

CONVERSÃO DE ENERGIA 2

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

Prof. Dr. Cesar da Costa

E-mail: ccosta@ifsp.edu.br

Site: www.professorcesarcosta.com.br

❖ Definições importantes considerando o escorregamento s :

- Velocidade síncrona:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

Onde:

N_s = Velocidade Síncrona em RPM (1)

f = Frequência em Hz

p = Números de polos

- Velocidade de escorregamento:

$$N_{esc} = N_s - N_R \quad (2)$$

- Escorregamento (slip):

$$S = \frac{N_{esc}}{N_s} = \frac{N_s - N_R}{N_s} \quad (3)$$

- Velocidade do rotor:

$$N_R = (1 - S) \cdot N_s \quad (4)$$

- Frequência do rotor:

$$f_R = S \cdot f_{rede} \quad (5)$$

- Tensão induzida no rotor:

$$E_R = S \cdot E_{Rb} \quad (6)$$

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

- ❖ O motor de indução trifásico pode ser representado por um circuito elétrico equivalente.
- ❖ Para esta análise considera-se apenas as máquinas com enrolamentos polifásicos simétricos, excitadas por tensão polifásicas equilibradas, ligadas em Y, de modo que as correntes e tensões sejam expressas por valores de fase.
- ❖ Desta forma, pode-se deduzir um circuito equivalente para uma fase, de modo que para as demais fases basta fazer um deslocamento adequado da fase, que está sendo estudada.

Exercício de Fixação:

❖ Um estator trifásico de uma máquina de indução de seis polos é alimentado por tensões elétricas trifásicas equilibradas, cuja frequência é 60 Hz. O rotor gira com velocidade igual a 1.020 rpm, no mesmo sentido da velocidade do campo do estator. Pergunta-se:

1. Qual a velocidade síncrona da máquina em rpm?
2. Qual o escorregamento?
3. Qual a frequência elétrica das tensões induzidas no rotor?
4. Qual a velocidade do campo do estator em relação a estrutura física do estator ?
5. Qual a velocidade do campo do rotor em relação a estrutura física do rotor ?
6. Qual a velocidade do campo do rotor em relação a estrutura física do estator ?

Exercício de Fixação:

❖ Solução:

1. Qual a velocidade síncrona da máquina em rpm?

$$w_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

2. Qual o escorregamento?

$$s = \frac{w_s - w_R}{w_s} = \frac{1200 - 1020}{1200} = 0,15$$

3. Qual a frequência elétrica das tensões induzidas no rotor?

R: A frequência de escorregamento F_2 é a frequência das tensões e correntes.

$$f_2 = s \cdot f_1 \Rightarrow f_2 = 0.15 \times 60 = 9 \text{ Hz}$$

❖ Solução:

4. Qual a velocidade do campo do estator em relação a estrutura física do estator ?

R: *A velocidade do campo do estator em relação a estrutura física do estator é a velocidade síncrona da máquina, isto é,*

$$w_s = 1200 \text{ rpm}$$

5. Qual a velocidade do campo do rotor em relação a estrutura física do rotor ?

R: *A velocidade do campo do rotor em relação a estrutura física do rotor é a velocidade de escorregamento w_{esc} :*

$$w_{esc} = w_s - w_r = 1200 - 1020 = 180 \text{ rpm}$$

Ou:

$$w_{esc} = s \times w_s = 0,15 \times 1200 = 180 \text{ rpm}$$

❖ Solução:

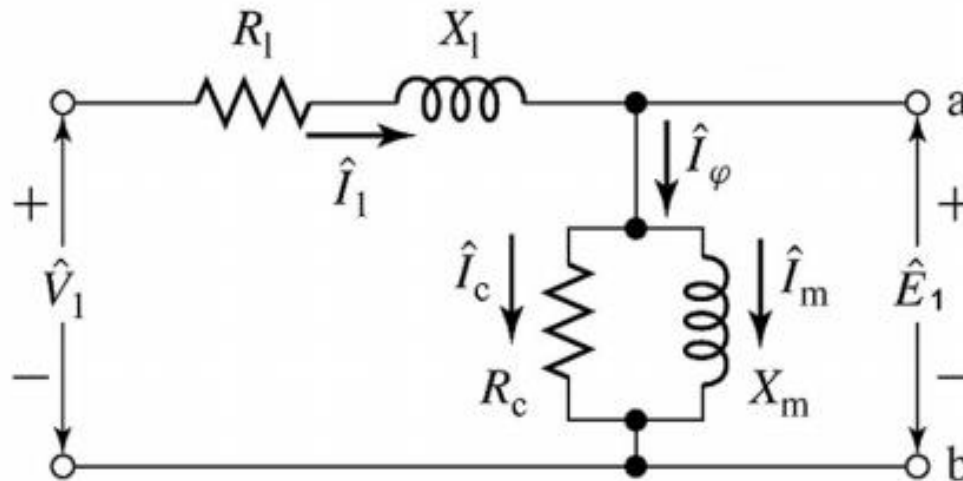
6. Qual a velocidade do campo do rotor em relação a estrutura física do estator ?

R: A velocidade do campo do rotor em relação a estrutura física do estator é a soma da velocidade de escorregamento com a velocidade do rotor, isto é,

$$w_s = w_{esc} + w_R = 180 + 1020 = 1200 \text{ rpm}$$

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

Circuito equivalente do **estator** por fase:



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);

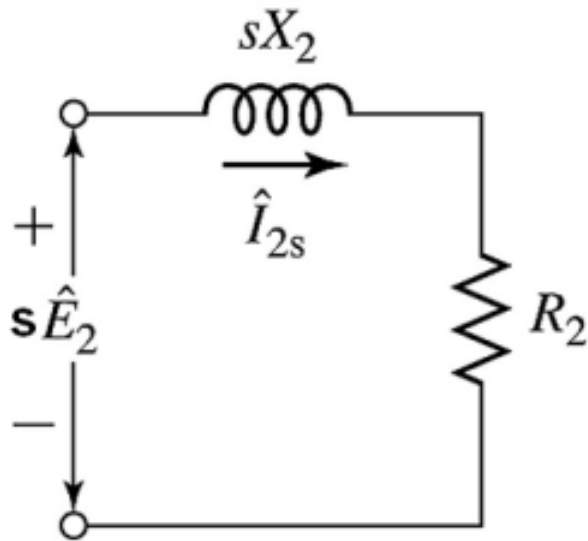
$X_1 \rightarrow$ reatância de dispersão do estator por fase: $X_1 = 2\pi f_1 L_1$

$X_m \rightarrow$ reatância de magnetização por fase: $X_m = 2\pi f_1 L_m$

$R_c \rightarrow$ perda no núcleo do estator por fase.

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

Circuito equivalente do rotor por fase:



$E_2 \rightarrow$ 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 parado por fase ($s=1$, $n=0$);

$I_2 \rightarrow$ corrente por fase no rotor

$f_2 \rightarrow$ frequência do circuito do rotor \neq da frequência do estator f_1

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

- ❑ O circuito elétrico equivalente ao rotor do MIT, por fase, tem o aspecto da Fig. 1

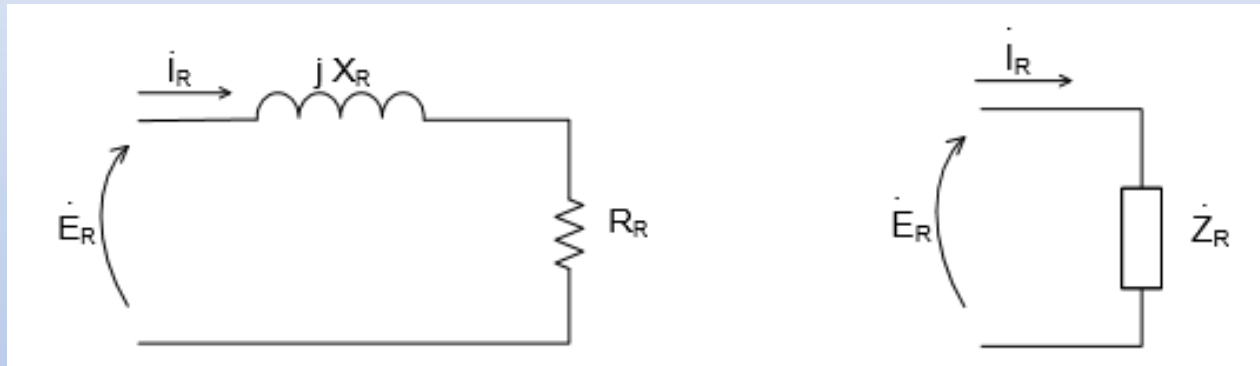


Fig. 1

❖ Deste circuito, vem:

$$\dot{E}_R = (R_R + j \cdot X_R) \cdot \dot{I}_R \quad (7)$$

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

❖ Mas,

$$E_R = s \cdot E_{RB} \quad (8)$$

$$f_R = s \cdot f_{RB} \quad (9)$$

❖ Além disso,

$$X_R = 2\pi \cdot f_R \cdot L_R \quad (10)$$

$$X_{RB} = 2\pi \cdot f_{RB} \cdot L_{RB} \quad (11)$$

❖ Assim,

$$X_R = s \cdot X_{RB} \quad (12)$$

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

❖ Substituindo-se as equações 8 e 12 na Eq. 7 , obtém-se:

$$s \cdot E_{RB} = (R_R + j \cdot s \cdot X_{RB}) \cdot I_R \quad (13)$$

❖ Ou ainda:

$$E_{RB} = \left(\frac{R_R}{s} + j \cdot X_{RB} \right) \cdot I_R \quad (14)$$

❖ Com base nesta última expressão, o circuito que representa fielmente o rotor é mostrado na Fig. 2.

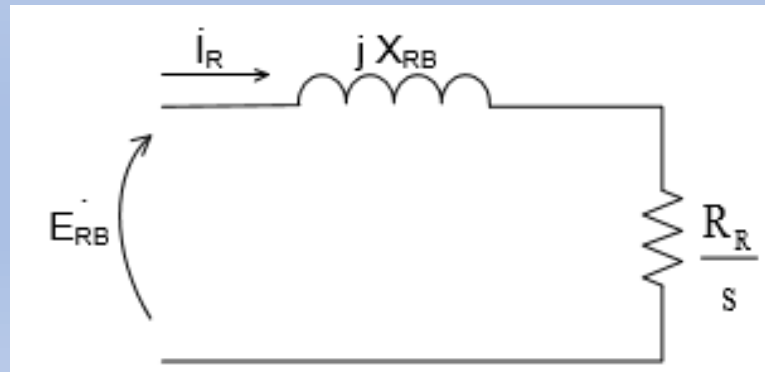


Fig. 2

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

- ❖ Como comentado, a transferência de energia do estator para o rotor se faz indutivamente e, para representar essa transferência de energia utiliza-se um transformador ideal de relação $\frac{n_S}{n_R}$, como representado na Figura 3.

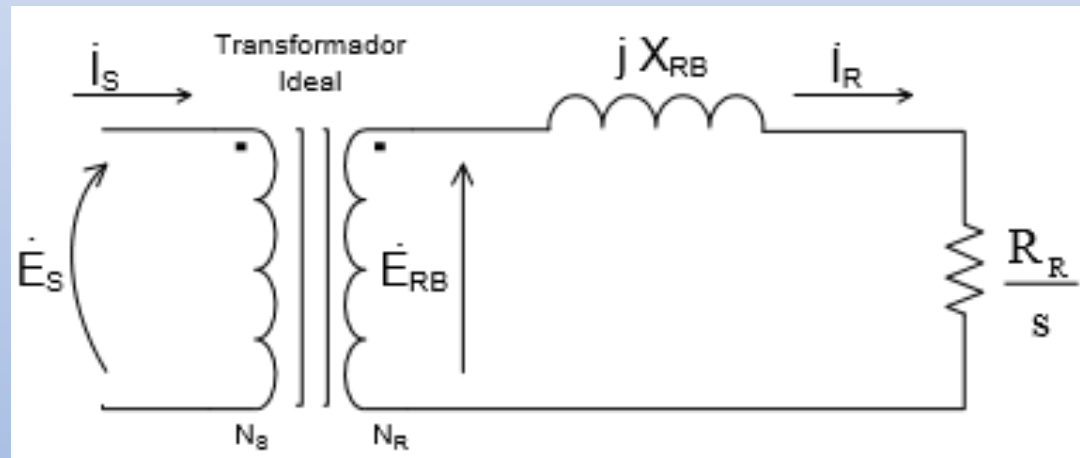


Fig. 3

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

- ❖ A corrente de alimentação do transformador ideal é composta por duas parcelas: **uma responsável pela transferência de potência do primário para o secundário (corrente de carga)** e **outra responsável pela magnetização do núcleo (corrente de magnetização)**. A Fig. 4 ilustra este ramo de magnetização.

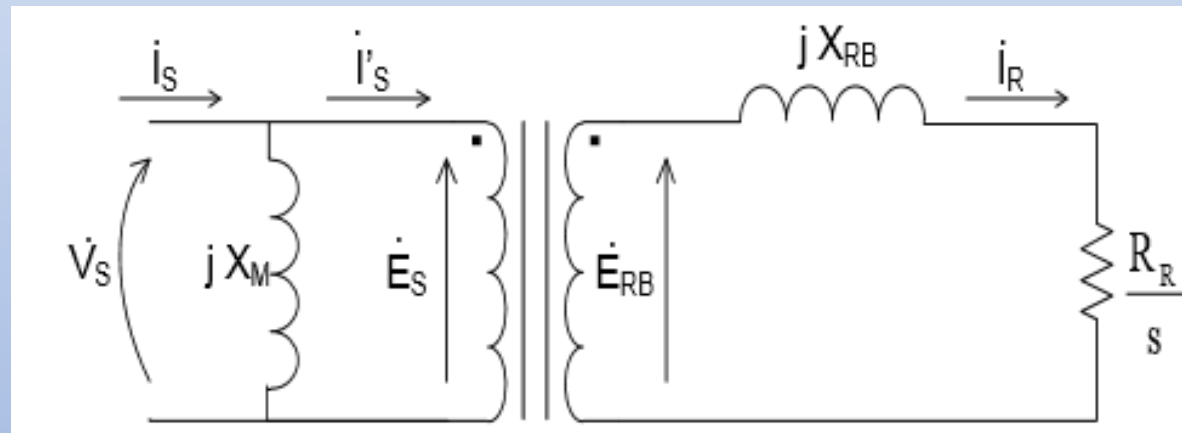


Fig. 4

Circuito Elétrico Equivalente do MIT

- ❖ A impedância do enrolamento do estator pode ser representada por um ramo RL em série com o circuito principal, como mostrado na Fig. 5.

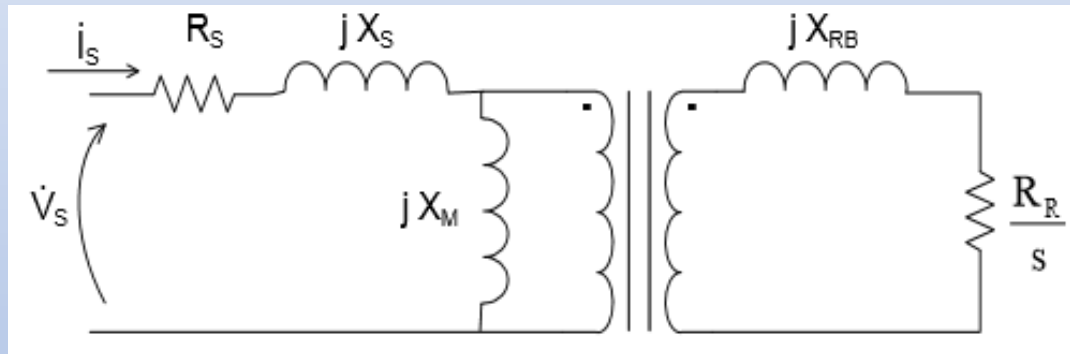
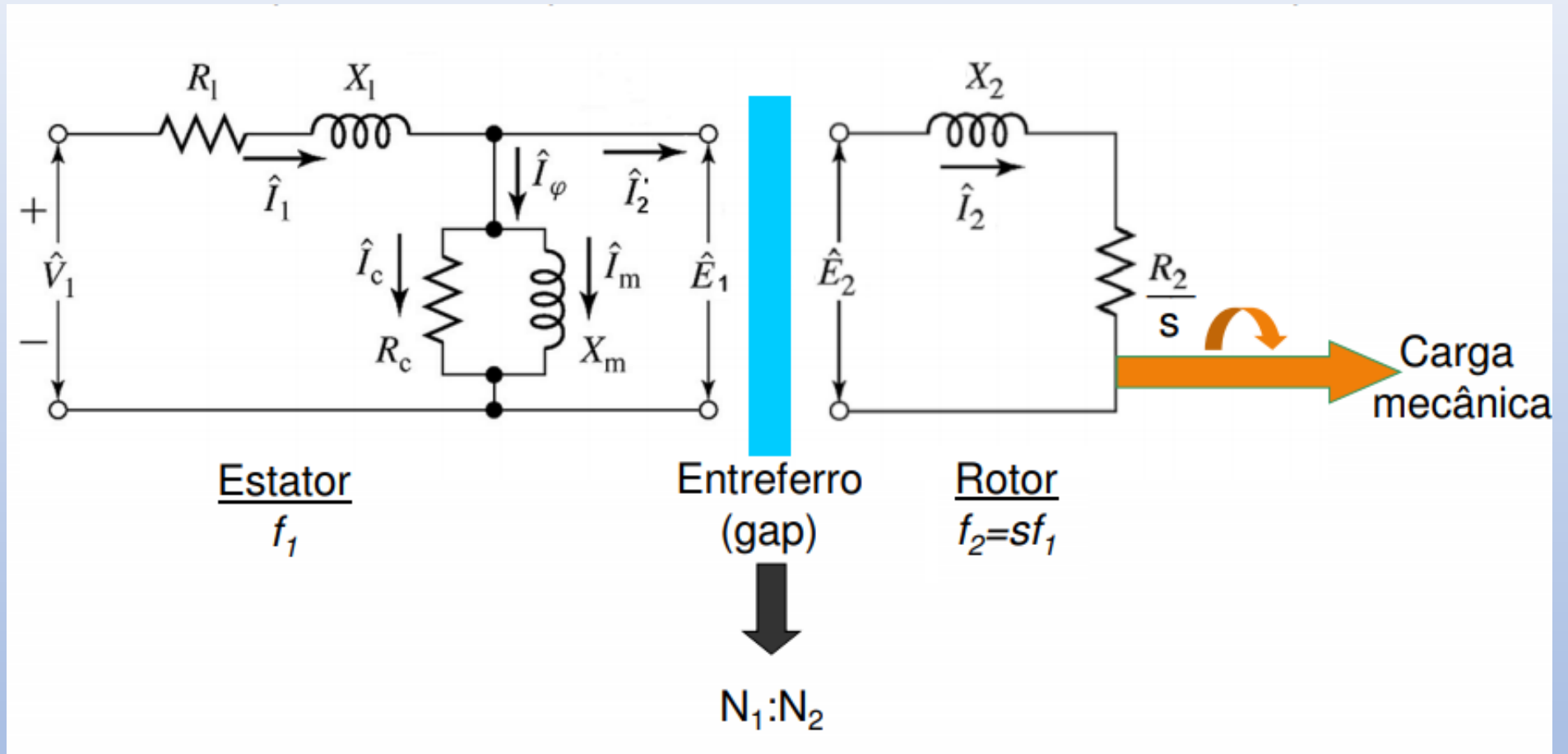


Fig. 5 – Circuitos do rotor e do estator

Circuito Elétrico Equivalente do MIT



Circuito Elétrico Equivalente do MIT

- ❖ Referindo os parâmetros do rotor ao estator, através do transformador ideal, tem-se:

$$X_{RB}' = \left[\frac{N_s}{N_R} \right]^2 \cdot X_{RB} \quad (15)$$

$$\frac{R_R'}{s} = \left[\frac{N_s}{N_R} \right]^2 \cdot \frac{R_R}{s} \quad (16)$$

- ❖ O circuito do MIT por fase, visto do estator é então apresentado na Fig. 6.

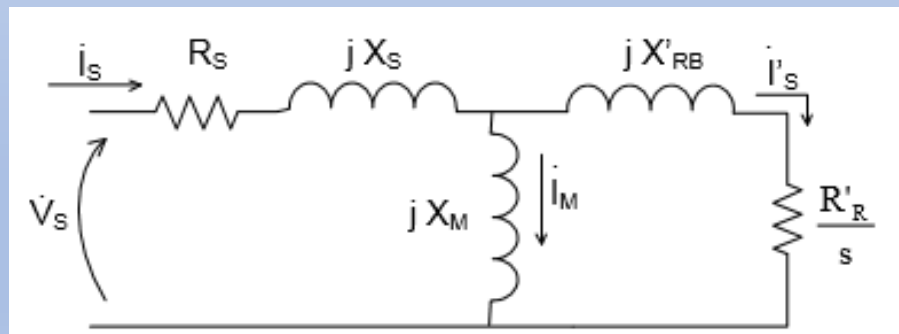


Fig. 6 – Circuito equivalente do MIT

Análise do Circuito Equivalente

❖ Para o circuito desenvolvido anteriormente, algumas relações relacionadas às potências envolvidas podem ser obtidas.

➤ Potência absorvida da rede de alimentação (P_L):

$$P_L = 3 \cdot V_S \cdot I_S \cdot \cos\varphi \quad [\text{W}] \quad (17)$$

➤ Perdas no cobre do estator (P_{CS}):

$$P_{CS} = 3 \cdot R_S \cdot (I_S)^2 \quad [\text{W}] \quad (18)$$

➤ Potência fornecida ao rotor ou Potência eletromagnética (P_{FR}):

$$P_{FR} = P_L - P_{CS} = 3 \cdot \frac{R'_R}{s} \cdot (I'_S)^2 \quad [\text{W}] \quad (19)$$

Análise do Circuito Equivalente

➤ Perdas no cobre do rotor (P_{CR}):

$$P_{CR} = 3 \cdot R'_R \cdot (I'_S)^2 \quad [\text{W}] \quad (20)$$

$$P_{CR} = s \cdot P_{FR} \quad [\text{W}] \quad (21)$$

➤ Potência desenvolvida pelo rotor ou potência interna (P_{DR}):

$$P_{DR} = P_{FR} - P_{CR} \quad [\text{W}] \quad (22)$$

$$P_{DR} = (1 - s)P_{FR} \quad [\text{W}] \quad (23)$$

Análise do Circuito Equivalente

- ❖ Uma modificação no circuito equivalente, como apresentado na Fig. 6, pode ser feita reescrevendo o termo $\frac{R'_R}{s}$ da seguinte maneira:

$$\frac{R'_R}{s} = R'_R + R'_R \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (24)$$

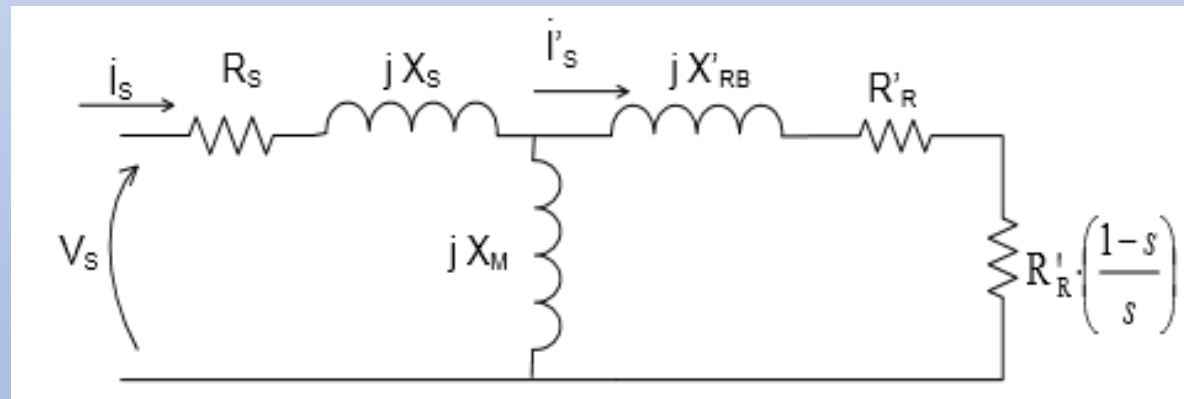


Fig. 7 – Circuito equivalente modificado

Análise do Circuito Equivalente

➤ Torque interno ou eletromagnético (T_I):

$$T_I = \frac{P_I}{\omega_R} = \frac{P_{DR}}{\omega_R} \quad [\text{N.m}] \quad (25)$$

➤ Mas,

$$\omega_R = (1 - s) \cdot \omega_S \quad (26)$$

$$P_{DR} = (1 - s) \cdot P_{FR} \quad (27)$$

$$T_I = \frac{P_{FR} \cdot (1 - s)}{\omega_S \cdot (1 - s)} = \frac{P_{FR}}{\omega_S} \quad (28)$$

$$T_I = 3 \cdot \frac{R'_R}{s \cdot \omega_S} \cdot (I'_S)^2 \quad [\text{N.m}] \quad (29)$$

Análise do Circuito Equivalente

➤ Perdas rotacionais (P_{ROT}):

- É a soma das perdas no núcleo do circuito magnético e das perdas por atrito nos mancais e de ventilação.

$$P_{ROT} = P_{FOUCAULT} + P_{HISTERESE} + P_{ATRITO+VENTILAÇÃO} \quad [W] \quad (30)$$

- Quando o rotor está bloqueado, ou seja, quando $w_R = 0$, as perdas mecânicas são nulas, enquanto as perdas magnéticas são elevadas, visto que a frequência da corrente induzida no rotor é alta (mesma frequência da rede de alimentação do motor).
- Quando o motor opera próximo da velocidade síncrona ($s \approx 0$), a frequência da corrente induzida no rotor é quase nula. Logo, as perdas magnéticas são baixas. Como o motor opera em alta velocidade, as perdas por atrito e ventilação tornam-se altas. .

Análise do Circuito Equivalente

- As perdas rotacionais, portanto, podem ser consideradas aproximadamente constantes. A diferença é chamada de Perdas Suplementares (P_{sup}).

$$P_{SUP} = P_{ROTCARGA} - P_{ROTVAZIO} \quad [w] \quad (31)$$

- Torque de perdas (T_{PERDAS}):

$$T_{PERDAS} = \frac{P_{ROT}}{\omega_R} \quad [N.m] \quad (32)$$

- Potência útil ou de saída (P_U):

$$P_U = P_{DR} - P_{ROT} \quad [w] \quad (33)$$

Análise do Circuito Equivalente

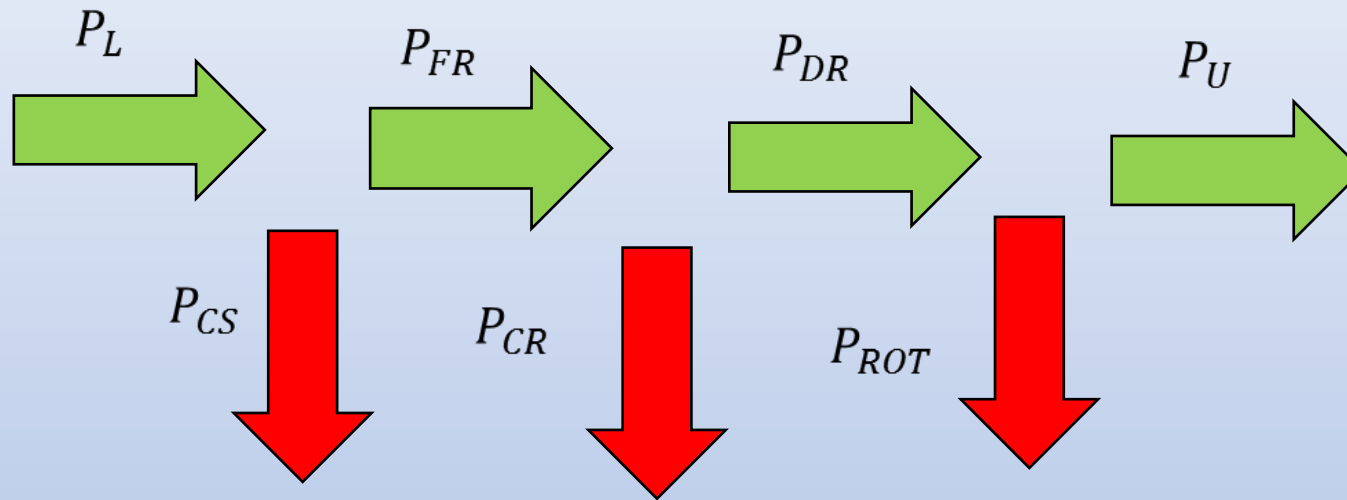
➤ Torque útil ou de saída (T_U):

$$T_U = T_I - T_{PERDAS} = \frac{P_U}{\omega_R} \quad [\text{N.m}] \quad (34)$$

➤ Rendimento (η):

$$\eta = \frac{P_U}{P_L} \cdot 100\%$$

□ A Fig. A seguir representa as potências envolvidas no funcionamento do MIT.



- Potência absorvida da rede de alimentação (P_L):
- Perdas no cobre do estator (P_{CS}):
- Potência fornecida ao rotor ou Potência eletromagnética (P_{FR}):
- Perdas no cobre do rotor (P_{CR}):
- Potência desenvolvida pelo rotor ou potência interna (P_{DR}):
- Perdas rotacionais (P_{ROT}):
- Potência útil ou de saída (P_U):

Exercícios de Fixação

- ❖ Observa-se que um motor de indução trifásico de dois polos e 60 Hz está operando com uma velocidade de 3502 rpm com uma potência de entrada de 15,7 kW e uma corrente de terminal de 22,6 A. A resistência de enrolamento do estator é de 0,20 ohms/fase. Calcule a potência dissipada no rotor.

Solução:

➤ Perdas no cobre do rotor :

$$P_{CR} = s \cdot P_{FR}$$

1. Perdas no cobre do estator :

$$P_{CS} = 3 \cdot R_s \cdot (I_s)^2 = 3 \cdot 0,2 \cdot (22,6)^2 = 306 \text{ W}$$

2. Potência fornecida ao rotor ou entreferro:

$$P_{FR} = P_L - P_{CS} = 15,7 - 0,3 = 15,4 \text{ kW}$$

3. Velocidade síncrona da máquina:

$$w_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{2} = 3600 \text{ rpm}$$

4. Escorregamento da máquina:

$$s = \frac{w_s - w_R}{w_s} = \frac{3600 - 3502}{3600} = 0,0272$$

5. Perdas no cobre do rotor :

$$P_{CR} = s \cdot P_{FR} = 0,0272 \times 15,4 = 419 \text{ W}$$

Conclusões



Referência

<http://professorcesarcosta.com.br/disciplinas/t6cv2n6cv2conv2>

http://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/Apostila_Maquinas%20Eletricas_UNESP.pdf

http://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/maquinas%20eletricas%20senai.pdf