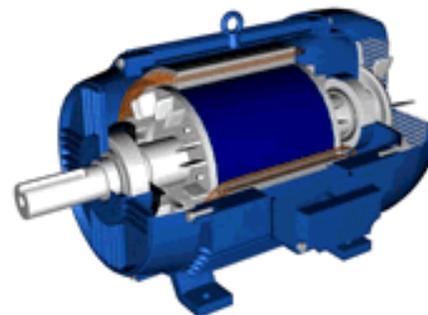
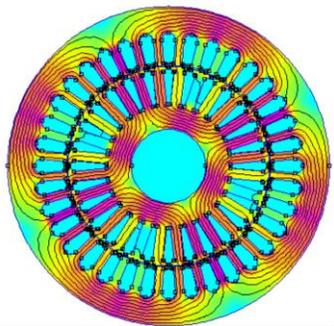


Aula 15: Circuito Equivalente e Ensaio para determinação dos parâmetros - MIT

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



<http://www.semage.com.br/calternada.php>



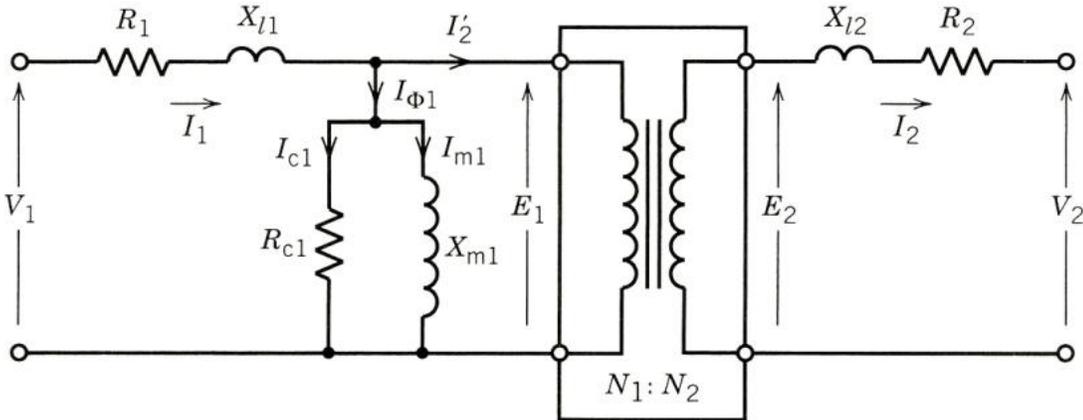
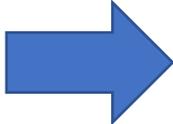
Sumário

- ❑ Obtenção do circuito equivalente da máquina de indução;
- ❑ Ensaio para determinação dos parâmetros do circuito equivalente.

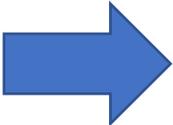
Por que usar o circuito equivalente?

- Permite realizar cálculos relacionados com a máquina;
- Eficiência;
- Características de conjugado da máquina;
- Variação do fator de potência com a carga;
- Circuito por fase da máquina elétrica!
- Parâmetros não são fornecidos pelos fabricantes!

Obtenção do circuito equivalente



$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

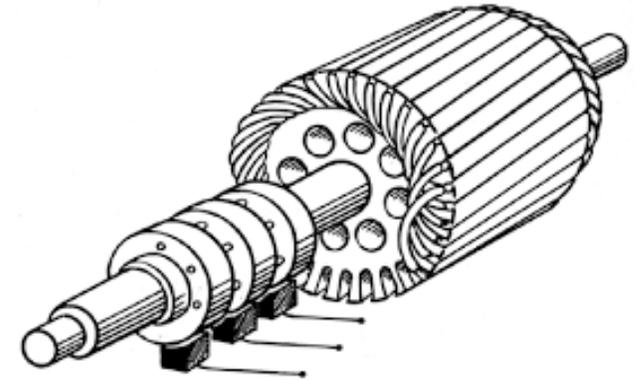
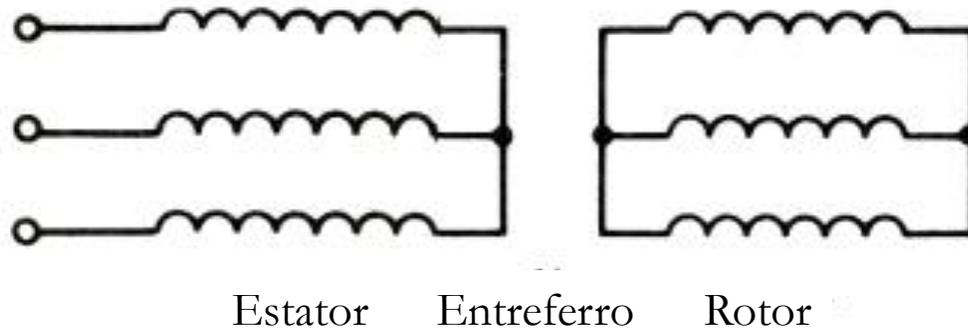


$$\frac{E_r}{E_s} = s \frac{N_r}{N_s}$$

Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Premissas

- ❑ Vamos assumir inicialmente uma máquina de rotor bobinado (sem perda de generalidade);



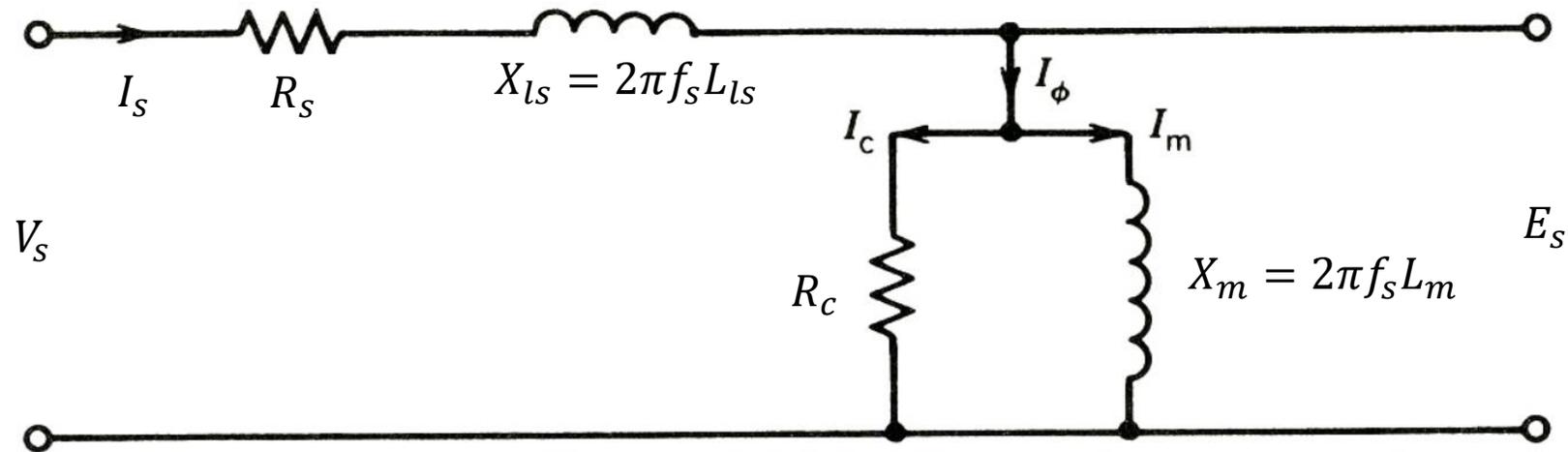
- ❑ Analogia ao transformador!



Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Obtenção do circuito equivalente: Estator

- Estator: Análogo ao primário do transformador;



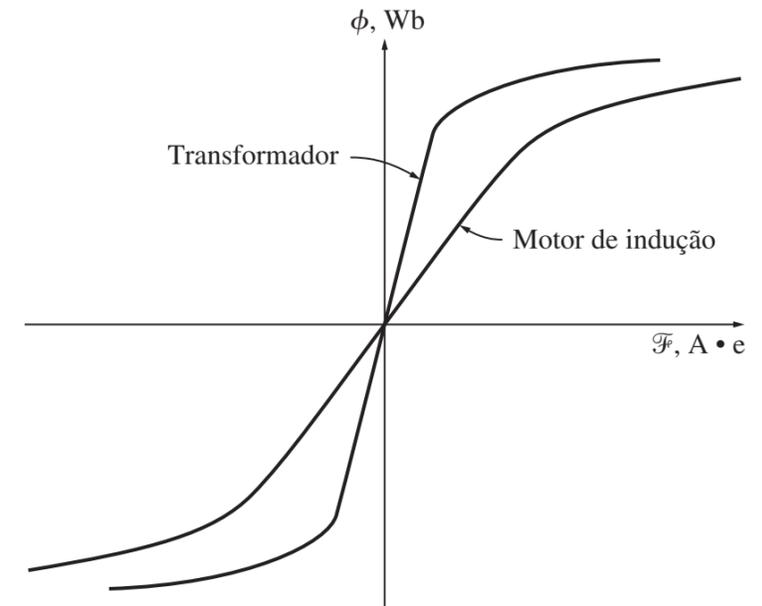
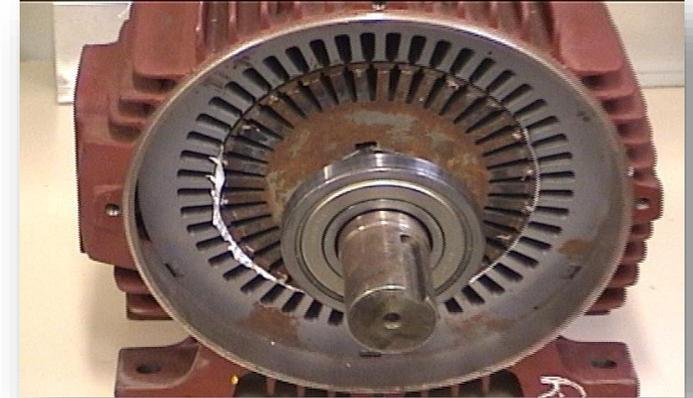
- R_c representa as perdas magnéticas em todo o circuito magnético;
- X_m representa a corrente de magnetização de todo o circuito magnético;
- Note que a frequência das correntes é a própria frequência de alimentação.

Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Pontos importantes

- ❑ Corrente de magnetização;
- ❑ Transformadores: Menor que 5 % da corrente nominal;
- ❑ Máquinas de indução: Até 30 % da corrente nominal;
- ❑ Por quê?

Entreferro



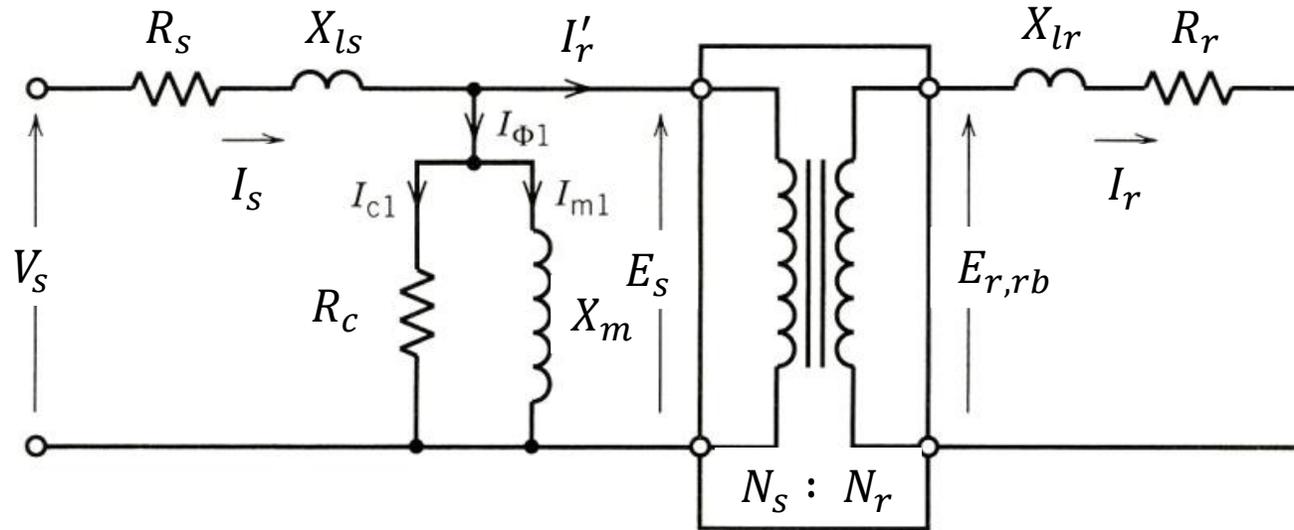
S. J. Chapman. "Fundamentos de Máquinas Elétricas".

Operação com rotor travado

□ Análogo ao transformador $\rightarrow f_r = f_s$

□ Tensão induzida no rotor ($s = 1$):

$$E_{r,rb} = 1 \times \frac{N_r}{N_s} E_s \Leftrightarrow E_{r,rb} = \frac{N_r}{N_s} E_s$$



$$\begin{cases} X_{ls} = 2\pi f_s L_{ls} \\ X_m = 2\pi f_s L_m \\ X_{lr} = 2\pi f_s L_{lr} \end{cases}$$

Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Obtenção do circuito equivalente: Rotor em movimento

□ No caso geral, a tensão do rotor será:

$$E_r = s \frac{N_r}{N_s} \overbrace{E_s}^{E_{r,rb}} = s E_{r,rb}$$

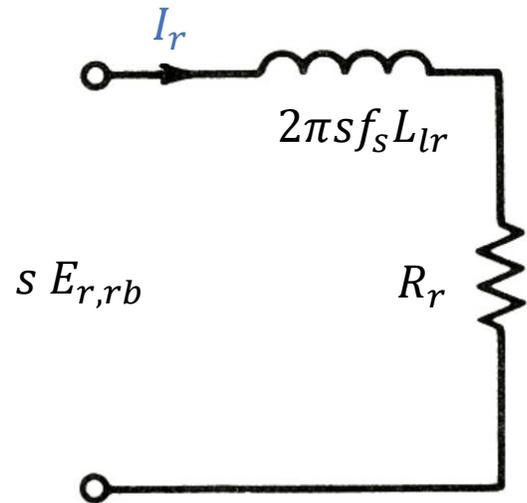
□ Frequência das correntes no rotor:

$$f_r = s f_s$$

□ Reatância do rotor X_r :

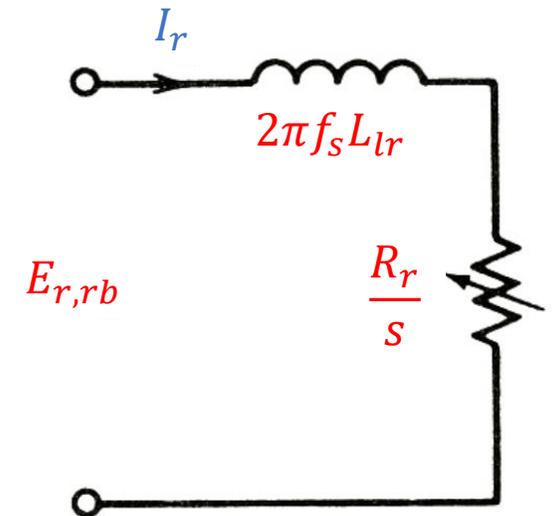
$$X_r = 2\pi f_r L_r = 2\pi s f_s L_r$$

Obtenção do circuito equivalente: Rotor em movimento



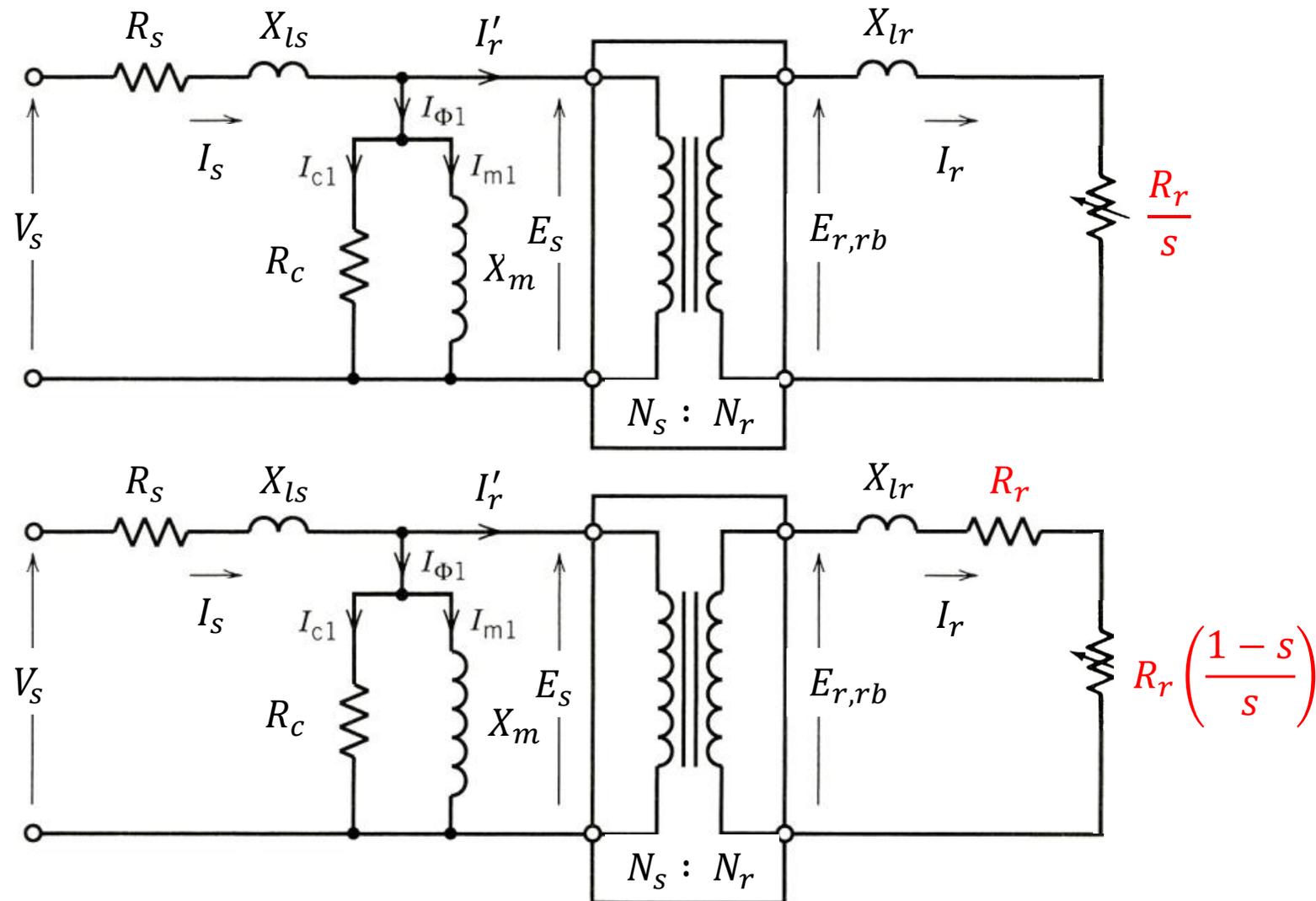
$$I_r = \frac{s E_{r,rb}}{R_r + j 2\pi s f_s L_{lr}} \Leftrightarrow I_r = \frac{E_{r,rb}}{\frac{R_r}{s} + j 2\pi f_s L_{lr}}$$

- ❑ Esta equação sugere o circuito ao lado;
- ❑ A principal diferença é que a frequência deste circuito é 60 Hz!
- ❑ Ele representa o efeito **equivalente** do rotor!



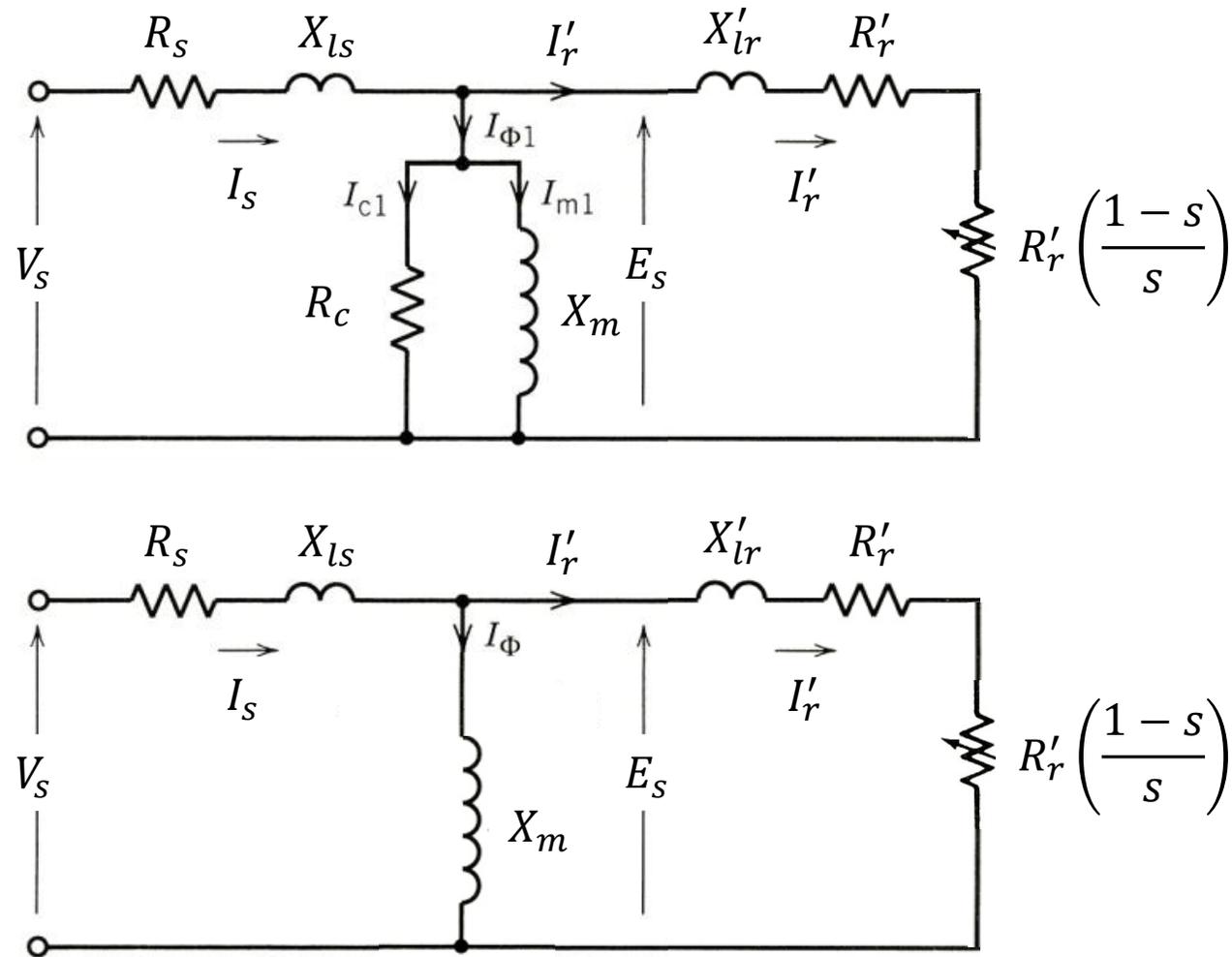
Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Circuito equivalente – motor de indução



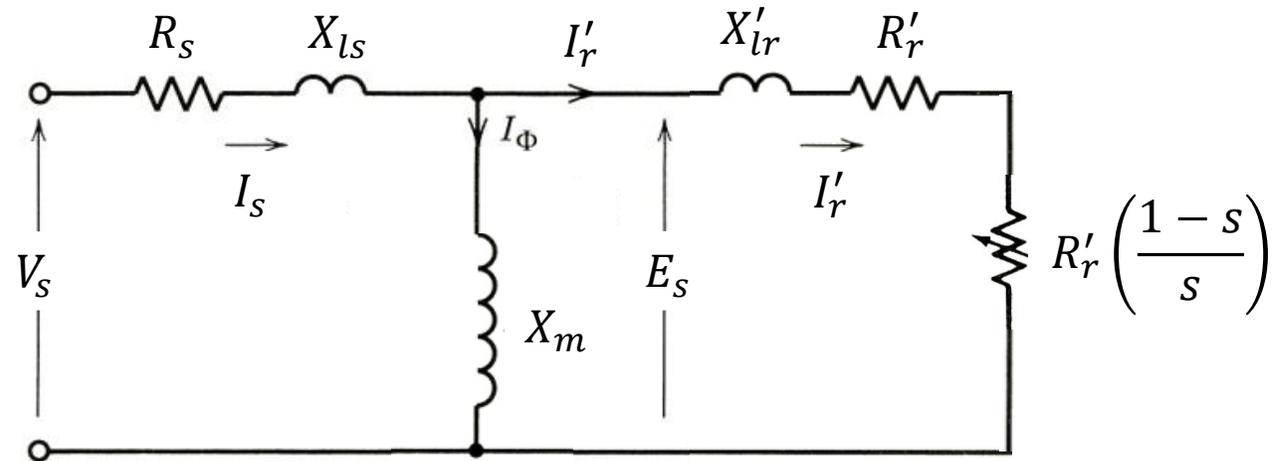
Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Circuito equivalente simplificado – motor de indução



Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Circuito equivalente – motor de indução



❑ Este circuito modela as seguintes perdas:

➤ Perdas no cobre do estator: $P_{RS} = 3 R_s I_s^2$;

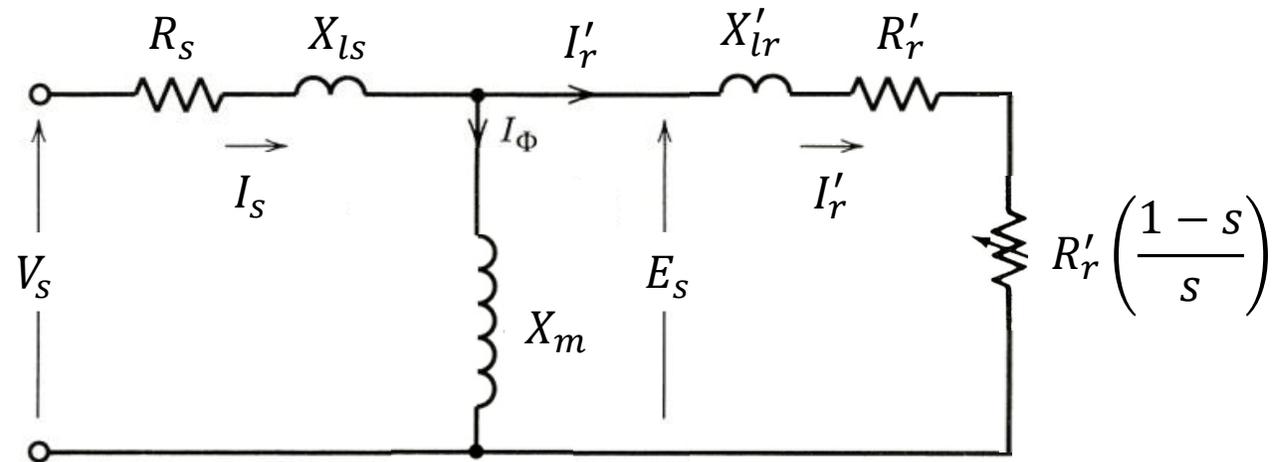
➤ Perdas no cobre do rotor: $P_{Rr} = 3 R_r I_r'^2$;

❑ Qual o significado físico das perdas no resistor variável?

Representa a potência desenvolvida pelo motor!

Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Circuito equivalente – motor de indução



- ❑ Este circuito modela as seguintes perdas:
 - Perdas no cobre do estator: $P_{RS} = 3 R_s I_s^2$;
 - Perdas no cobre do rotor: $P_{Rr} = 3 R_r I_r'^2$;

- ❑ Quais perdas não estão modeladas?

Perdas Rotacionais e Perdas suplementares

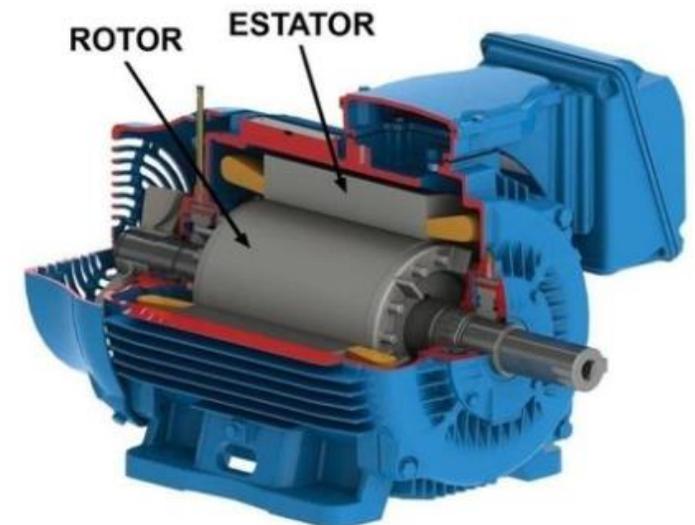
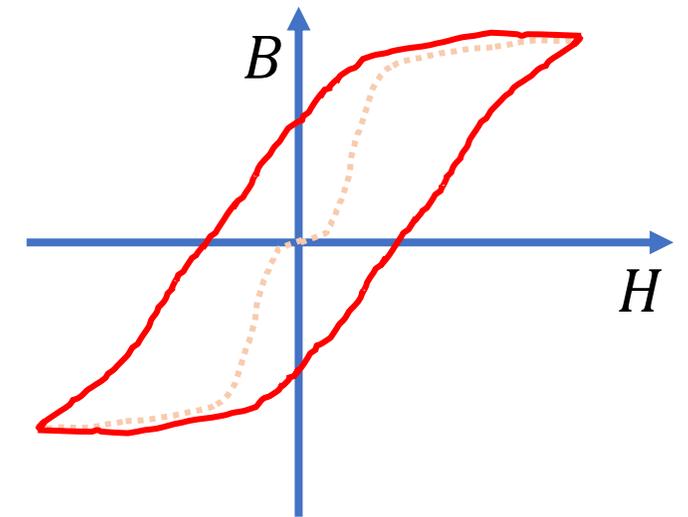
Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Perdas rotacionais

- ❑ Perda magnética (histerese + corrente de Foucault): P_{hf} ;
- ❑ Perda por atrito e ventilação: P_{av} ;
- ❑ Não é trivial obter estas perdas separadamente;
- ❑ Perdas rotacionais - P_{rot} :

$$P_{rot} = P_{hf} + P_{av}$$

- ❑ Não é modelada no circuito equivalente;
- ❑ Subtraída no final!



Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics"

Perdas rotacionais - aproximação

$$P_{rot} = P_{hf} + P_{av}$$

- ❑ Vamos notar que:
 - P_{av} aumenta com a velocidade;
 - P_{hf} cai com a velocidade;

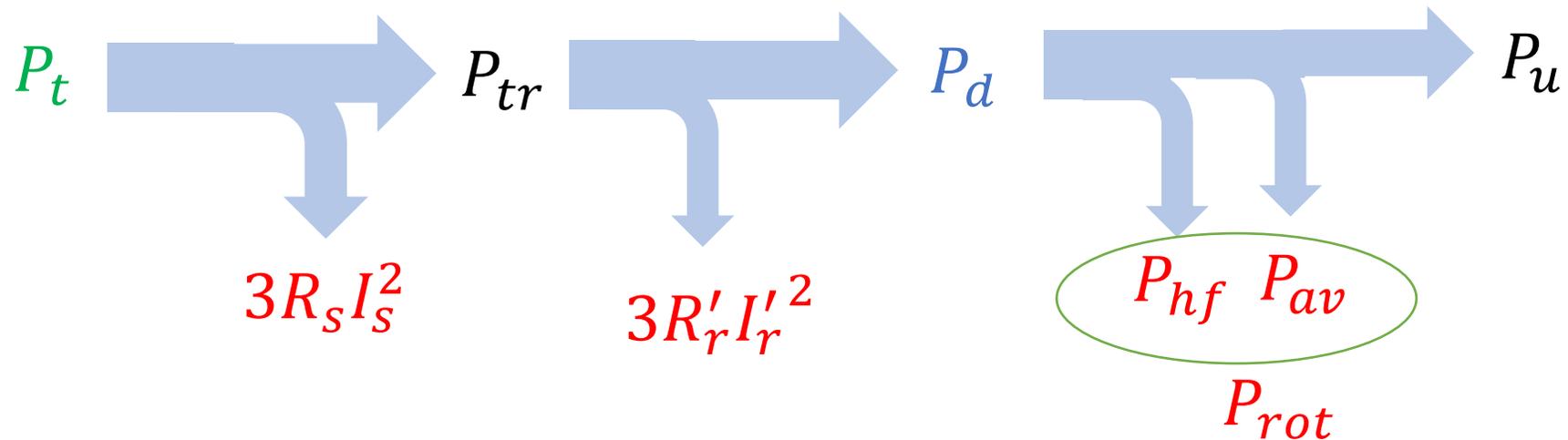
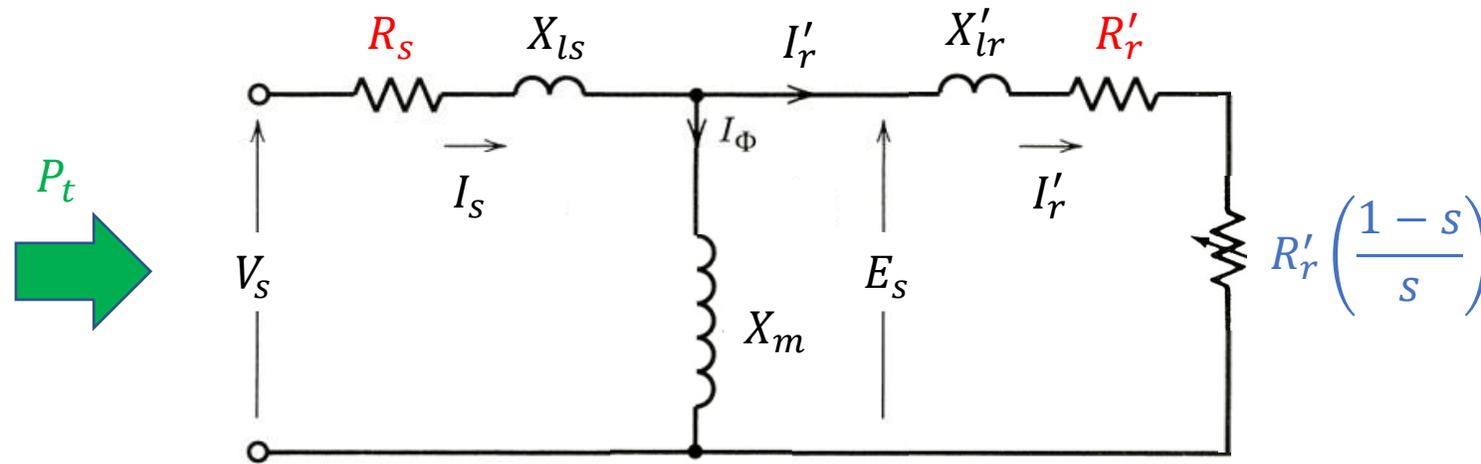
- ❑ Conclusão: P_{rot} é essencialmente constante;

- ❑ Será estimada para a condição da máquina a vazio;

- ❑ Aproximação razoável!

Young and Freedman. "Física III: Eletromagnetismo".

Análise de eficiência



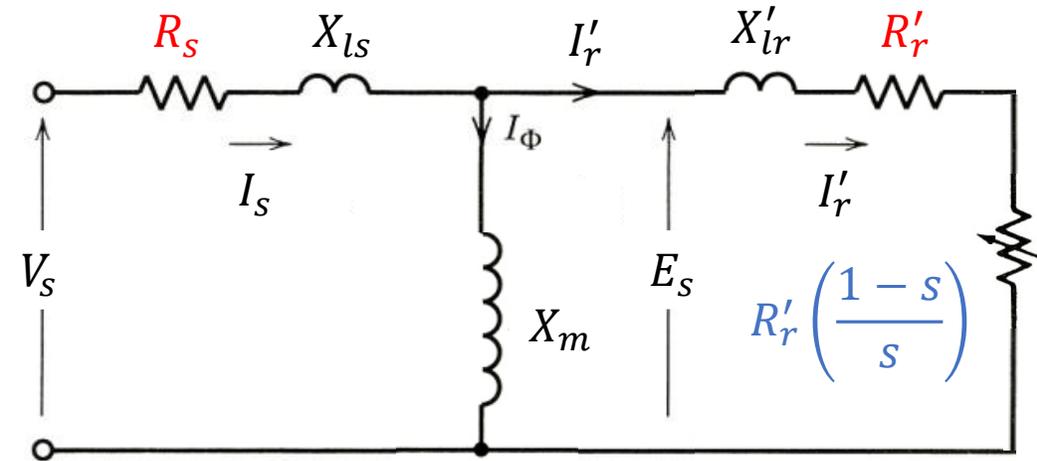
Eficiência da máquina de indução

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{P_u}{P_u + P_{\text{erdas}}}$$

- ❑ Observação importante:

$$P_d = (1 - s)P_{tr}$$

- ❑ Consequência: $\eta < 1 - s$;
- ❑ Escorregamento deve ser baixo para alta eficiência;
- ❑ Limitação da potência das máquinas de indução.



Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



<https://www.facebook.com/gesep>



https://www.instagram.com/gesep_vicosa/



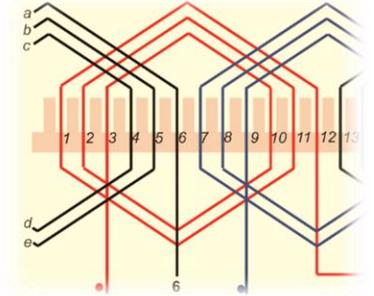
https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw



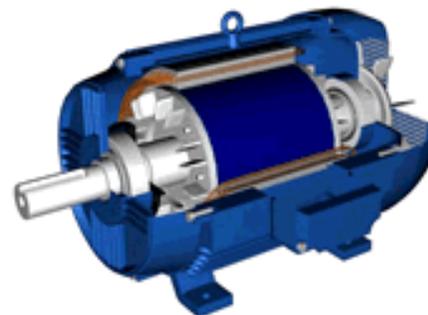
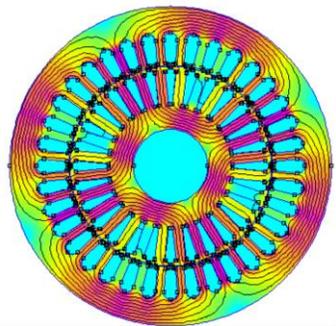
Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>



Ensaaios para obtenção dos parâmetros



<http://www.semage.com.br/calternada.ph>



Ensaaios básicos a serem realizados

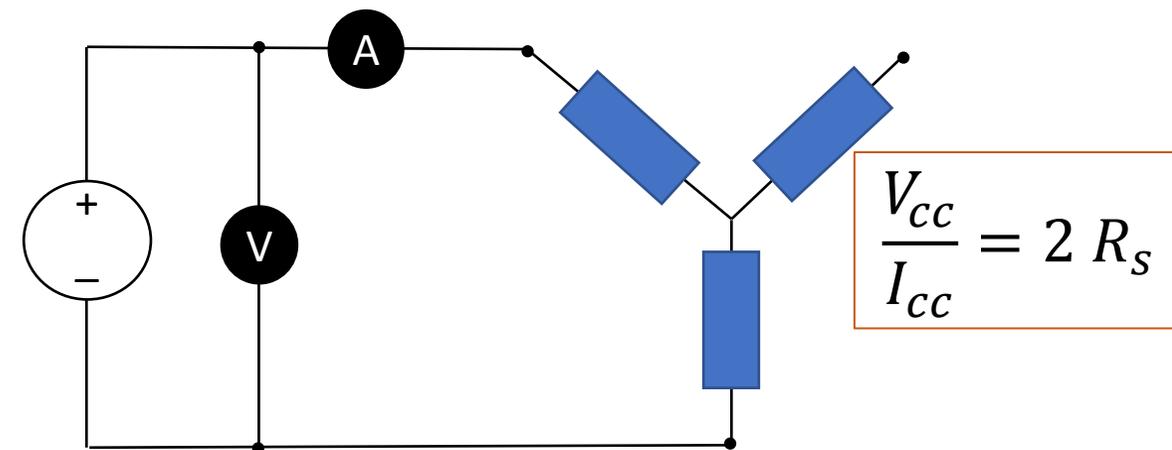
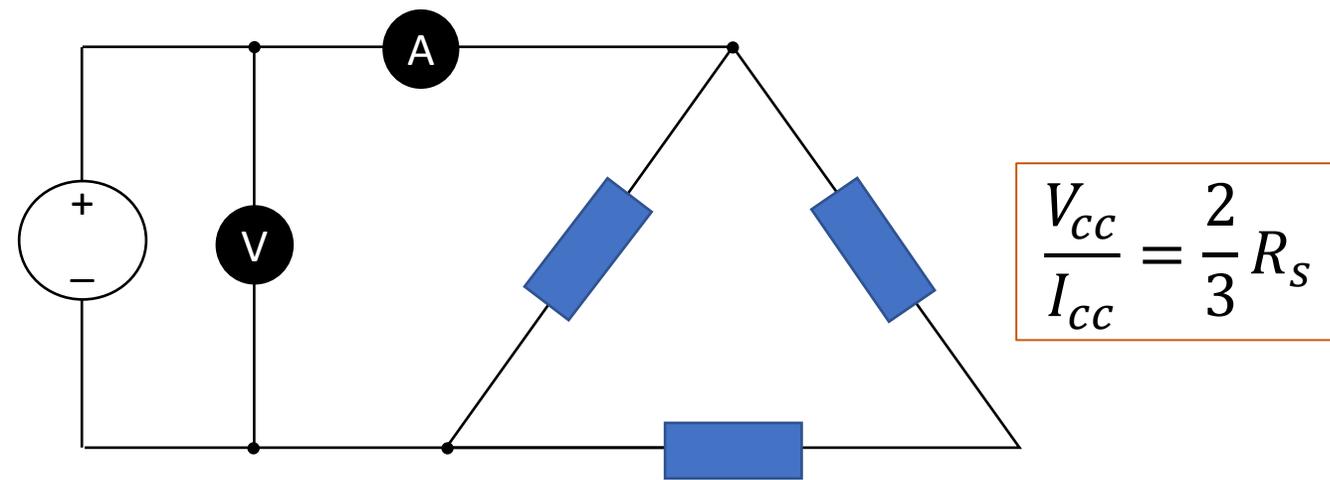
- ❑ Ensaio com corrente contínua (gaiola de esquilo e rotor bobinado);
- ❑ Ensaio a vazio com circuito de rotor aberto (rotor bobinado);
- ❑ Ensaio a vazio (gaiola de esquilo e rotor bobinado);
- ❑ Ensaio de rotor bloqueado (gaiola de esquilo e rotor bobinado);
- ❑ IEEE 112 - IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.

Ensaio com corrente contínua

- ❑ Objetivo: Estimativa da resistência de estator;
- ❑ Desafios de utilização de multímetros (resistência pequena);
- ❑ Solução 1: Ponte dupla de Kelvin.
- ❑ Solução 2: Aplicação de corrente contínua no estator.

Ensaio com corrente contínua

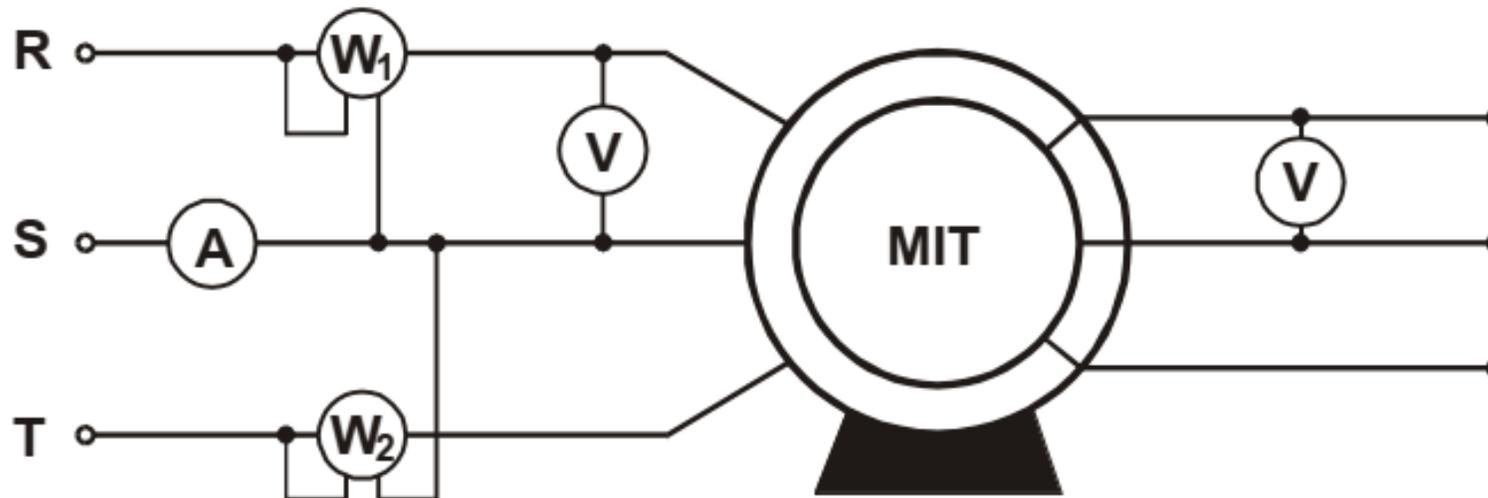
- ❑ Em regime permanente, a corrente será limitada pela resistência de estator;
- ❑ Aplica-se uma tensão contínua e mede-se a corrente;
- ❑ Deve-se ter cuidado com a ligação;
- ❑ Pode-se fazer a correção do valor medido para a temperatura de operação.



Ensaio a vazio com circuito de rotor aberto

- Máquina sem carga mecânica no eixo;
- Aplica-se tensão nominal;
- Circuito de rotor é mantido aberto;
- Realiza-se medições de tensão, corrente e potência ativa;
- Pode-se usar o método dos dois Wattímetros;
- Permite estimar as perdas magnéticas da máquina.

Ensaio a vazio com circuito de rotor aberto



- ❑ É importante ressaltar que este ensaio só pode ser realizado em motores de rotor bobinado!

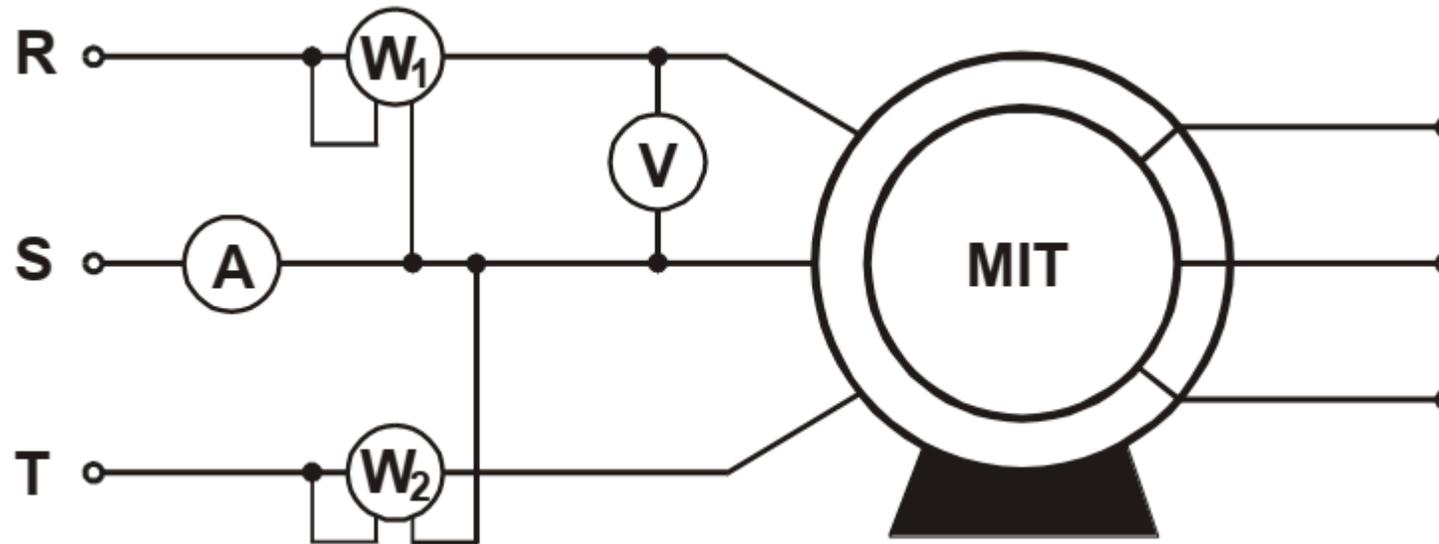
$$P_{hf,ra} = P_{t,ra} - 3 R_s I_{s,ra}^2$$

- ❑ É importante notar que $P_{hf,ra} \propto V_s^2$ (usado para melhorar a estimativa do ensaio de RB).

Ensaio a vazio

- Máquina sem carga mecânica no eixo;
- Aplica-se tensão nominal;
- Realiza-se medições de tensão, corrente e potência ativa;
- Pode-se usar o método dos dois Wattímetros;
- Permite estimar as perdas rotacionais da máquina.

Ensaio a vazio



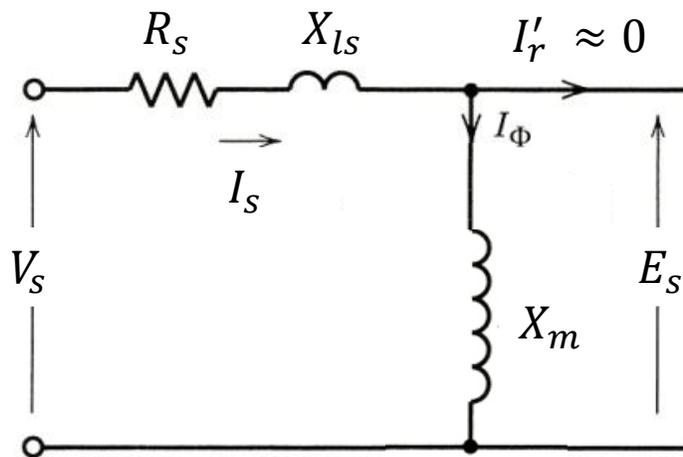
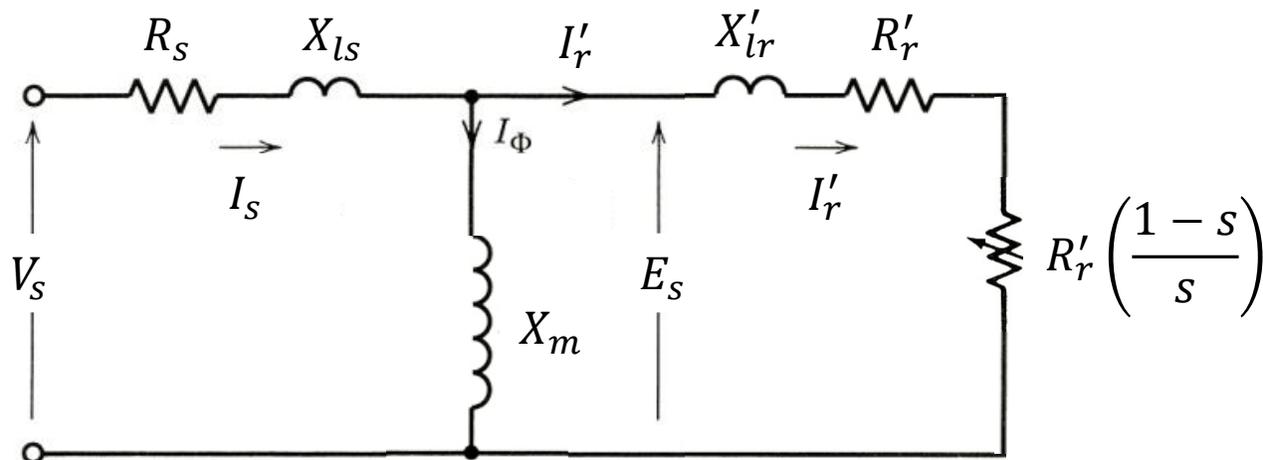
$$P_{rot} = P_{t,v} - 3 R_s I_{s,v}^2$$

□ Se for considerada uma máquina de rotor bobinado:

$$P_{av} = P_{rot} - P_{hf,ra}$$

Circuito equivalente - Ensaio a vazio

- A vazio, $s \rightarrow 0$ e conseqüentemente, a impedância do ramo de rotor é muito elevada;



$$Q_{t,v} = \sqrt{(3V_{s,v}I_{s,v})^2 - P_{t,v}^2} = 3(X_{ls} + X_m)I_{s,v}^2$$

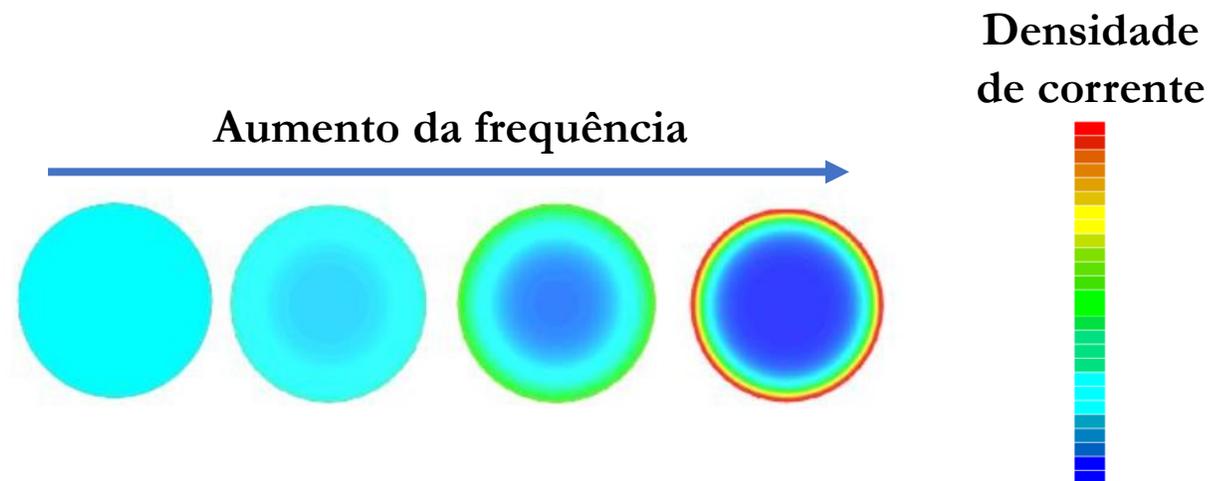
$$\Leftrightarrow X_{ls} + X_m = \frac{\sqrt{(3V_{s,v}I_{s,v})^2 - P_{t,v}^2}}{3I_{s,v}^2}$$

Ensaio com o rotor bloqueado

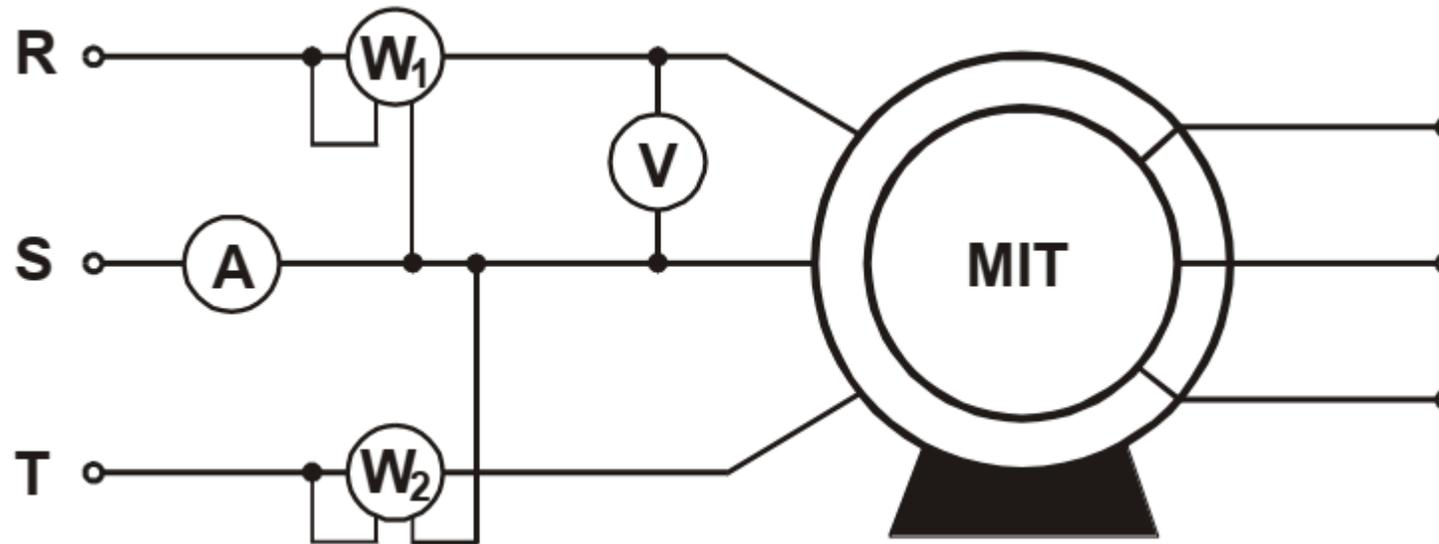
- Bloqueia-se o eixo do motor;
- Aplica-se uma tensão reduzida até que circule a corrente nominal no estator da máquina;
- Realiza-se medições de tensão, corrente e potência ativa;
- Pode-se usar o método dos dois Wattímetros.

Ensaio com o rotor bloqueado

- ❑ Recomenda-se a utilização de frequência reduzida;
- ❑ IEEE 112: $0,25 f_n$;
- ❑ Motores de dupla gaiola, motores de barras profundas ou motores acima de 20 HP;
- ❑ Razão: Resistência elétrica varia com a frequência (Efeito pelicular).



Ensaio de rotor bloqueado



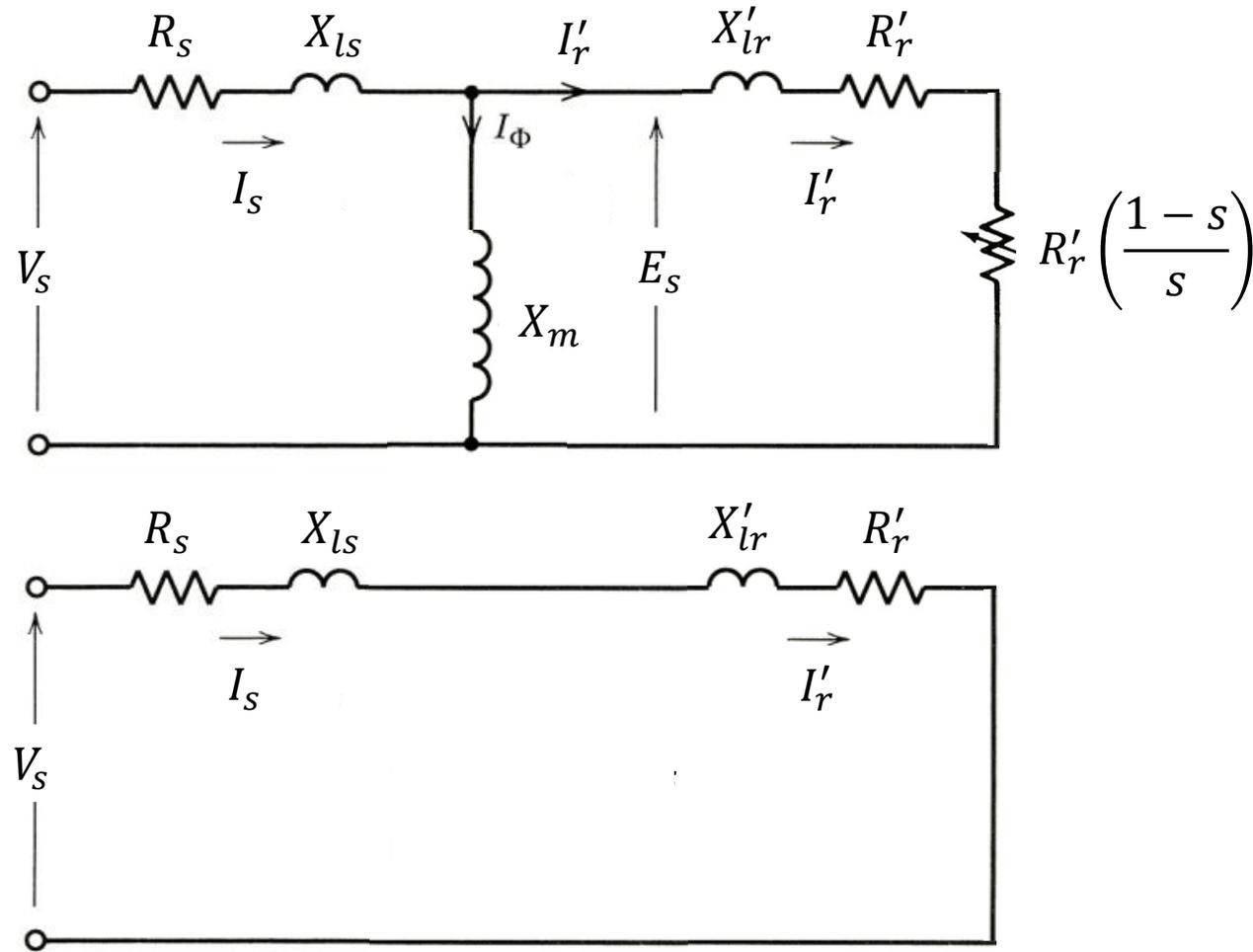
$$P_{av} = 0$$

□ Se for considerada uma máquina de rotor bobinado:

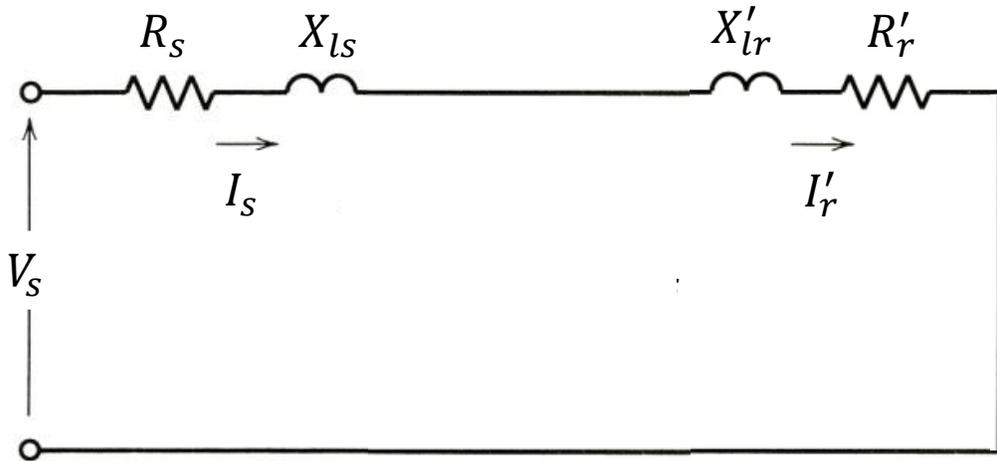
$$P_{hf,rb} = P_{hf,ra} \frac{V_{s,rb}^2}{V_{s,ra}^2}$$

Circuito equivalente - Ensaio de rotor bloqueado

- $s = 1$ e conseqüentemente, a impedância do ramo de rotor é muito baixa;



Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente



$$P_{t,rb} - P_{hf,rb} = 3 (R_s + R'_r) I_{s,rb}^2 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R'_r = \frac{P_{t,rb} - P_{hf,rb}}{3 I_{s,rb}^2}$$

$$Q_{t,rb} = \sqrt{(3V_{s,rb}I_{s,rb})^2 - P_{t,rb}^2} = 3(X_{ls} + X'_{lr})I_{s,rb}^2 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow X_{ls} + X'_{lr} = \frac{\sqrt{(3V_{s,rb}I_{s,rb})^2 - P_{t,rb}^2}}{3 I_{s,rb}^2}$$

Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente

❑ Considerando o ensaio a vazio e de rotor bloqueado, temos:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_m = \frac{\sqrt{(3V_{s,v}I_{s,v})^2 - P_{t,v}^2}}{3 I_{s,v}^2} - X_{ls} \\ X_{ls} + X'_{lr} = X_{rb} = \frac{\sqrt{(3V_{s,rb}I_{s,rb})^2 - P_{t,rb}^2}}{3 I_{s,rb}^2} \end{array} \right.$$

❑ 3 incógnitas, 2 equações;

❑ Como resolver?

Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



<https://www.facebook.com/gesep>



https://www.instagram.com/gesep_vicosa/



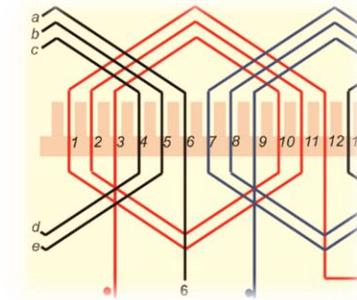
https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw



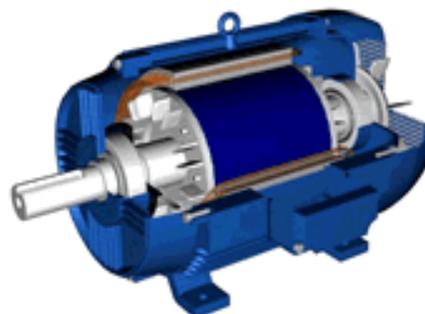
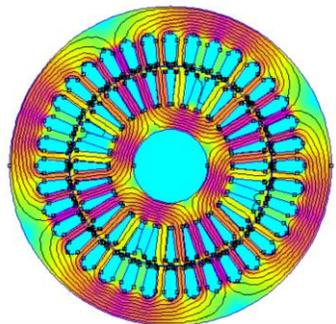
Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>



Ensaaios para obtenção dos parâmetros



<http://www.semage.com.br/calternada.ph>



Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente

❑ Considerando o ensaio a vazio e de rotor bloqueado, temos:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_m = \frac{\sqrt{(3V_{s,v}I_{s,v})^2 - P_{t,v}^2}}{3 I_{s,v}^2} - X_{ls} \\ X_{ls} + X'_{lr} = X_{rb} = \frac{\sqrt{(3V_{s,rb}I_{s,rb})^2 - P_{t,rb}^2}}{3 I_{s,rb}^2} \end{array} \right.$$

❑ 3 incógnitas, 2 equações;

❑ Como resolver?

Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente

❑ Considerando o ensaio a vazio e de rotor bloqueado, temos:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_m = \frac{\sqrt{(3V_{s,v}I_{s,v})^2 - P_{t,v}^2}}{3 I_{s,v}^2} - X_{ls} \\ X_{ls} + X'_{lr} = X_{rb} = \frac{\sqrt{(3V_{s,rb}I_{s,rb})^2 - P_{t,rb}^2}}{3 I_{s,rb}^2} \end{array} \right.$$

❑ 3 incógnitas, 2 equações;

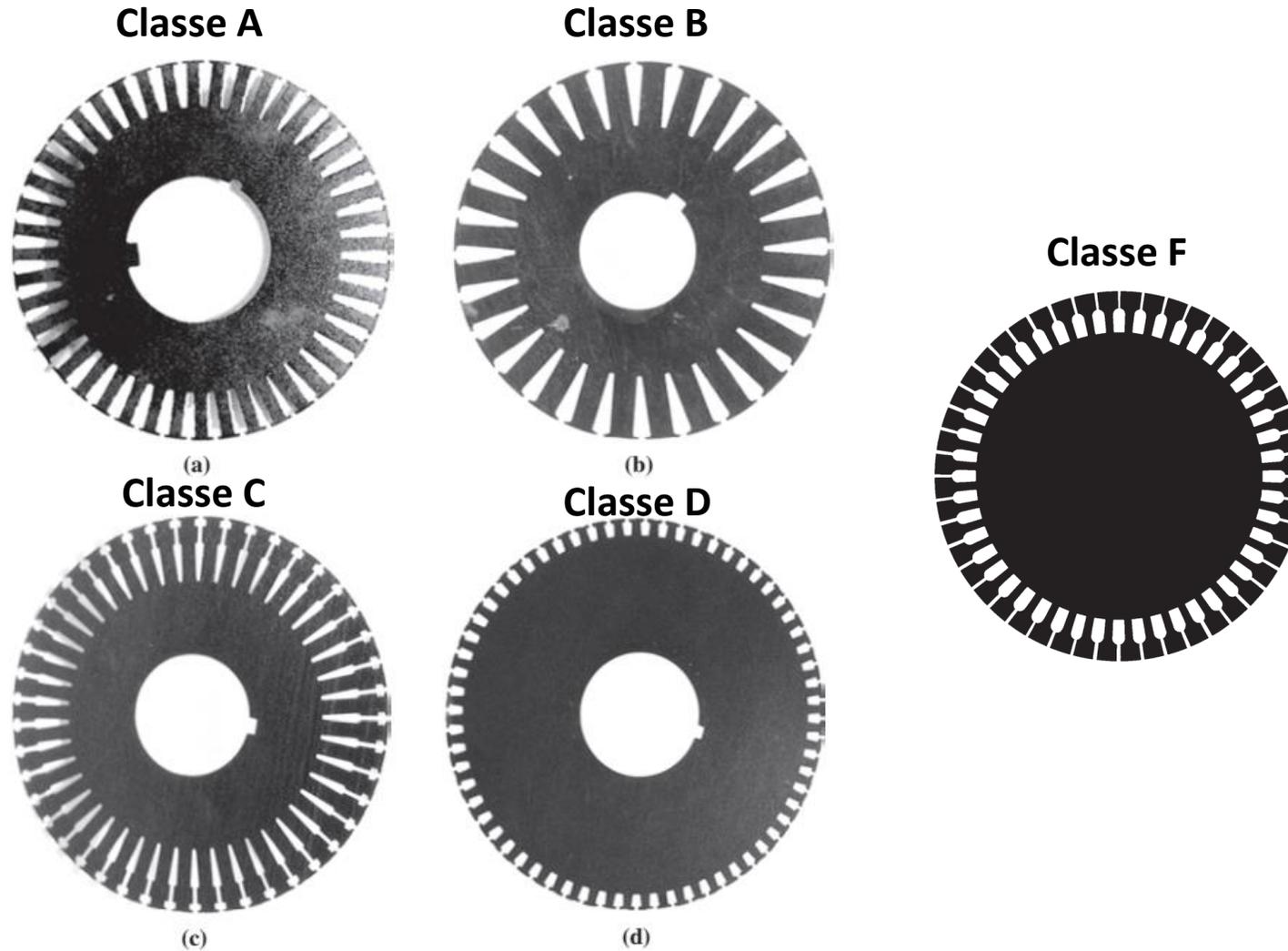
❑ Deve-se conhecer a divisão entre X_{ls} e X'_{lr} → depende da categoria do motor!

Divisão da reatância de rotor bloqueado

	X_1 e X_2 em função de X_{RB}	
Tipo de rotor	X_1	X_2
Rotor bobinado	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$
Classe A	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$
Classe B	$0,4 X_{RB}$	$0,6 X_{RB}$
Classe C	$0,3 X_{RB}$	$0,7 X_{RB}$
Classe D	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$

NEMA	ABNT NBR 17094
A	N
B	
C	H
D	D
E	-
F	-

Características dos rotores – diferentes classes



S. J. Chapman. "Fundamentos de Máquinas Elétricas".

Exemplo – Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente

Os resultados dos ensaios de um motor de indução trifásico de 100 HP, 8 polos, 460 V e velocidade nominal de 873 rpm são apresentados na tabela a seguir.

Ensaio	Tensão de linha	Corrente de linha	Frequência	Potência Total (P_t)
Ensaio a vazio ($s=0$)	460 V	40 A	60 Hz	4,2 kW
Ensaio a rotor travado ($s = 1$)	100 V	140 A	60 Hz	8,0 kW

Considerando que a reatância do estator é igual a reatância do rotor ($X_s = X'_r$) e que a resistência elétrica do estator por fase vale $0,076 \Omega$, determine os parâmetros do circuito equivalente deste motor.

Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



<https://www.facebook.com/gesep>



https://www.instagram.com/gesep_vicosa/



https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw



Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>