

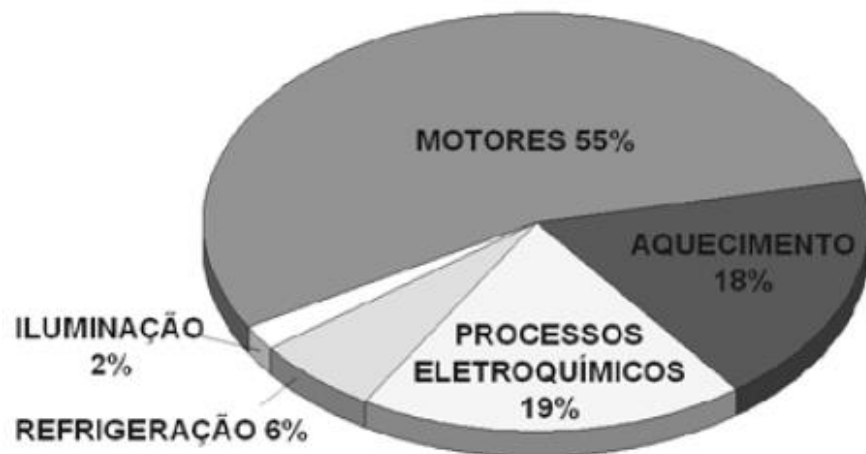
# Circuitos Eléctricos II

---

Aula 4

# Introdução

- Motores de indução trifásicos (MIT) são máquinas elétricas rotativas;
- Comportam-se de maneira similar aos transformadores;
- Responsáveis por mais da metade da energia elétrica consumida por indústrias.

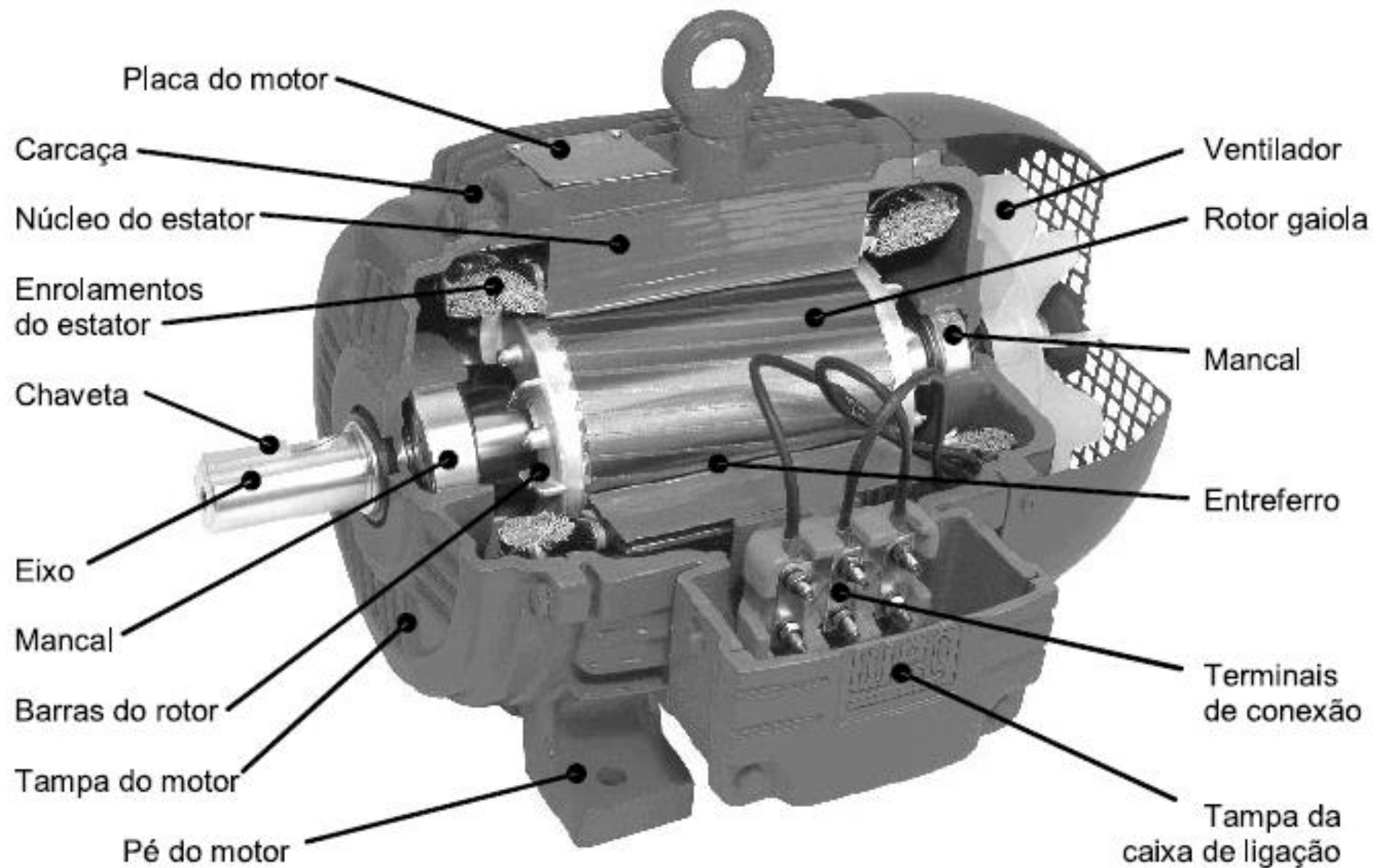


Fonte: (MARQUES; HADDAD; MARTINS, 2006)



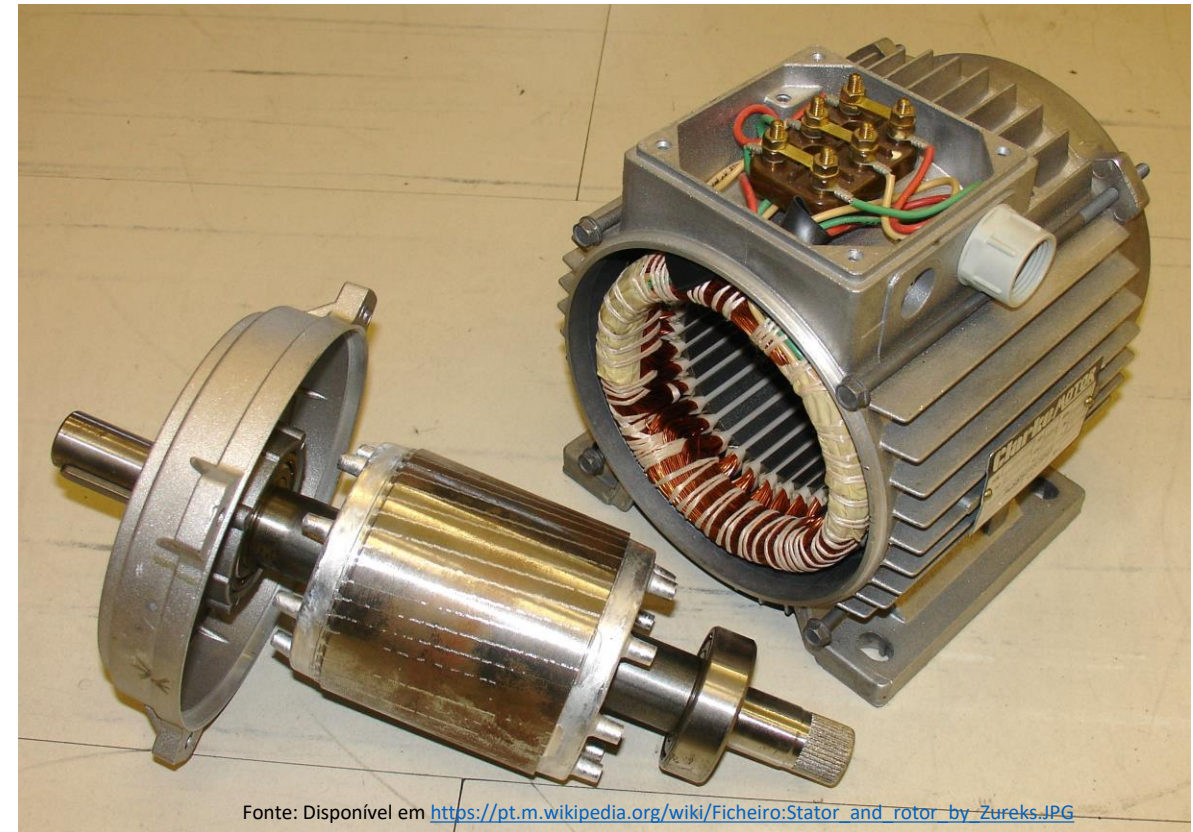
Fonte: Disponível em [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam\\_Ahoy\\_Europort\\_2011\\_\(14\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam_Ahoy_Europort_2011_(14).JPG)

# Construção



# Partes principais

- Estator
  - Parte estática da máquina;
  - Possui enrolamento trifásico com defasagem de  $120^\circ$  entre as bobinas, que podem ser conectadas em Y ou  $\Delta$ ;
  - Quando alimentado por uma fonte trifásica, há a produção de um campo magnético girante que induz tensão no rotor.
- Rotor:
  - Parte rotativa da máquina;
  - Possui enrolamentos (motor bobinado) ou barras paralelas (gaiola de esquilo). Em ambos os casos, o rotor deve ser curto-circuitado para permitir a passagem das correntes induzidas.
  - As correntes induzidas criam um campo magnético no rotor em oposição à variação do campo do estator, resultando em torque e consequente giro do seu eixo.

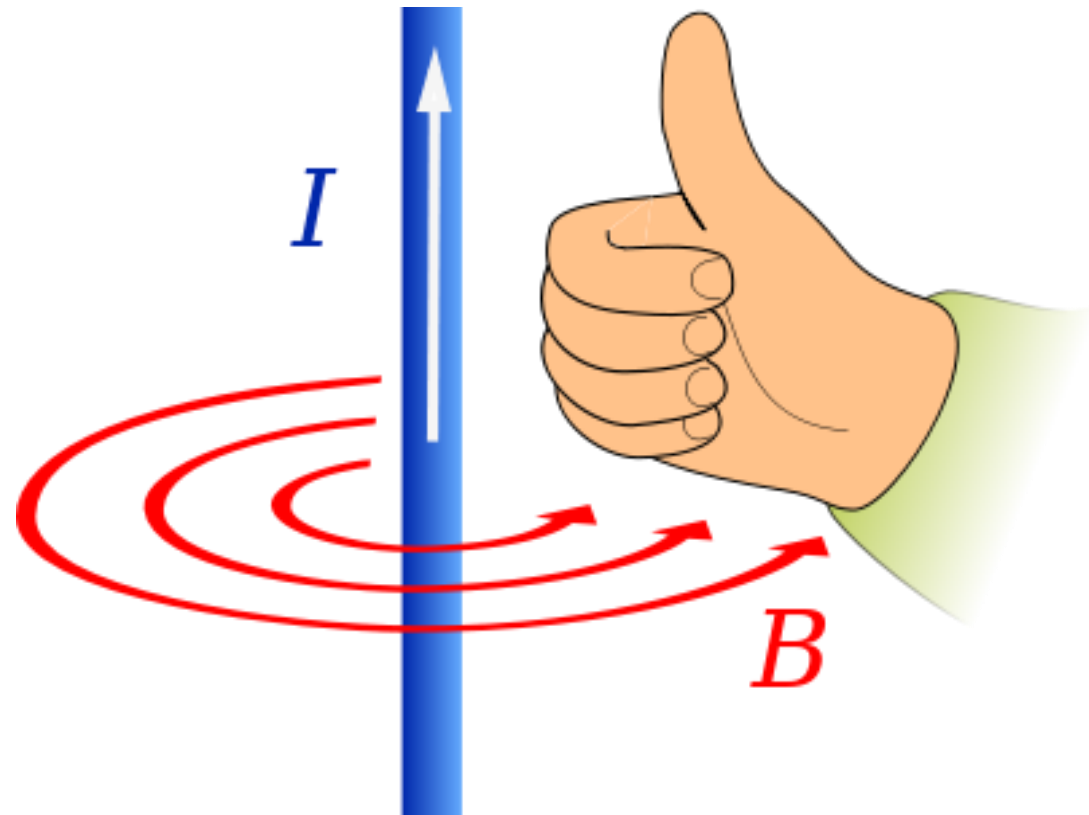


Fonte: Disponível em [https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Stator\\_and\\_rotor\\_by\\_Zureks.JPG](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Stator_and_rotor_by_Zureks.JPG)



# Campo magnético em um condutor

- A direção do campo magnético é determinada pela regra da mão direita.
- No caso em que a corrente é contínua, o campo magnético também será contínuo e terá sempre o mesmo sentido.
- No caso em que a corrente é alternada, o campo magnético também será alternado, isto é, haverá inversão de sentido do campo magnético.



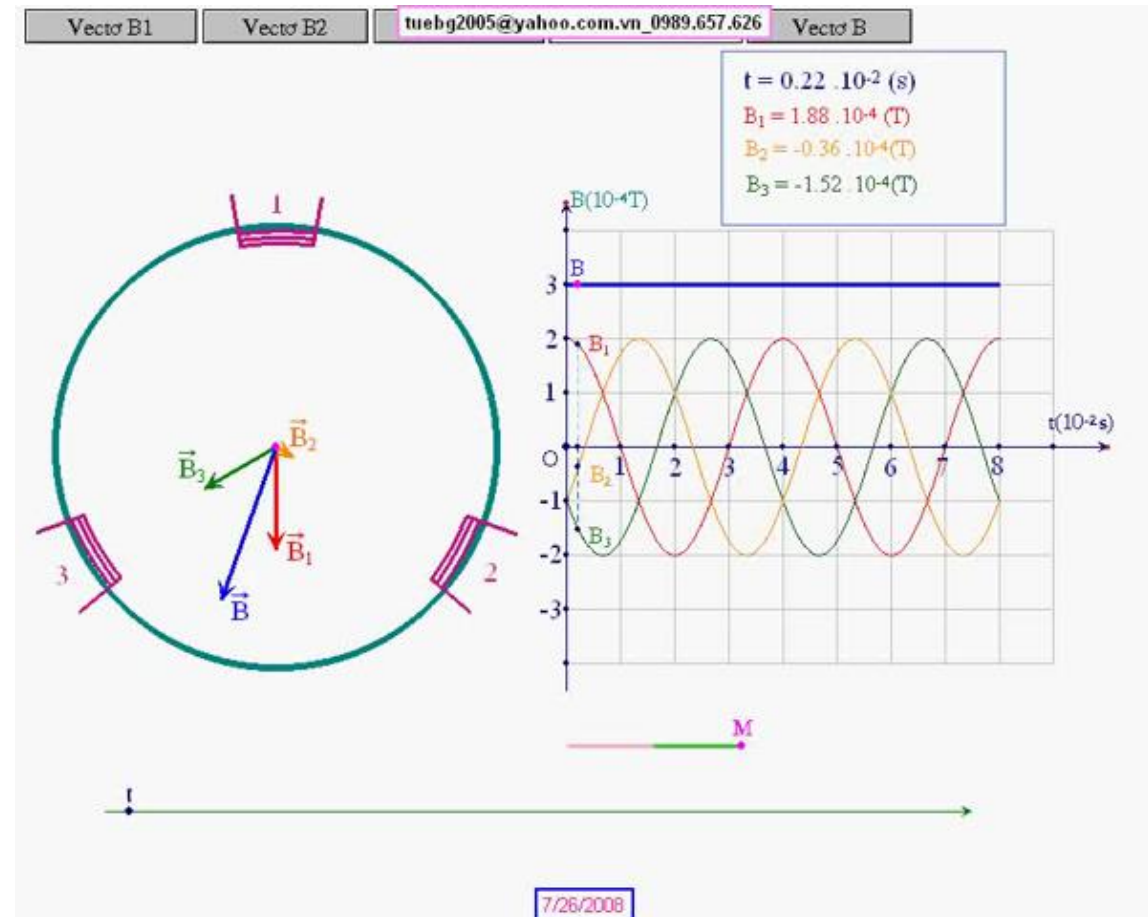
Fonte: Disponível em <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Manoderecha.svg>

# Campo magnético girante

- Campo magnético resultante quando o motor é alimentado por tensões trifásicas.
- Possui módulo e velocidade constantes.

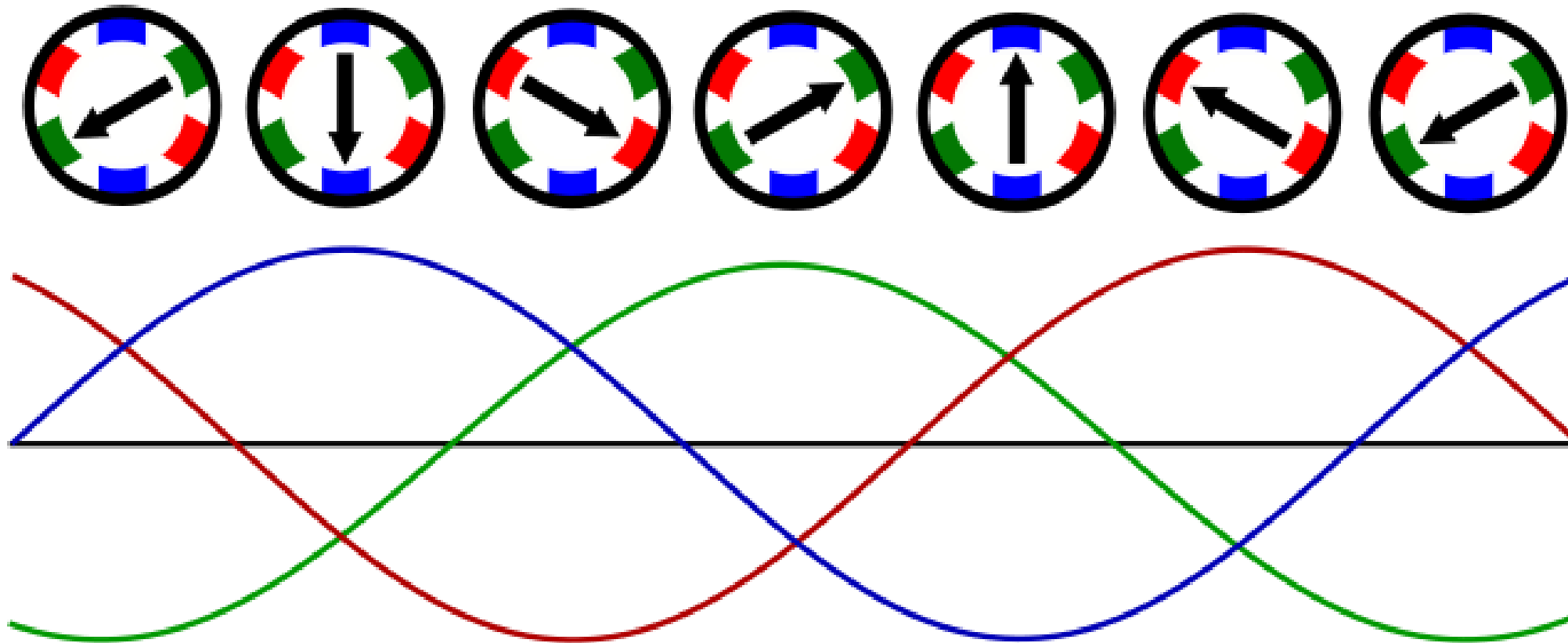


Fonte: Disponível em <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Induction-motor-3a-partial.gif#/media/File:Induction-motor-3a-partial.gif>



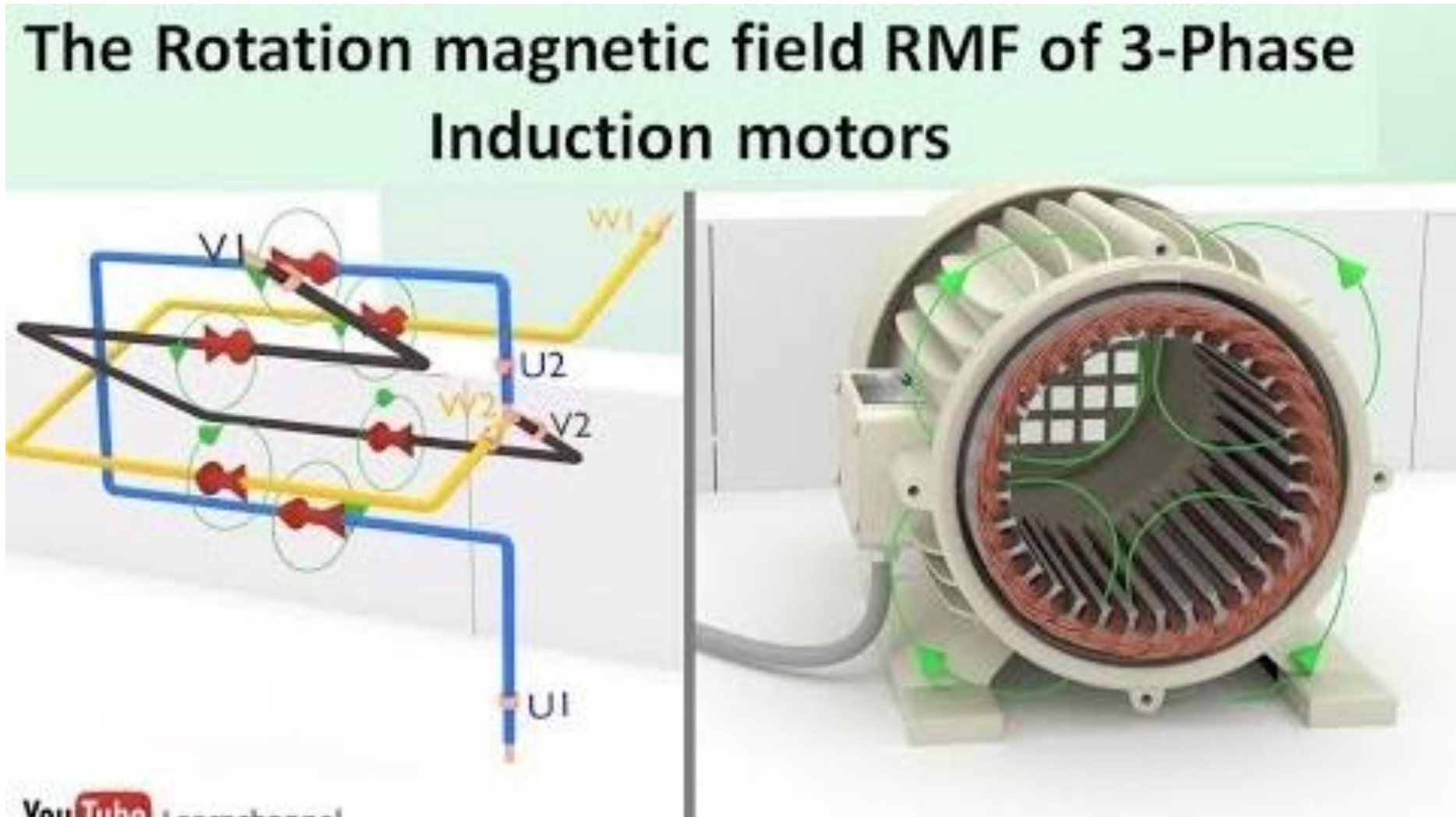
Fonte: Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=eQk00znWTjM>

# Campo magnético girante



Fonte: Disponível em <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Rotating-3-phase-magnetic-field.svg>

# Campo magnético girante – Vídeo





# Características básicas do MIT

- Considerando um motor com  $p$  polos, alimentado por uma tensão trifásica com frequência  $f$  com velocidade  $n$  (em rpm):
  - Velocidade síncrona:  $n_s = \frac{120f}{p}$
  - Escorregamento:  $s = \frac{n_s - n}{n_s}$
  - Velocidade do rotor:  $n = n_s(1 - s)$
  - Frequência da corrente induzida no rotor:  $f_2 = \frac{p(n_s - n)}{120} = sf_1$

# Exemplo

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

- a) A velocidade síncrona e a velocidade do motor;
- b) A velocidade do campo girante no entreferro;
- c) A frequência do circuito no rotor;
- d) O escorregamento em RPM;

$$n_s = \frac{120f}{4} = \frac{120 \times 60}{4} \rightarrow n_s = 1800 \text{ rpm}$$

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

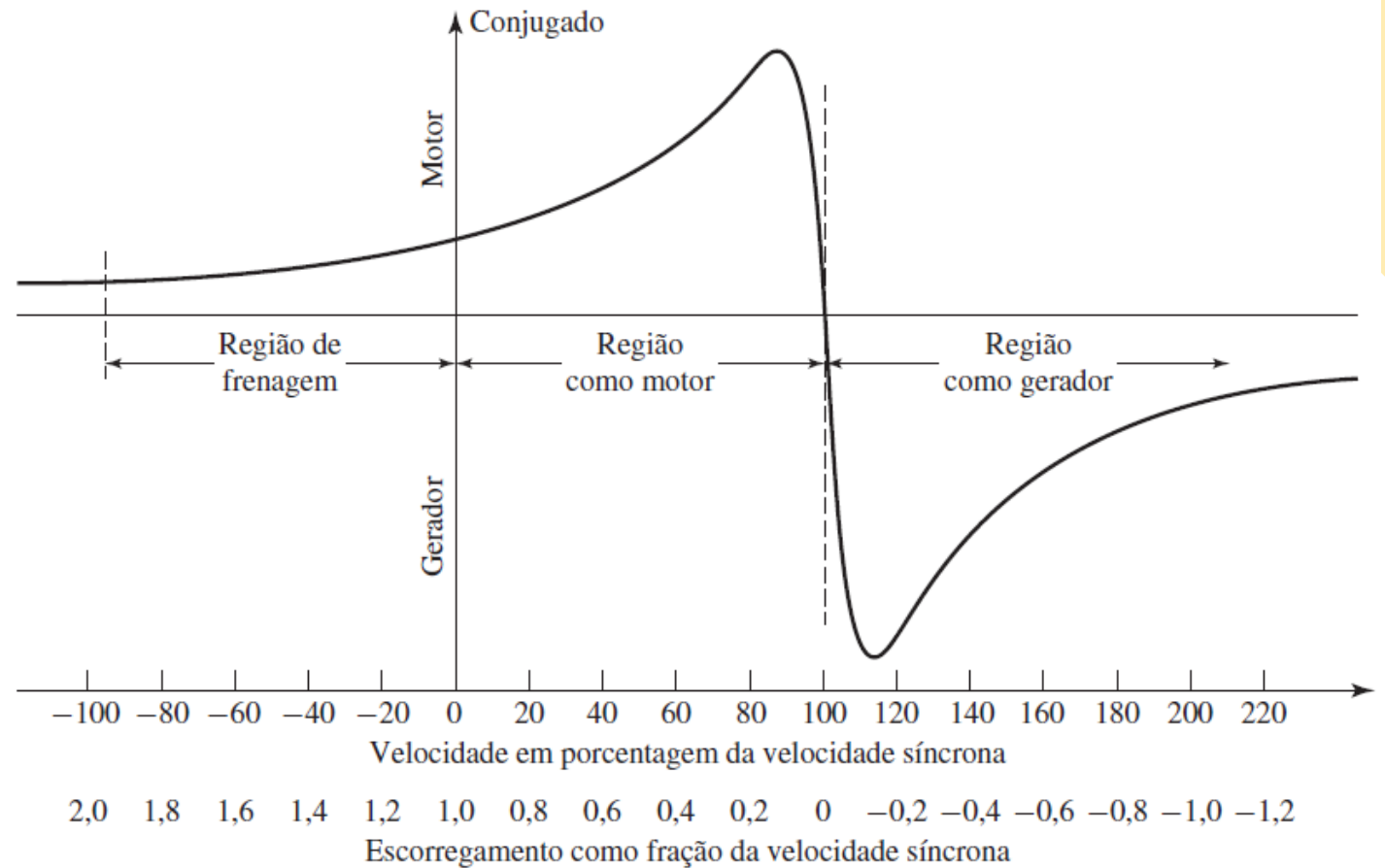
$$n_{cg} = n_s = 1800 \text{ rpm}$$

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

$$s_{rpm} = 1800 - 1710 \rightarrow s_{rpm} = 90 \text{ rpm}$$

# Modos de operação do MIT

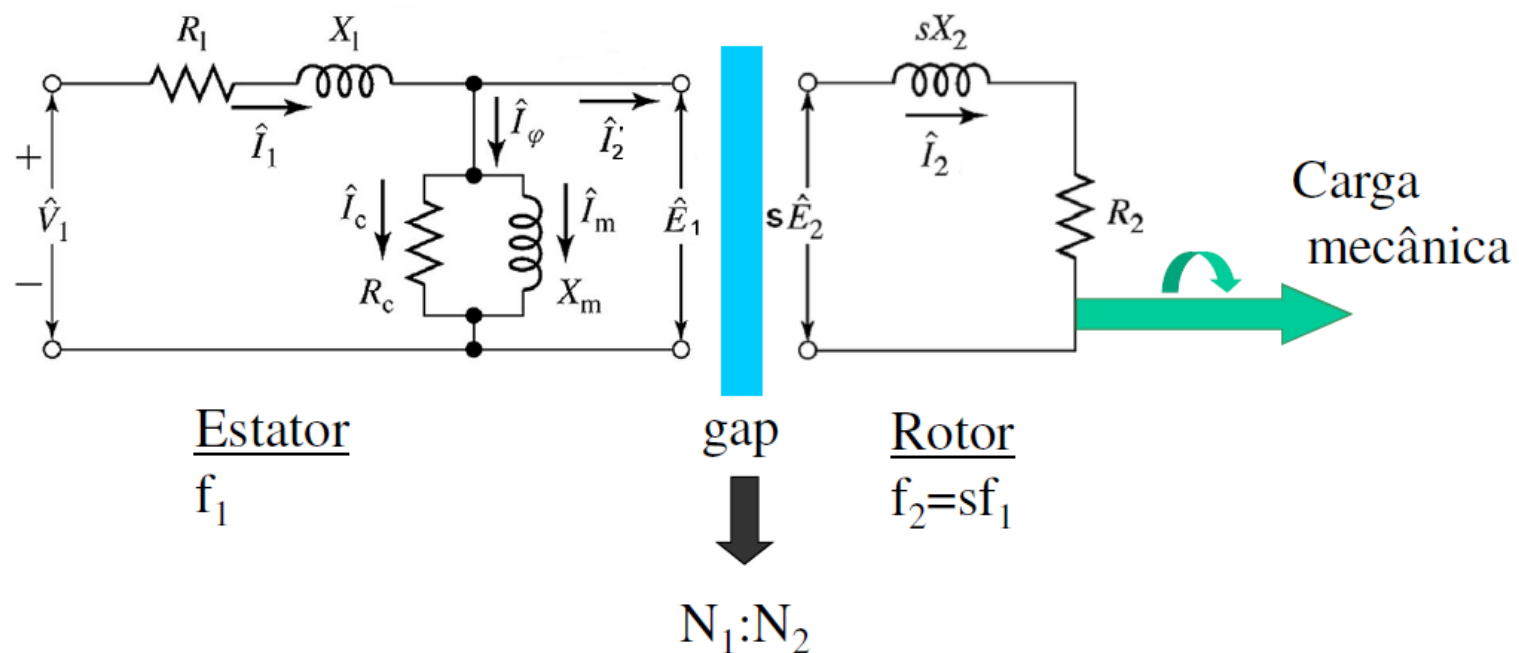
- Motor: o rotor gira na direção do campo girante do estator e  $n < n_s$
- Gerador: o rotor gira na direção do campo girante do estator e  $n > n_s$
- Modo frenante: o rotor gira na direção oposta do campo girante do estator e  $n < 0$



Fonte: (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006)

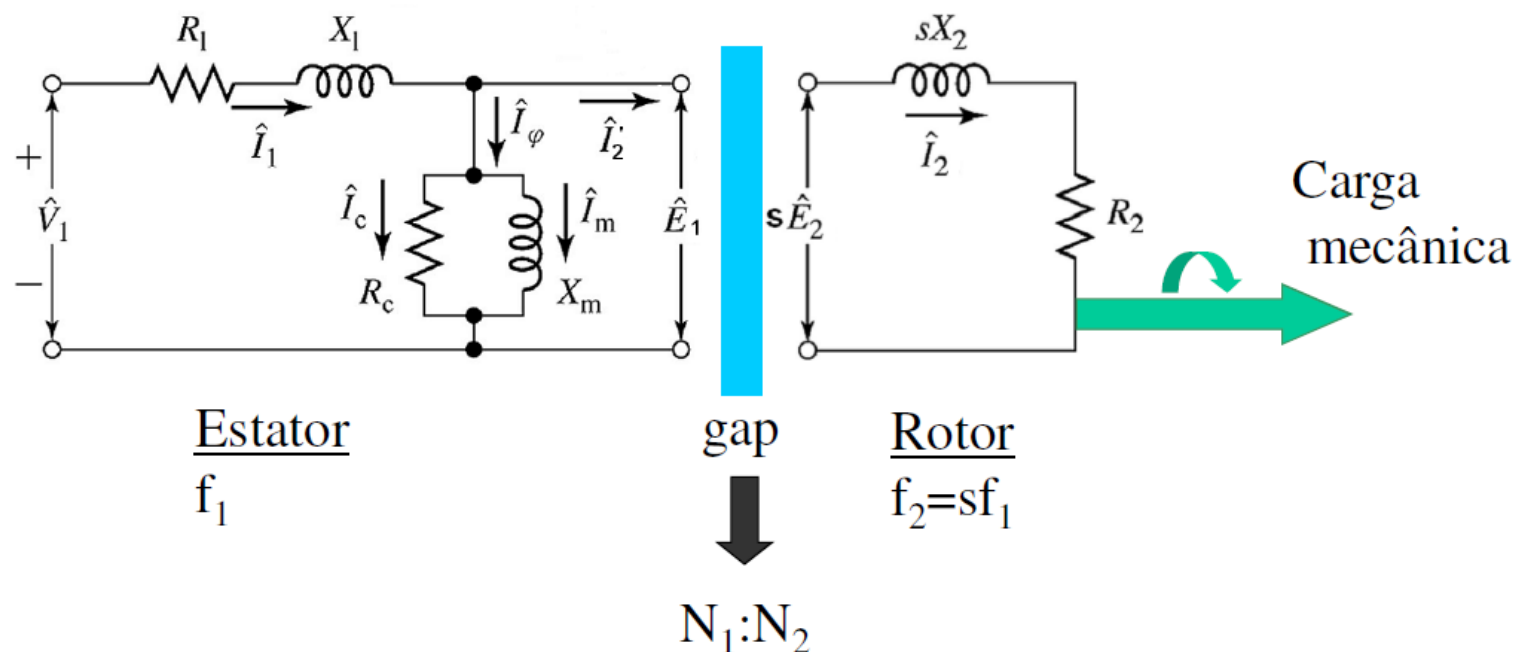
# Circuito equivalente

- $V_1$  é a tensão terminal por fase;
- $E_1$  é a tensão induzida no estator fase;
- $R_1$  é a resistência do enrolamento do estator por fase;
- $X_1$  é a reatância de dispersão do estator por fase;
- $I_1$  é a corrente por fase do estator;
- $f_1$  é a frequência do circuito do estator;
- $X_m$  é a reatância de magnetização por fase;
- $R_c$  é a resistência que indica perdas no núcleo do estator por fase;



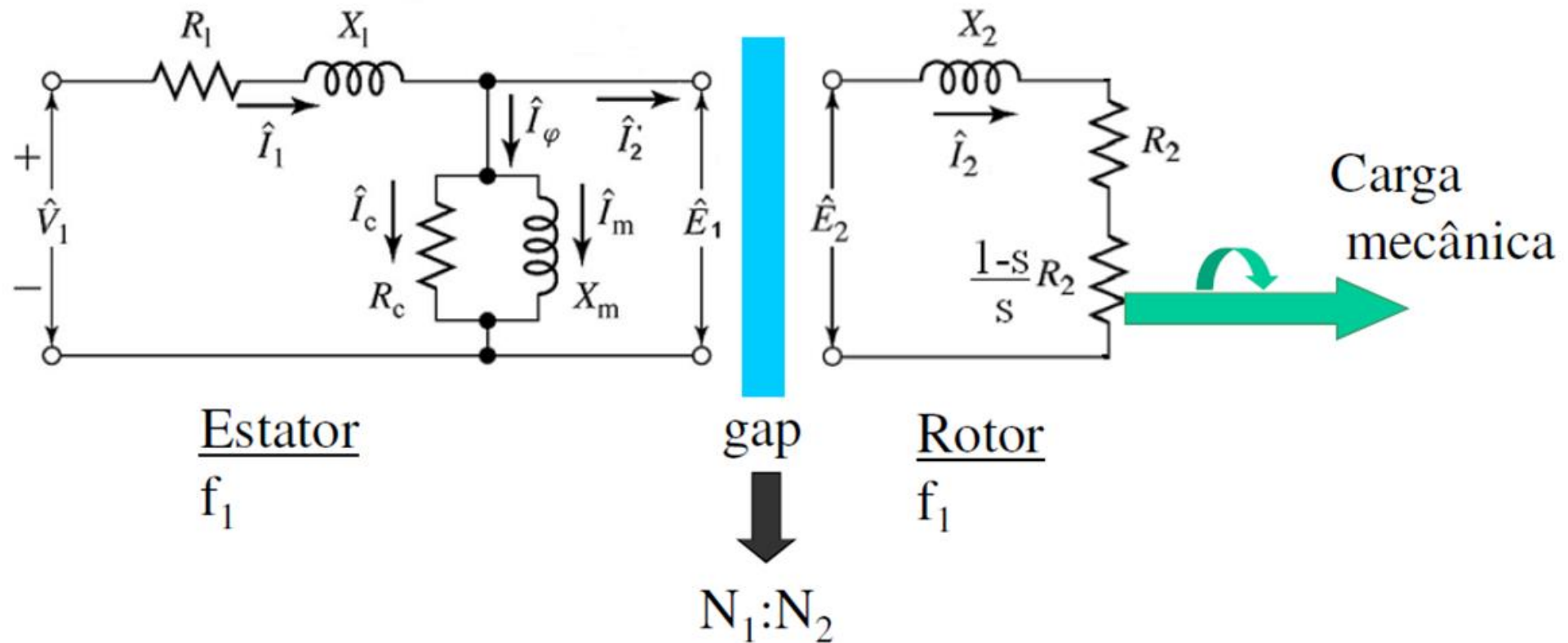
# Circuito equivalente

- $E_2$  é a tensão induzida no rotor parado ( $s = 1$ );
- $R_2$  é a resistência do enrolamento do rotor por fase;
- $X_2$  é a reatância de dispersão do rotor por fase;
- $I_2$  é a corrente por fase do rotor;
- $f_2$  é a frequência do circuito do rotor;
- $a = \frac{N_1}{N_2}$  é a relação de espiras (similar ao transformador)
- **Problema:** Circuito com frequências diferentes e de difícil análise!





# Circuito equivalente – mesma frequência



# Considerações sobre o modelo

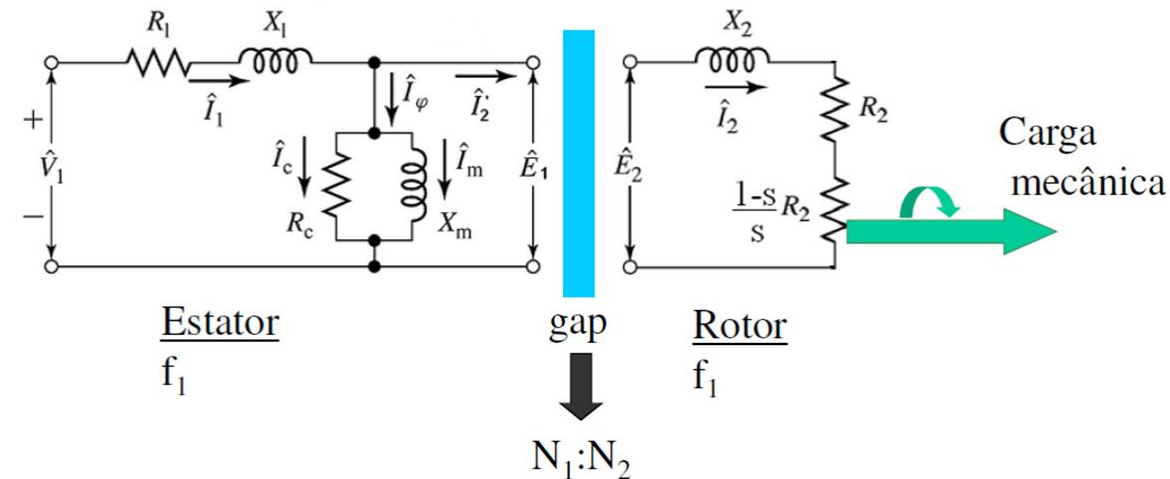
- A resistência  $\frac{1-s}{s} R_2$  depende do escorregamento e representa a carga mecânica no eixo do motor;
- Potência mecânica (fornecida para a carga + perdas rotacionais)

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

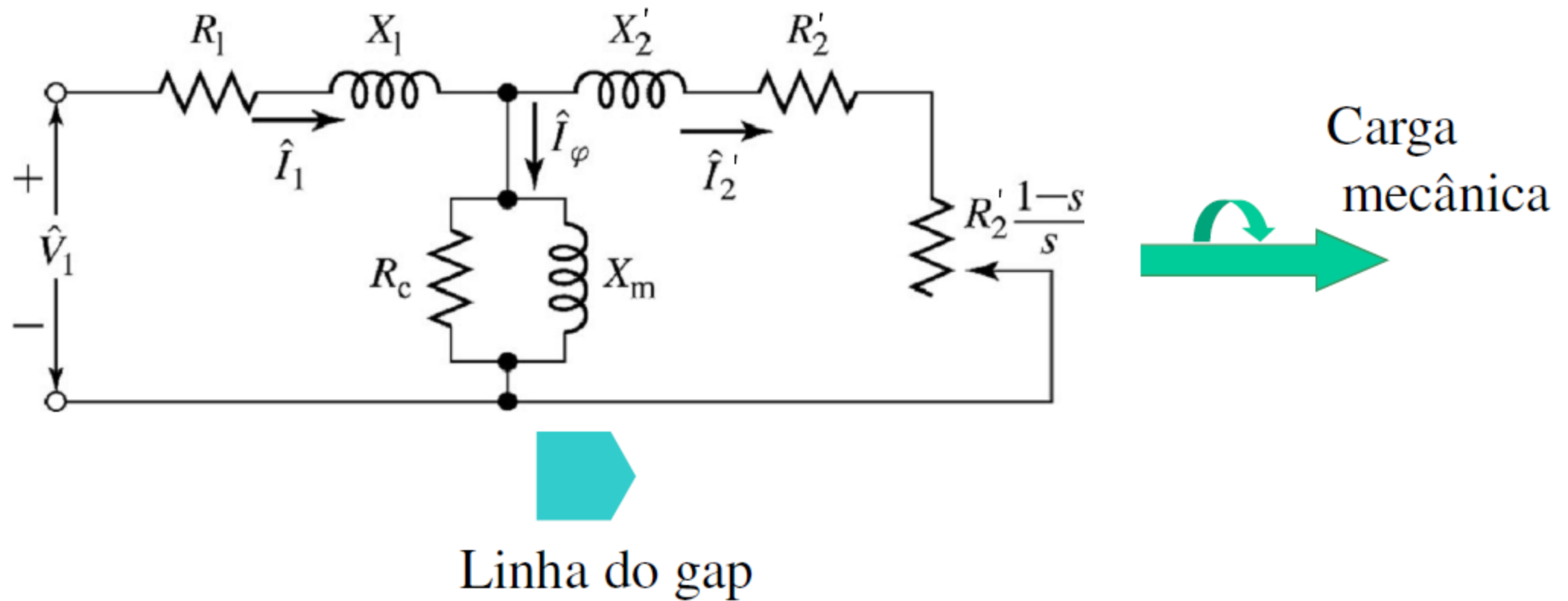
- As potências calculadas nas resistências do modelo do motor indicam as perdas ôhmicas (estator, rotor e núcleo); Ex:  $P_{cobre,rotor} = R_2 I_2^2 = sP_g$
- Potência por fase do rotor:

$$P_{rotor} = P_g = P_{cobre,rotor} + P_{mec}$$

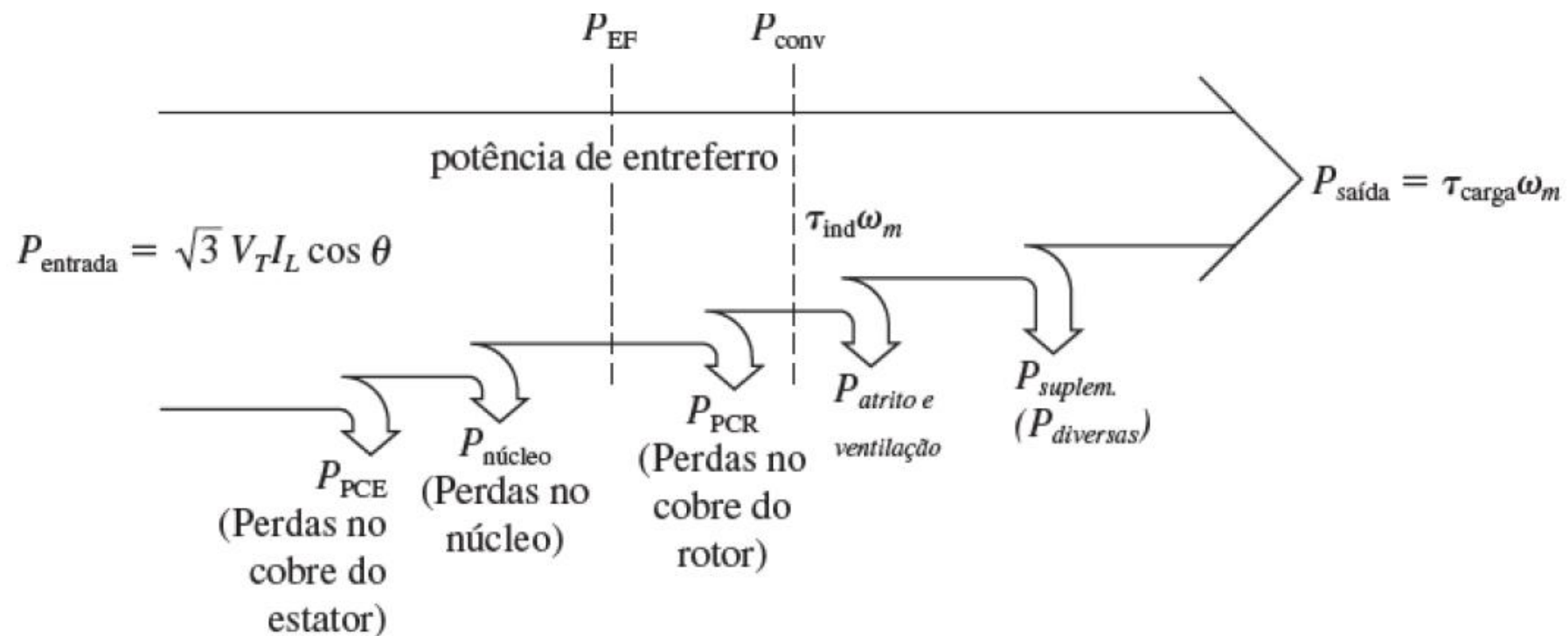
$$P_{rotor} = \frac{R_2}{s} I_2^2$$



# Circuito equivalente referido ao lado do estator



# Fluxo de potência



# Exercício

---

O rotor de um MIT de 4 pólos e 60 Hz absorve 120 kW em 3 Hz. Determine:

- a) a velocidade do rotor;
- b) as perdas no cobre do rotor;
- c) Considerando que este motor possui perdas no cobre do estator de 3 kW, perdas mecânicas de 2 kW e perdas no núcleo do estator de 1,7 kW, calcule a potência de saída do motor e A eficiência deste motor. Despreze as perdas no núcleo do rotor.

Solução: a)  $n_s = \frac{120 \times 60}{4} \rightarrow n_s = 1800 \text{ rpm}$

Sabemos que  $f_2 = 3\text{Hz} = sf_1 \rightarrow s = \frac{3}{60} \rightarrow s = 0,05$   
 $n = n_s(1 - s) = 1800(1 - 0,05) \rightarrow n = 1710 \text{ rpm}$

b)  $P_{Cu,r} = sP_g \rightarrow P_{Cu,r} = 0,05 \times 120000 \rightarrow P_{Cu,r} = 6\text{kW}$



# Continuação

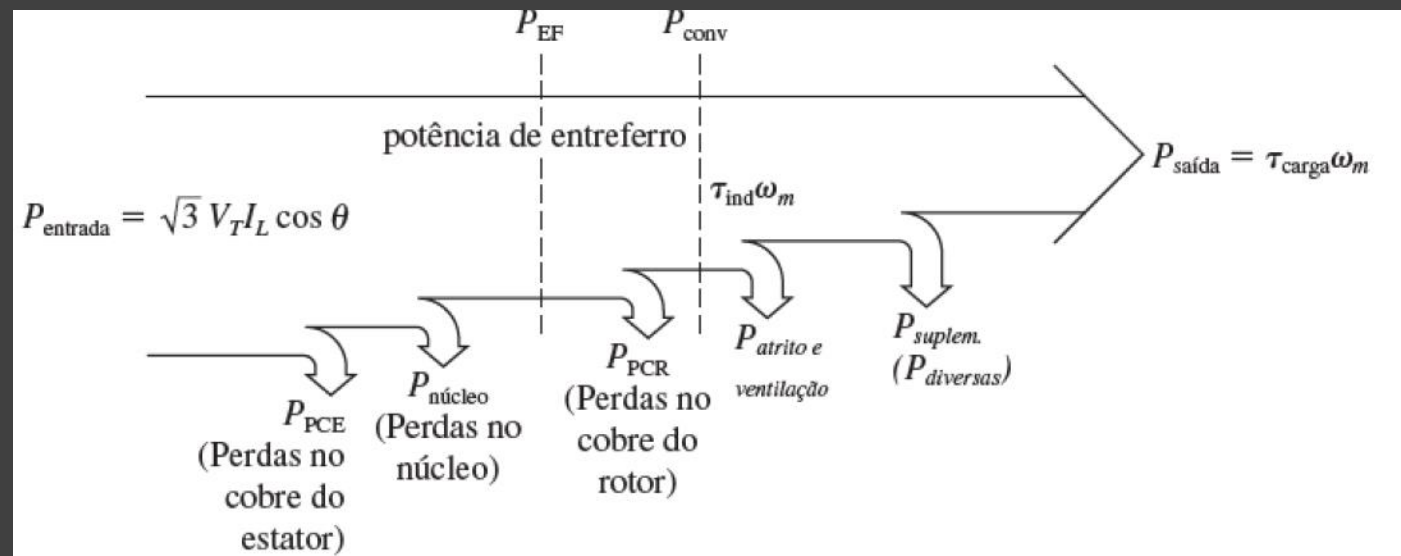
c)  $P_{Cu,est} = 3 \text{ kW}$ ,  $P_{mec} = 2 \text{ kW}$  e  $P_C = 2 \text{ kW}$

$$\begin{aligned} P_{saída} &= P_g - P_{cu,r} - P_{mec} \\ &= 120 \text{ k} - 6 \text{ k} - 2 \text{ k} \\ P_{saída} &= 112 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{entrada} &= P_g + P_{Cu,est} + P_C \\ &= 120 \text{ k} + 1,7 \text{ k} + 3 \text{ k} \\ P_{entrada} &= 124,7 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\text{Rendimento } \eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \rightarrow \eta = \frac{112 \text{ k}}{124,7 \text{ k}} \rightarrow$$

$$\eta = 89,8 \%$$



# Exercício

---

Um MIT de 6 polos e 60 Hz consome 48 kW quando gira a 1140 rpm. As perdas no cobre do estator são 1,4 kW, perdas no núcleo do estator são 1,6 kW e as perdas mecânicas são 1 kW. Calcule a eficiência deste motor.

$$\text{Solução: } n = 1140 \text{ rpm e } n_s = \frac{120 \times 60}{6} \rightarrow n_s = 1200 \text{ rpm}$$
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1200 - 1140}{1200} \rightarrow s = 5\%$$

$$\text{Potência de entrada: } P_{\text{entrada}} = 48 \text{ kW}$$

$$\text{Potência mecânica + perdas: } P_{\text{mec}} = (1 - s)P_g = (1 - 0,05) \times 48k \rightarrow P_{\text{mec}} = 42,75 \text{ kW}$$

$$\text{Potência de saída: } P_{\text{saída}} = P_{\text{mec}} - \text{Perdas}_{\text{mec}} = 42,75k - 1k \rightarrow P_{\text{saída}} = 41,75 \text{ kW}$$

$$\text{Eficiência: } \eta = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{41,75k}{48k} \rightarrow \eta = 87\%$$