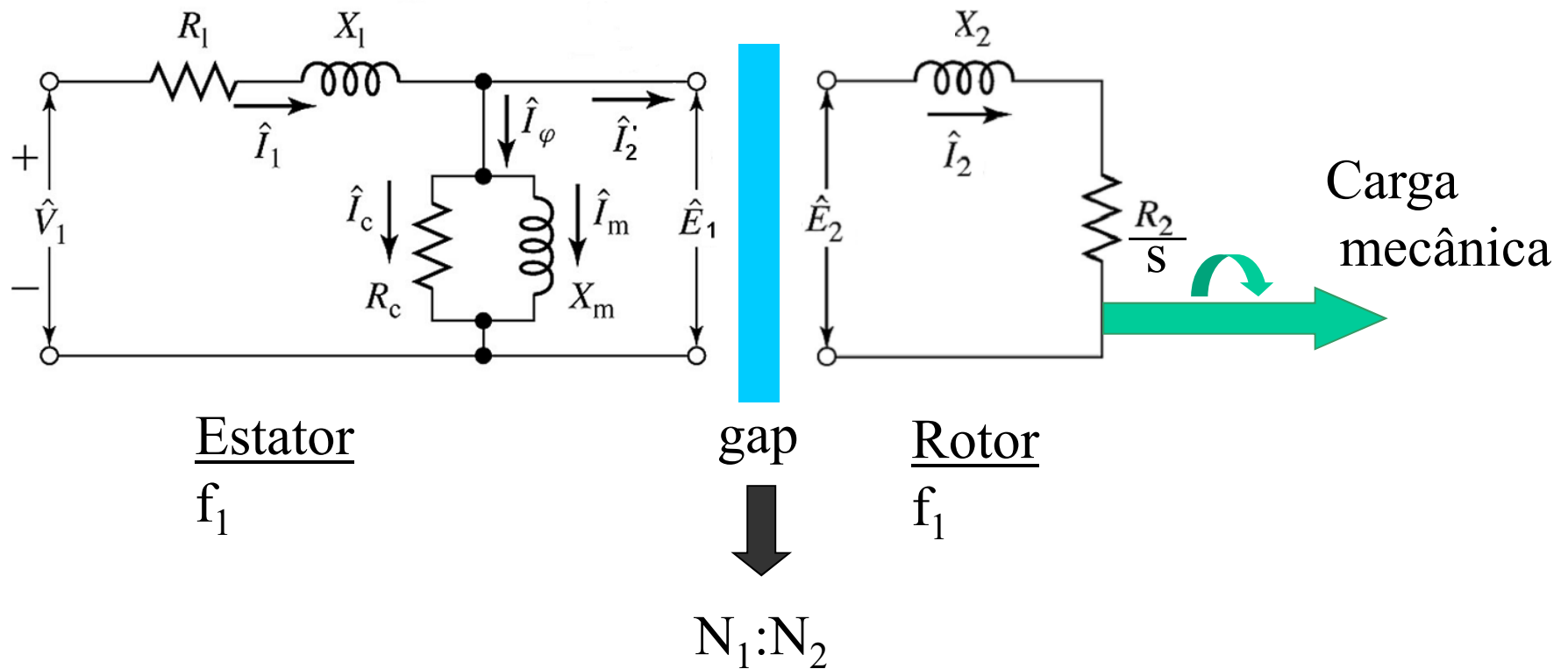
Circuito Equivalente Estator-Rotor



Circuito do rotor representado na mesma frequência do estator:

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$

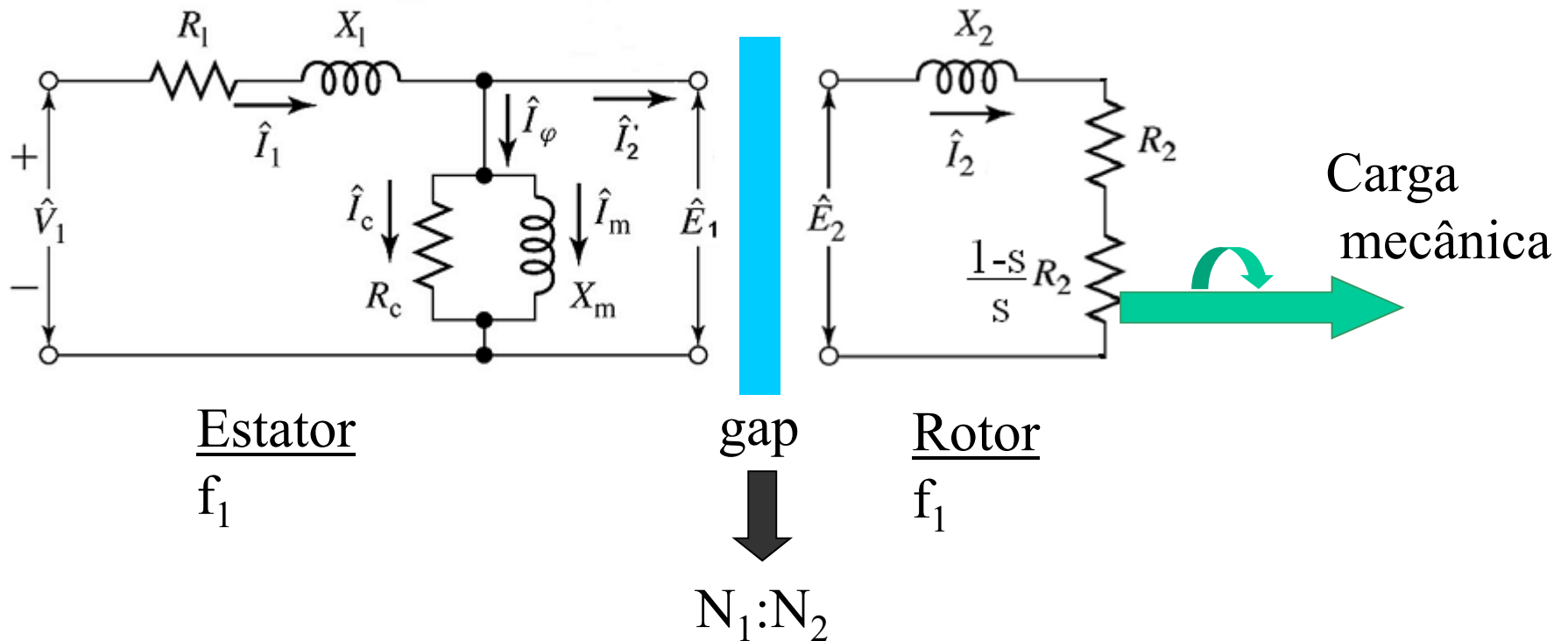
Circuito Equivalente Estator-Rotor na Mesma Frequência



- R_2/s depende da carga mecânica;
- R_2/s pode ser dividida em:

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \left(\frac{R_2}{s} - R_2\right) = R_2 + \frac{1-s}{s} R_2$$

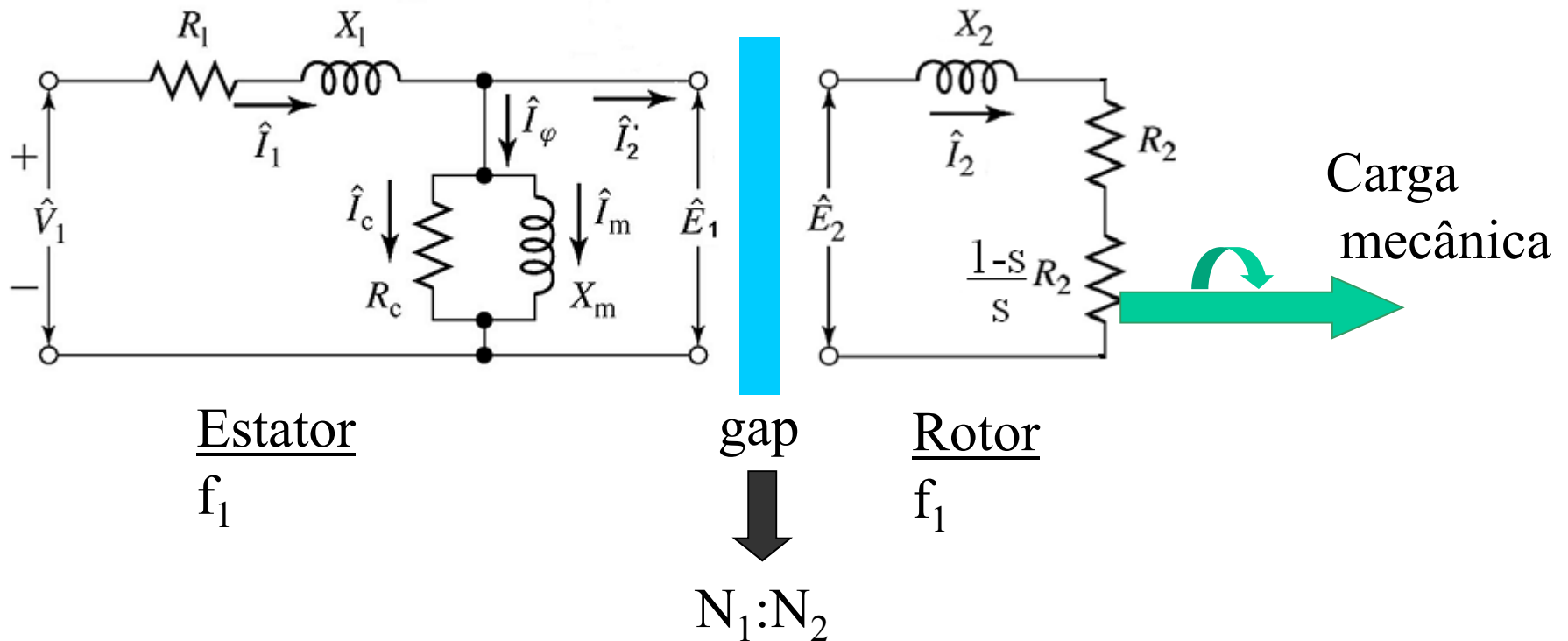
Circuito Equivalente Estator-Rotor na Mesma Frequência



- R_2 representa as perdas no cobre do enrolamento do rotor
 $P_{\text{cobre}} = R_2 I_2^2$;
- O segundo termo representa a potência mecânica desenvolvida pelo motor (perda rotacional + carga):

$$P_{\text{mec}} = \frac{1-s}{s} R_2 I_2^2$$

Circuito Equivalente Estator-Rotor na Mesma Frequência

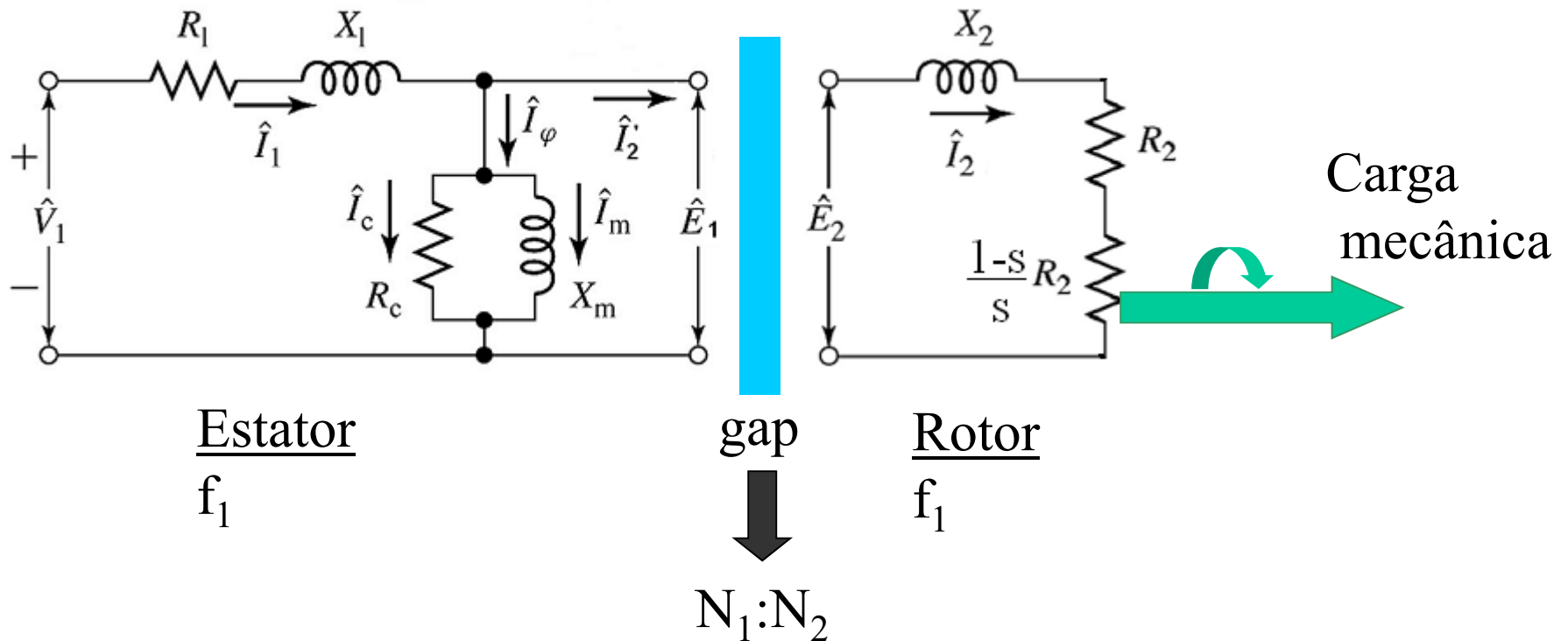


- A potência por fase associada ao rotor é:

$$P_{rotor} = P_g = P_{cobre} + P_{mec} = R_2 I_2^2 + \frac{1-s}{s} R_2 I_2^2 = \frac{R_2}{s} I_2^2$$

- que é transferida do estator para o rotor através do campo magnético do entreferro, por isso é denominada por potência do gap;

Circuito Equivalente Estator-Rotor na Mesma Frequência



➤ Com isso:

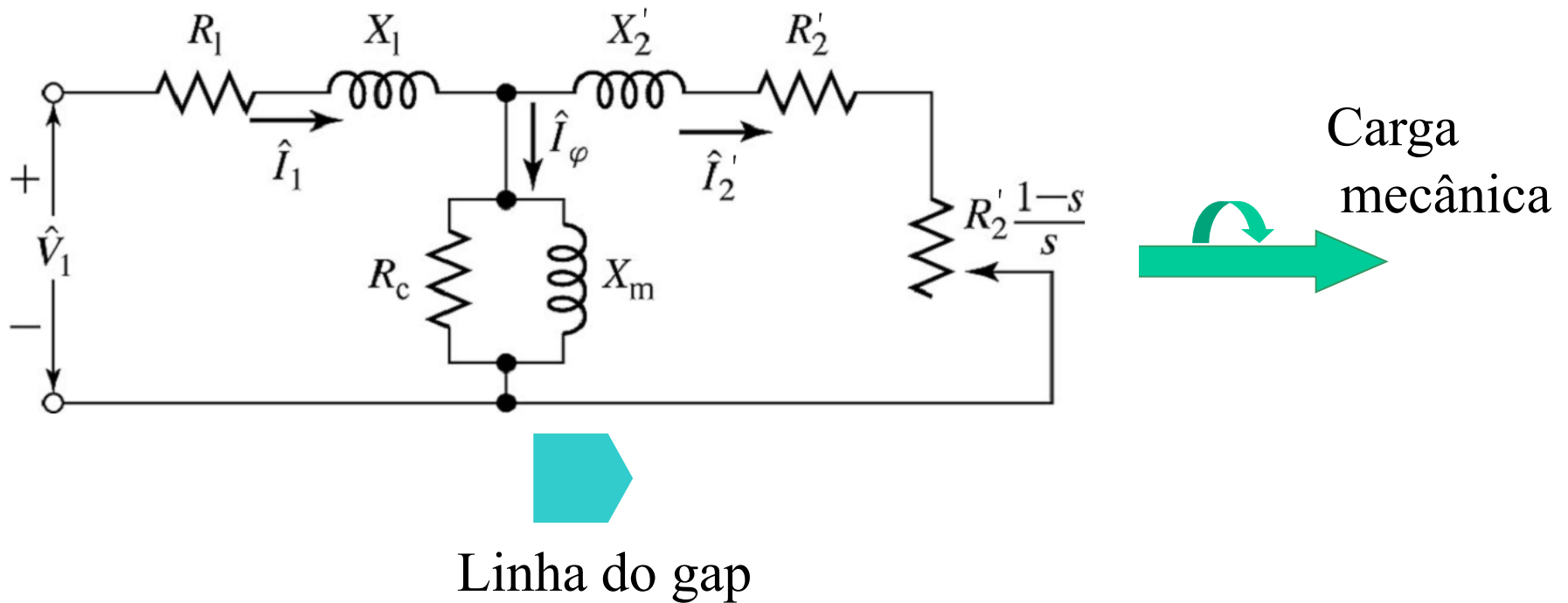
$$P_{cobre} = R_2 I_2^2 = s \frac{R_2 I_2^2}{s} = s P_g$$

A perda no cobre aumenta com o escorregamento

$$P_{mec} = \frac{1-s}{s} R_2 I_2^2 = (1-s) P_g$$

Perdas rotacionais + potência mecânica no eixo

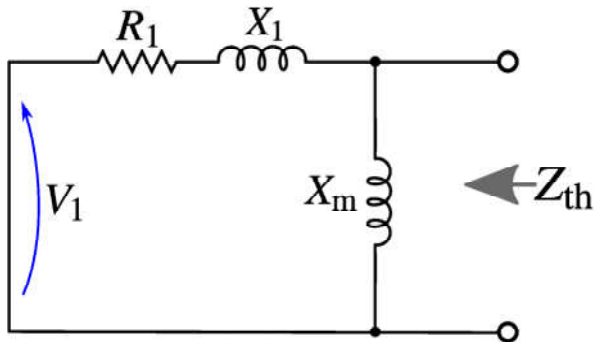
Circuito Equivalente Referido ao Estator



- Com isso, o circuito fica representado na mesma frequência e refletido para um único lado, o lado do estator;
- Deve ser lembrado que a transferência de energia se dá pelo campo magnético do gap, mas isto não necessita ser explicitamente representado no circuito equivalente;

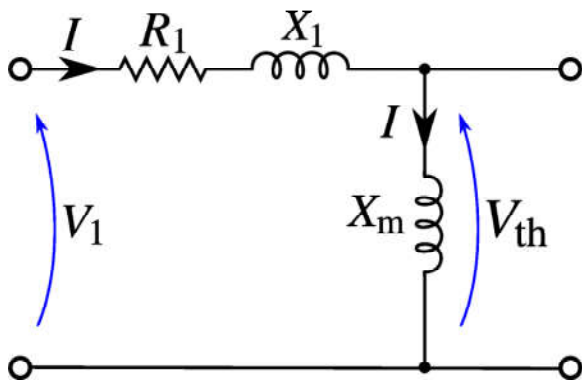
Circuito Equivalente de Thévenin por fase

- Impedância de Thévenin vista dos terminais do rotor:



$$Z_{th} = jX_m // (R_1 + jX_1) = R_{th} + jX_{th}$$

- Tensão de Thévenin:

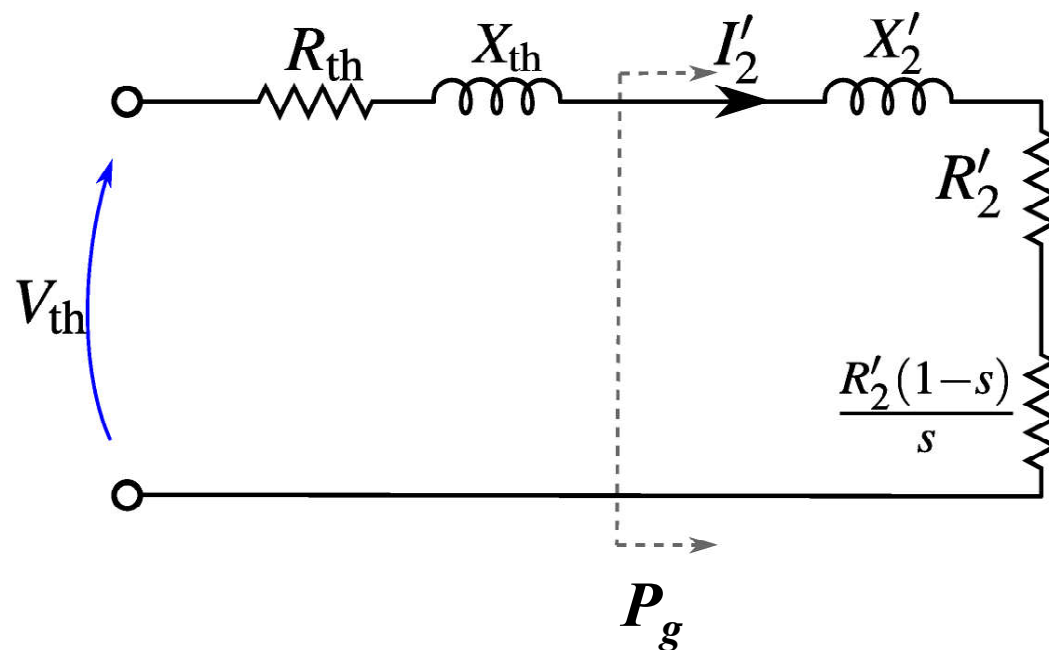


$$I = \frac{V_1}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

$$V_{th} = jX_m I = \frac{jX_m V_1}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

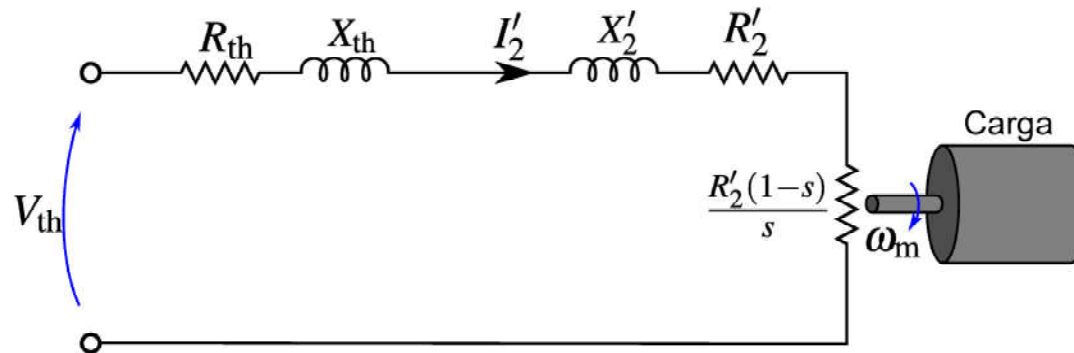
Circuito Equivalente de Thévenin por fase

- Circuito equivalente:



Característica Torque x Velocidade

- Considerando o modelo equivalente de Thévenin:



- O torque desenvolvido por fase é dado por:

$$T_{\text{mec}} = \frac{P_{\text{mec}}}{\omega_m} = \frac{1}{\omega_m} \frac{1-s}{s} R'_2 I_2'^2$$

Onde $\omega_m = \frac{2\pi n}{60} = (1-s)\omega_s$

- Daí: $T_{\text{mec}} = \frac{1}{(1-s)\omega_s} \frac{1-s}{s} R'_2 I_2'^2 = \frac{1}{\omega_s} \frac{R'_2}{s} I_2'^2 = \frac{P_g}{\omega_s} \quad \text{ou} \quad \frac{P_{\text{mec}}}{\omega_m}$

Característica Torque x Velocidade

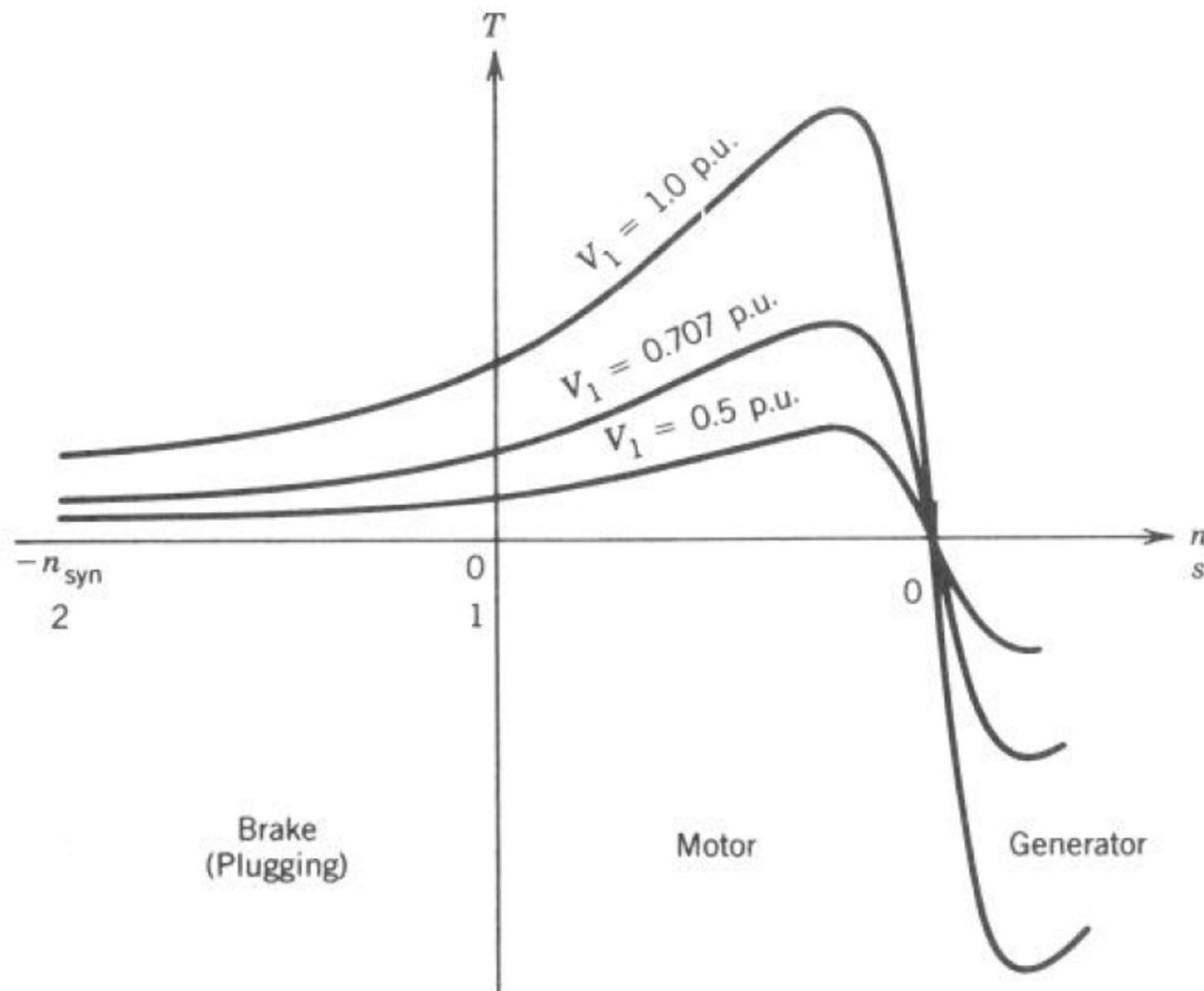
- Cálculo de I_2' :
$$I_2' = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{th} + X_2'\right)^2}}$$

- Daí:
$$T_{mec} = \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{th} + X_2'\right)^2} \frac{R_2'}{s}$$

Torque por fase.

Característica Torque x Velocidade

- A característica $T \times s$ varia com a tensão terminal (V_{th}^2):



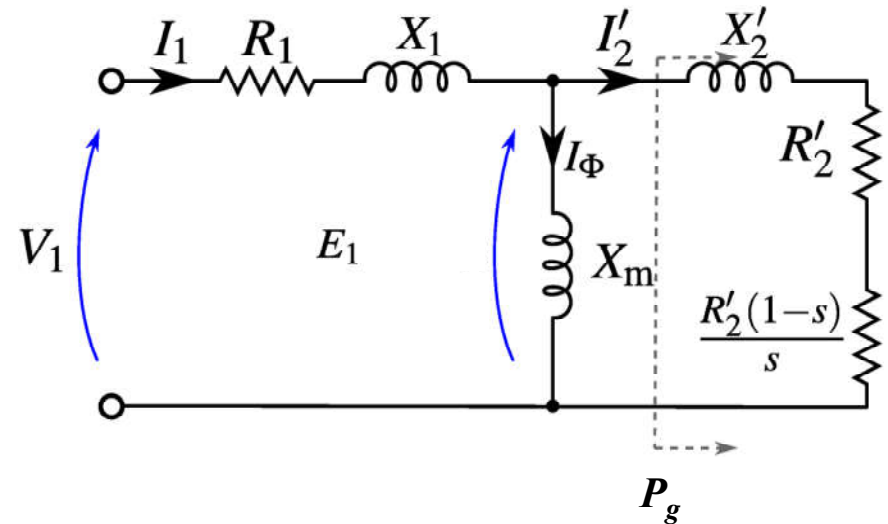
- Nota: a tensão terminal pode ser ajustada para controlar a velocidade da máquina.

Corrente do Estator

Considerando o circuito equivalente de uma MI, a impedância total vista pela fonte é:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + jX_m \parallel \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)$$

$$Z_1 = |Z_1| \angle \theta_1$$



Assim, a corrente do estator é: $I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I_\Phi + I_2'$

Corrente do Estator

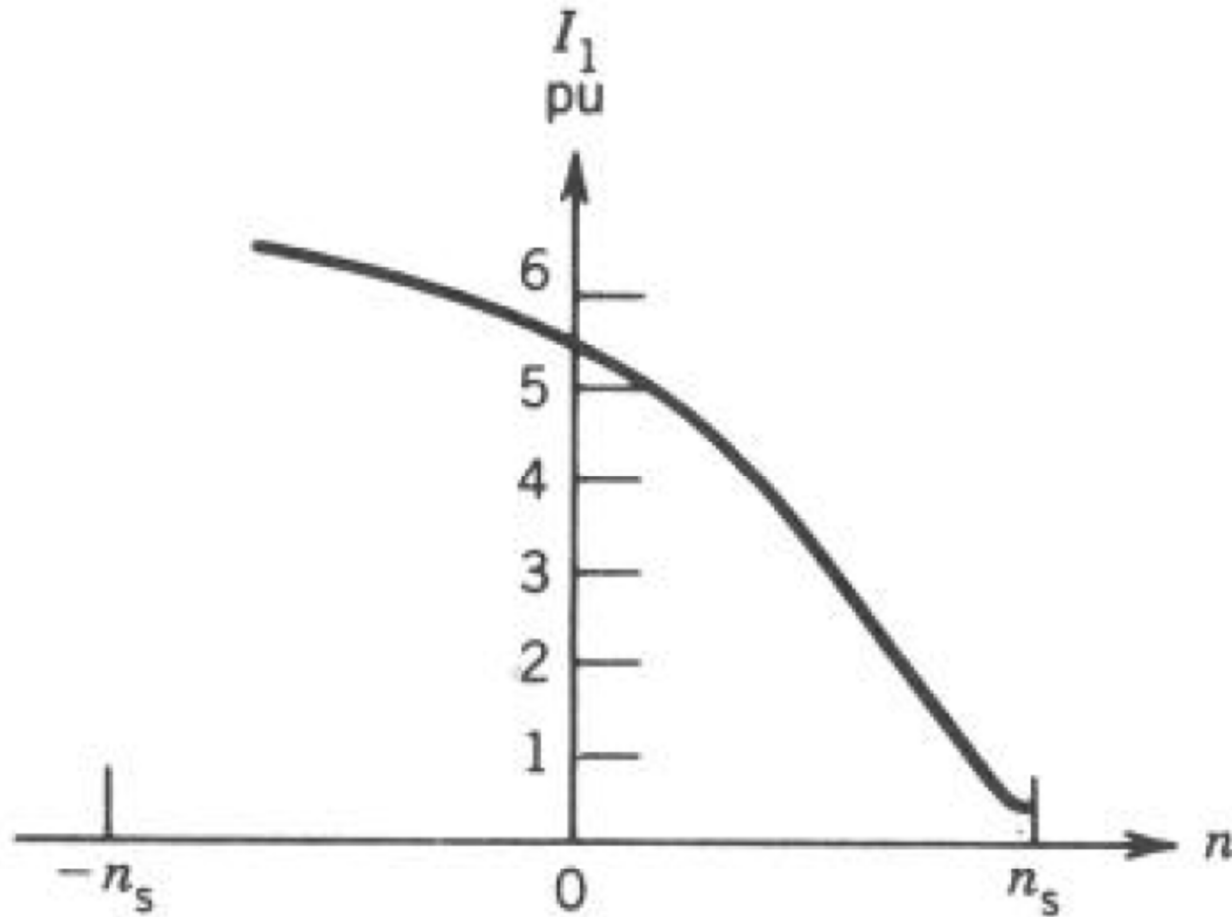
- para $n = n_s$ ($s = 0$) – máquina operando na velocidade síncrona – temos

$$R_2'/s \rightarrow \infty \quad \rightarrow I_2' = 0 \quad \text{e} \quad I_1 = I_\Phi \quad (\text{sendo que a corrente de magnetização é igual a 30 a 50\% da corrente nominal})$$

- para $n = 0$ ($s = 1$) - máquina parada - a magnitude de $Z_2' = R_2'/s + j X_2'$ é muito baixa, e assim a magnitude de I_2' será muito alta. Consequentemente, $I_1 = I_2' + I_\Phi$ será elevada na partida (usualmente de 5 a 8 vezes a corrente nominal)

- para $n < 0$ - velocidade negativa, ou seja, contrário ao campo girante, a corrente será ainda maior, pois aumentará a velocidade relativa do campo sobre as bobinas do rotor, aumentando a corrente induzida.

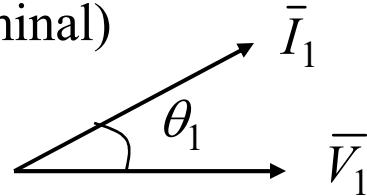
Corrente do Estator



Em caso de motores de grande porte, é necessário empregar algum método de partida para reduzir a corrente, evitando que elevadas correntes sejam exigidas da rede.

Fator de Potência

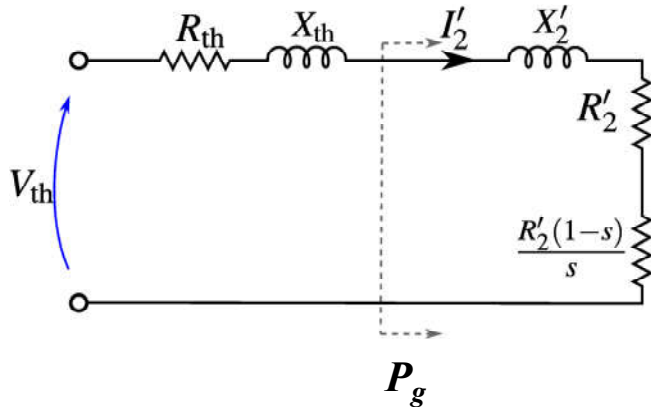
- É dado pelo cosseno do ângulo entre a tensão de alimentação (terminal) e a corrente do estator (terminal)



- Ou seja, o fator de potência é dado pelo cosseno do ângulo da impedância total (equivalente) vista da fonte: $Z_1 = |Z_1| \angle \theta_1$

$$FP = \cos \theta_1$$

- Com base no circuito equivalente, temos:



$$\cos \theta_1 = \frac{R_{th} + R'_2 / s}{\sqrt{(R_{th} + R'_2 / s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}}$$

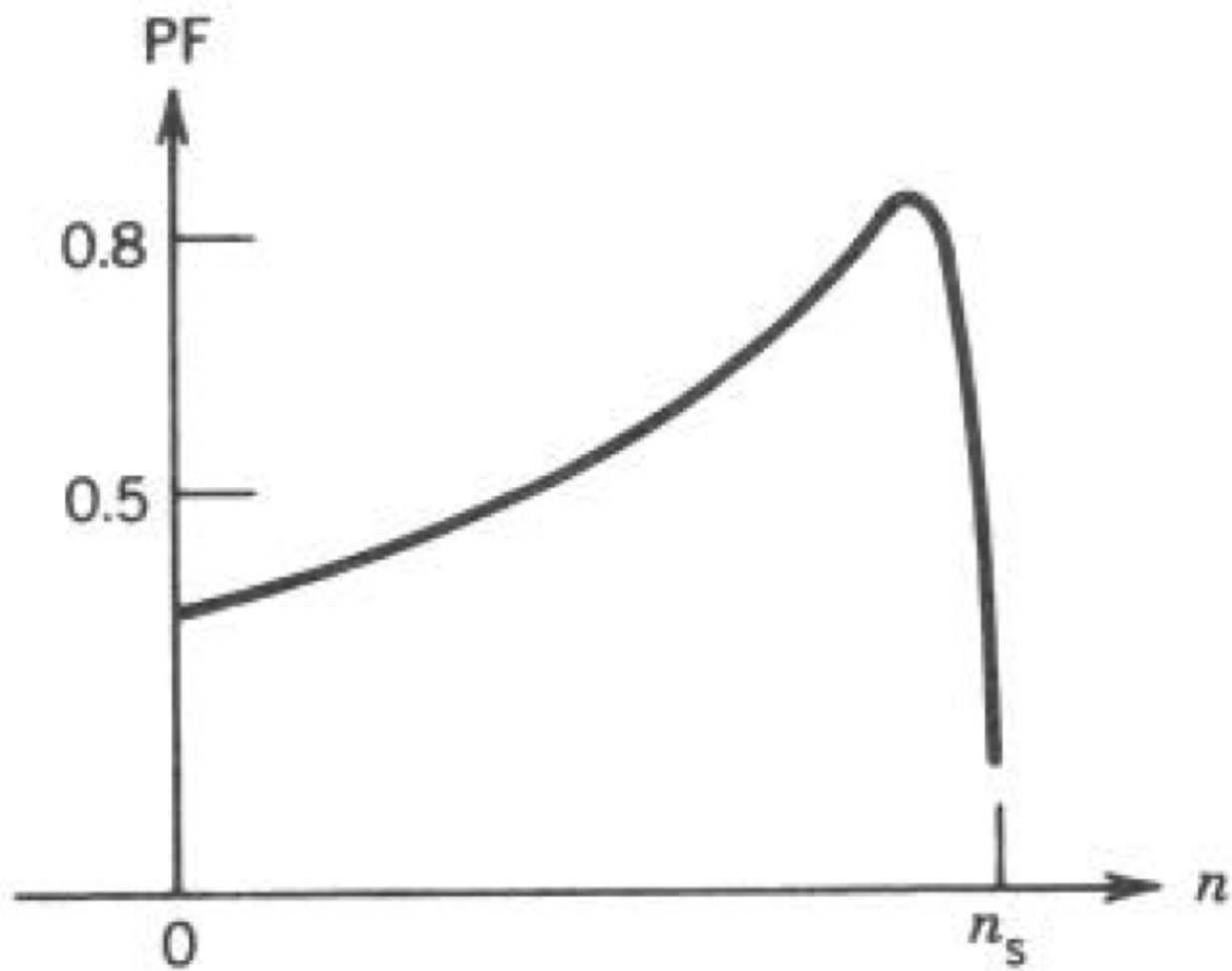
onde:

$$R_{TH} = \left(\frac{R_s X_m^2}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} \right)$$

$$X_{TH} = \left(\frac{X_m (R_s^2 + X_s^2 + X_s X_m)}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} \right)$$

- Portanto, o fator de potência varia com a velocidade do rotor (escorregamento)

Fator de Potência



Rendimento

- $n = P_{\text{saida}} / P_{\text{entrada}}$

Para operação como motor:

$$P_{\text{entrada}} = 3VI \cos \theta_1 \text{ (trifásica)}$$

P_{saida} é a potência de entrada menos as perdas no cobre (do estator e do rotor), no núcleo (do estator e do rotor) e perdas por atrito, resistência ao ar e ventilação.

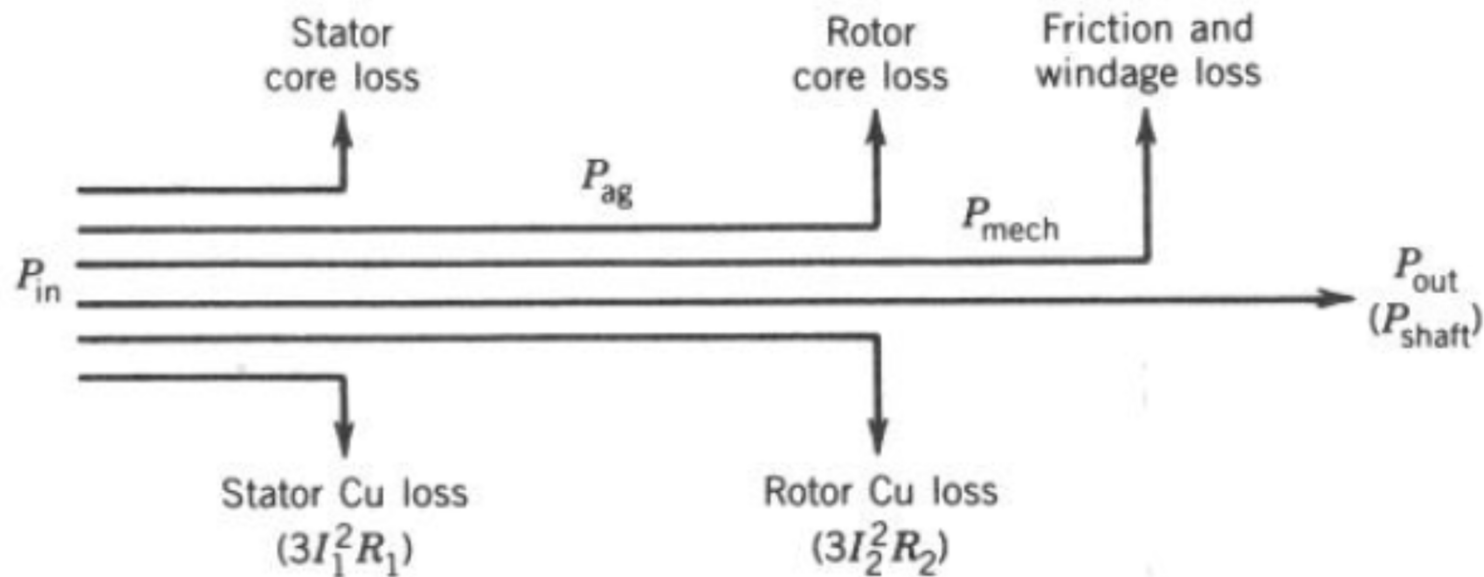


FIGURE 5.21 Power flow in an induction motor.

Rendimento

- A eficiência é altamente dependente do escorregamento da máquina, isto pode ser verificado considerando-se apenas as perdas na resistência do rotor. Neste caso temos:

$$P_{\text{entrada}} = P_g$$

$$P_{\text{perdas, rotor}} = R_2 I_2^2 = s P_g$$

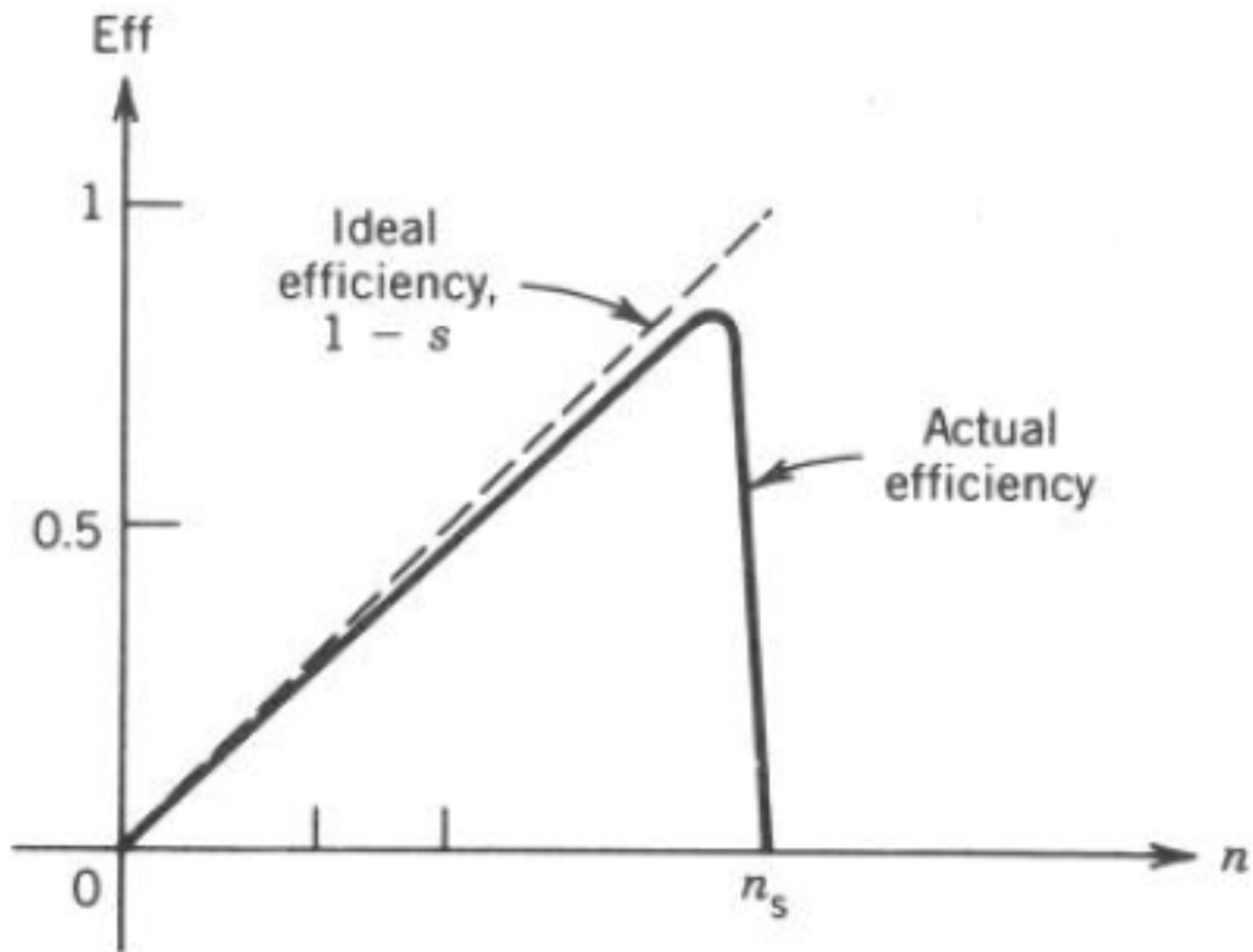
$$P_{\text{saída}} = (1 - s) P_g$$

Portanto, temos: $\eta = (1-s)P_g/P_g = 1 - s$

O qual é definido como eficiência ideal ou eficiência interna, sendo seu valor baixo para altos valores de escorregamento.

- Com a inclusão das demais perdas, a eficiência real da máquina sempre será menor do que a eficiência interna
- Para manter alta eficiência, o motor de indução deve operar próximo à velocidade síncrona.

Rendimento



Importância do Circuito Equivalente

- Com o circuito equivalente e seus respectivos parâmetros, podemos calcular diversas características de desempenho da máquina:
 - Relação Torque *versus* Velocidade
 - Corrente de partida
 - Fator de potência
 - Rendimento

Exemplo 2

Um motor de indução trifásico, 460 V, 1740 rpm, 60 Hz, 4 polos, rotor bobinado tem os seguintes parâmetros (por fase):

$$R_1=0,25 \Omega \qquad R_2'=0,2 \Omega$$

$$X_1=X_2'=0,5 \Omega \qquad X_m=30 \Omega$$

As perdas rotacionais são de 1700 W. Com o rotor curto-circuitado, encontre:

- (a)
 - (i) corrente de partida quando ligado à tensão nominal;
 - (ii) torque de partida;
- (b)
 - (i) escorregamento à velocidade nominal;
 - (ii) corrente à velocidade nominal;
 - (iii) razão entre as correntes de partida e de carga nominal;
 - (iv) fator de potência à velocidade nominal;
 - (v) torque à velocidade nominal;
 - (vi) eficiência interna e eficiência do motor à velocidade nominal;

Exemplo 3

Um motor de indução trifásico, de 460 V, 1710 rpm, 60 Hz e 4 polos apresenta corrente de partida de seis vezes o valor nominal para a corrente no rotor a plena carga. Determine o torque de partida como percentual do torque a plena carga.