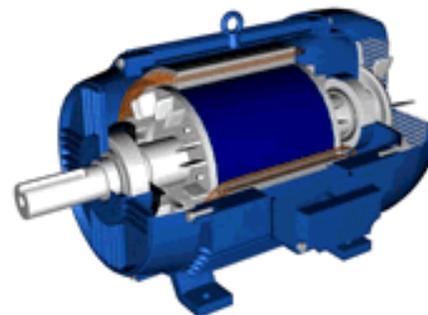
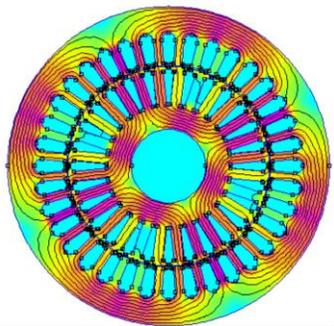


# Aula 10: Eficiência e Regulação de Tensão de Transformadores

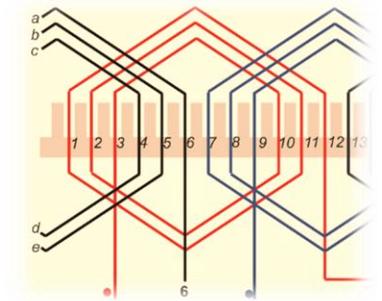
Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



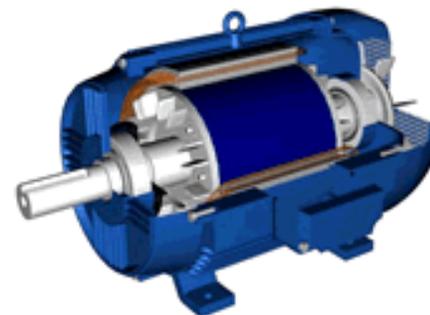
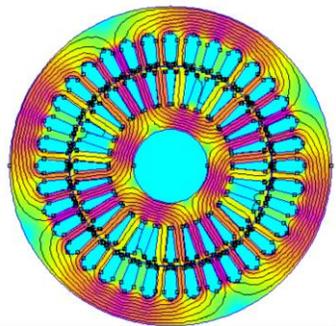
# Sumário

---

- ❑ Eficiência do transformador;
- ❑ Eficiência máxima do transformador;
- ❑ Diagrama fasorial do transformador;
- ❑ Regulação de tensão.



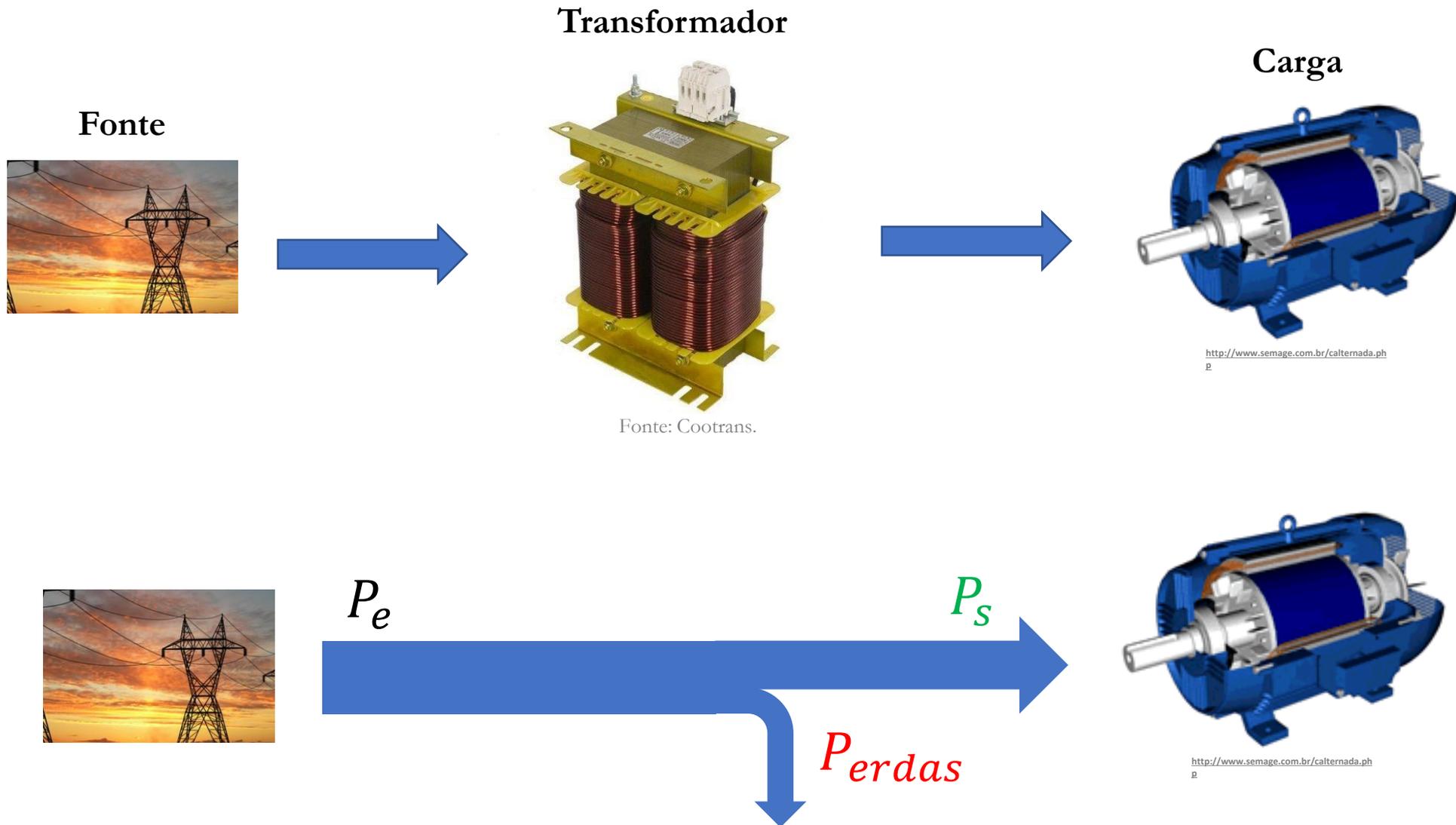
# Eficiência do Transformador



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



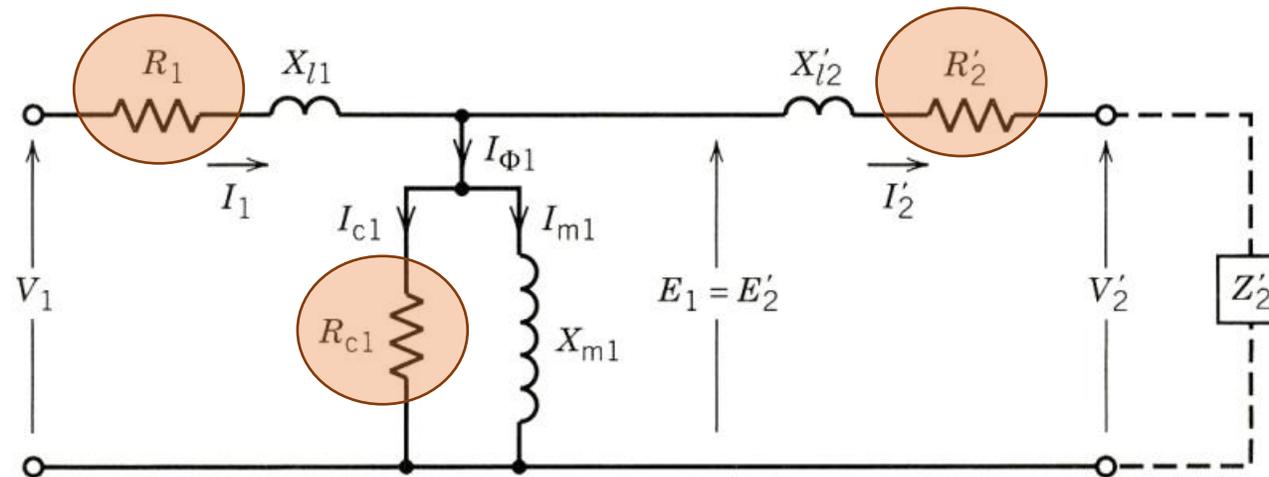
# Conceito de eficiência



# Eficiência do Transformador

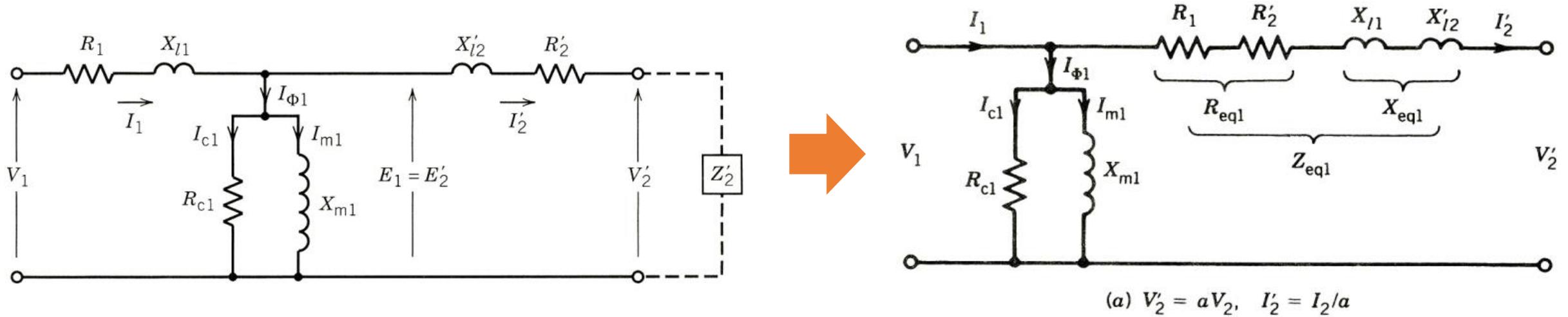
$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{P_s + P_{\text{erdas}}}$$

□ Quais são as perdas existentes no transformador?



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

# Circuito equivalente simplificado



□ Útil para estimativa de eficiência a partir dos ensaios do transformador.

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

# Características das perdas

- ❑ Perdas joulicas
  - Resistências dos enrolamentos
  - “Perdas no cobre”;
  - Função da impedância da carga
  - “Perdas variáveis”;
  - Estimadas no ensaio de curto-circuito.

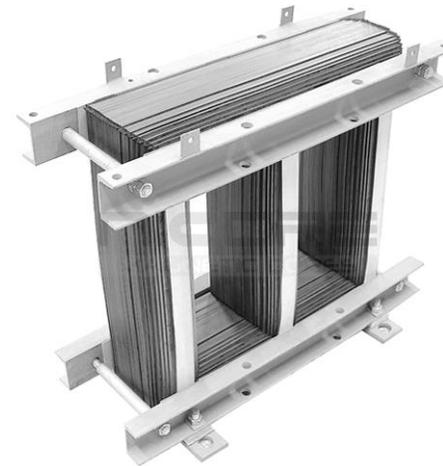


Fonte: Wise Transformadores.



Fonte: Wise Transformadores.

- ❑ Perdas magnéticas
  - Núcleo magnético
  - “Perdas no ferro”;
  - Função da tensão aplicada;
  - “Perdas fixas”;
  - Estimadas no ensaio a vazio.



Fonte: Nicore

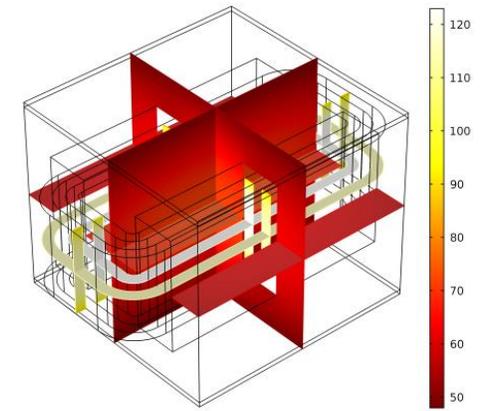
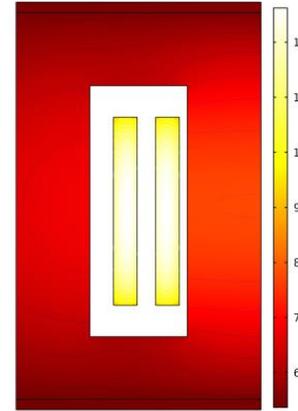
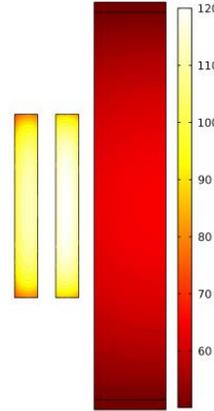
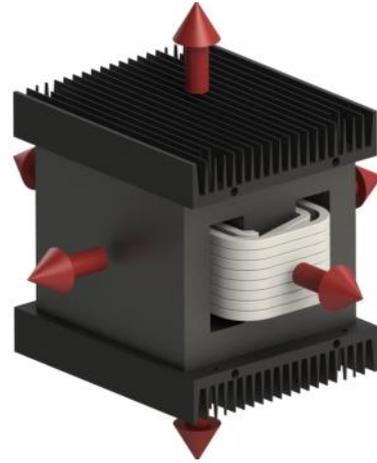


Fonte: Tessim Indústria.

# Consequência das perdas

❑ Para onde vai a energia dissipada?

❑ Simulação



❑ Protótipo



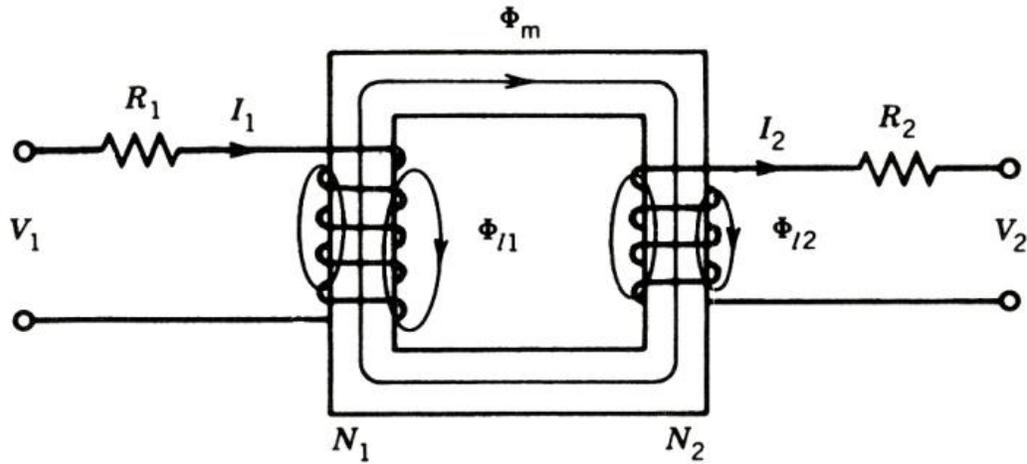
Operação a vazio



Operação a plena carga

D. Dujic and M. Mogorovic . “High-Power MV MFT Design Optimization Challenges”.

# Eficiência do Transformador



$$\eta = \frac{P_S}{P_e} = \frac{P_S}{P_S + P_{erdas}} = \frac{P_S}{P_S + P_{av} + P_{cc}}$$

$$\eta = \frac{P_S}{P_S + P_{av} + P_{cc}} \Leftrightarrow \boxed{\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \phi}{V_2 I_2 \cos \phi + P_{hf} + R_{eq,2} I_2^2}}$$

□ Note que neste caso, deve-se usar o valor de  $R_{eq}$  referido ao secundário:

$$R_{eq,2} = \frac{R_1}{a^2} + R_2$$

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

# Variação da eficiência com a carga

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \phi}{V_2 I_2 \cos \phi + P_{hf} + R_{eq,2} I_2^2}$$

- ❑ Note que a eficiência do transformador depende da carga;
- ❑ Existem perdas fixas e variáveis;
- ❑ Não existe um valor de eficiência, mas uma curva de eficiência;
- ❑ Pode existir uma eficiência máxima!



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

# Eficiência máxima do transformador

□ Para  $V_2$  e  $\phi$  constantes, qual o ponto de  $\eta_{max}$ ?

➤ Isto acontece quando  $\frac{d\eta}{dI_s} = 0$ ;

➤ Esta condição resulta em  $R_{eq}I_2^2 = P_{hf}$ ;

➤ Portanto, no ponto de eficiência máxima, a “perda no cobre” é igual a “perda no ferro”!

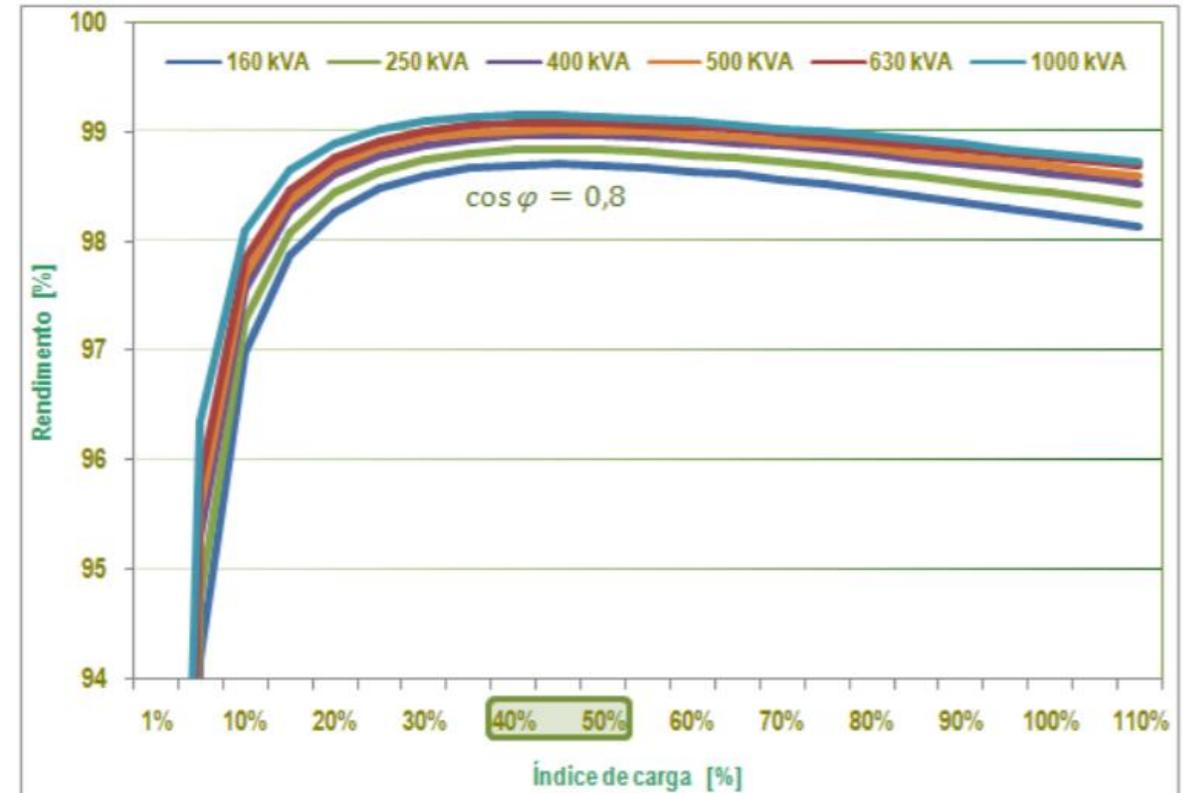
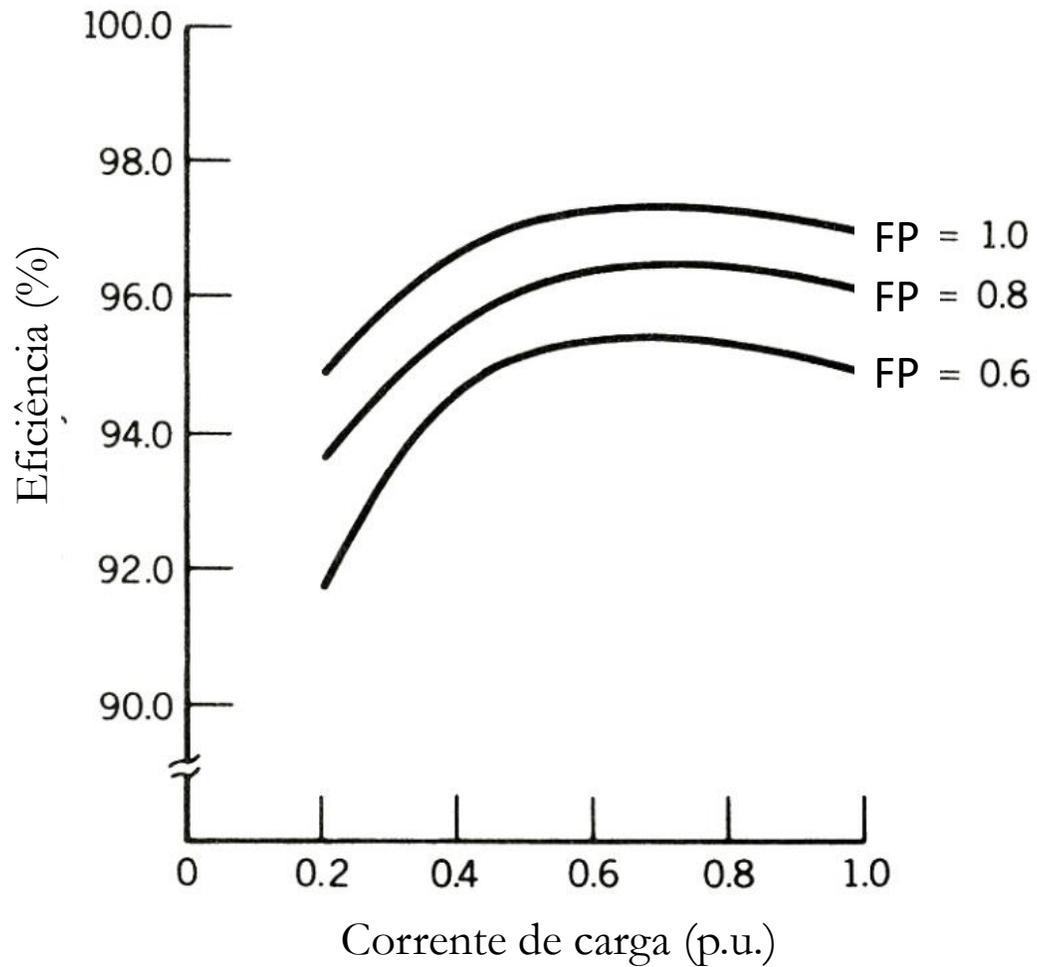
□ Para  $V_2$  e  $I_2$  constantes, qual o ponto de  $\eta_{max}$ ?

➤ Isto acontece quando  $\frac{d\eta}{d\phi} = 0$ ;

➤ Esta condição resulta em  $\phi = 0$ ;

➤ Portanto, a eficiência máxima acontece para um FP unitário.

# Gráfico típico de eficiência



Freitas, H. M. D (Junho/2008). Análise da eficiência energética em edifícios alimentados em média tensão. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Portugal.

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

## Exemplo

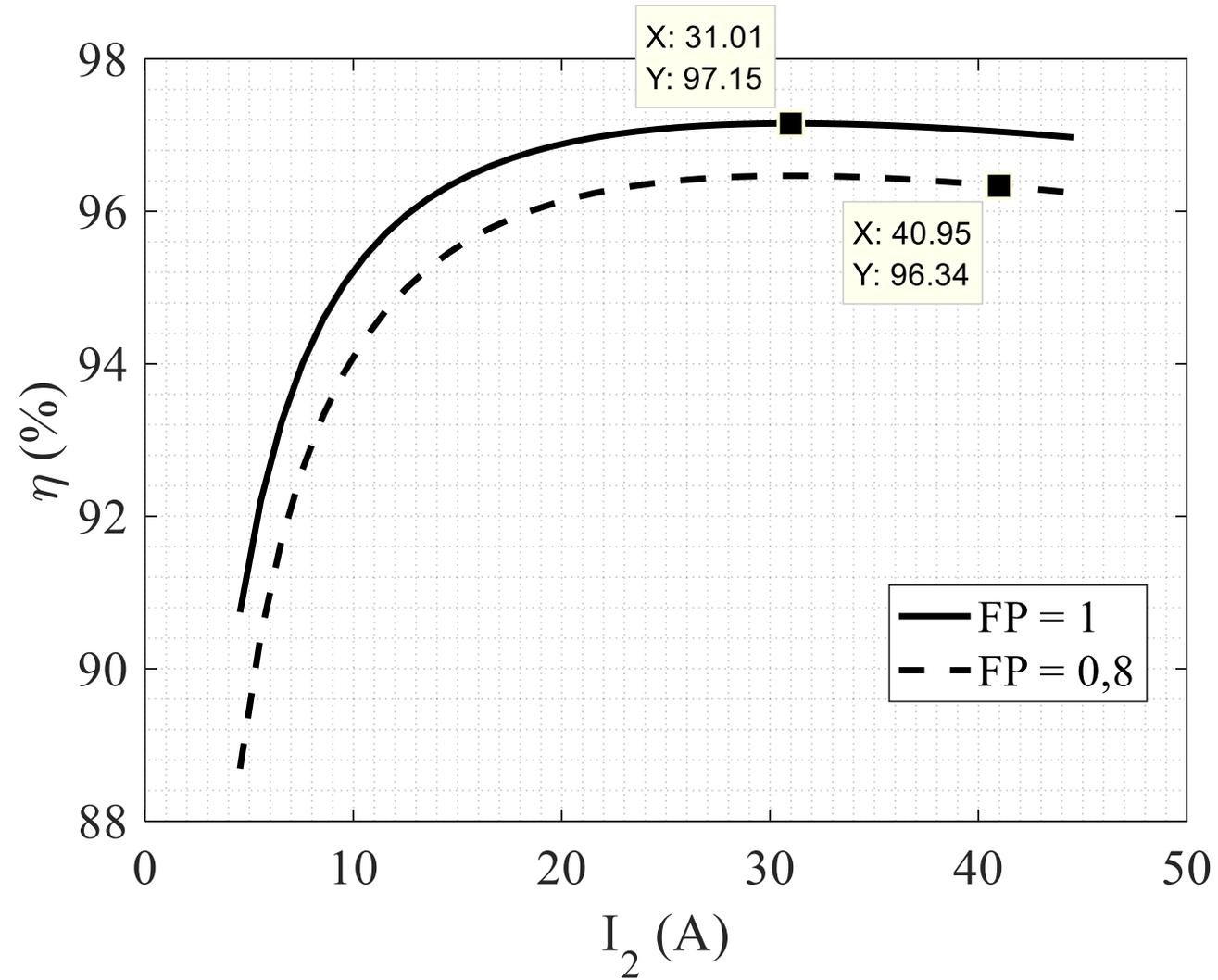
A tabela a seguir apresenta a leitura dos instrumentos utilizados nos ensaios a vazio e de curto-circuito em um transformador monofásico de 10 kVA, 2200/220 V e 60 Hz.

Determinar:

- O valor de corrente correspondente a eficiência máxima;
- O valor da eficiência máxima deste transformador;
- O valor da eficiência para uma carga com valor de 90 % e fator de potência 0,8 atrasado.

<b>Instrumento</b>	<b>Ensaio a vazio</b>	<b>Ensaio de Curto- Circuito</b>
Voltímetro	220 V	150 V
Amperímetro	2,5 A	4,55 A
Wattímetro	100 W	215 W

# Solução



# Obrigado pela Atenção



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



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



[https://www.instagram.com/gesep\\_vicosa/](https://www.instagram.com/gesep_vicosa/)



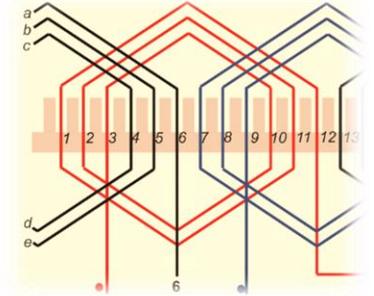
[https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh\\_hDBIcxMU2Nw](https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw)



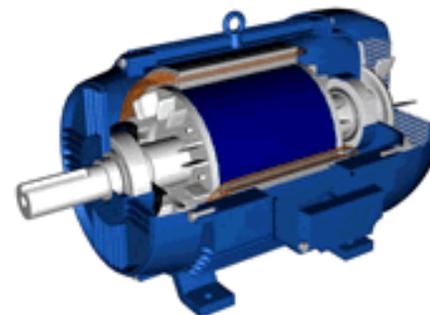
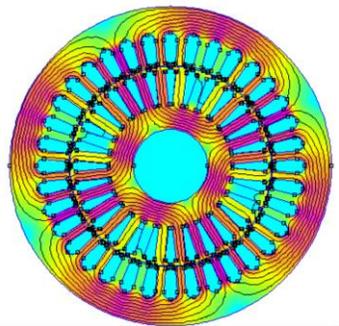
Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



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



# Regulação de tensão

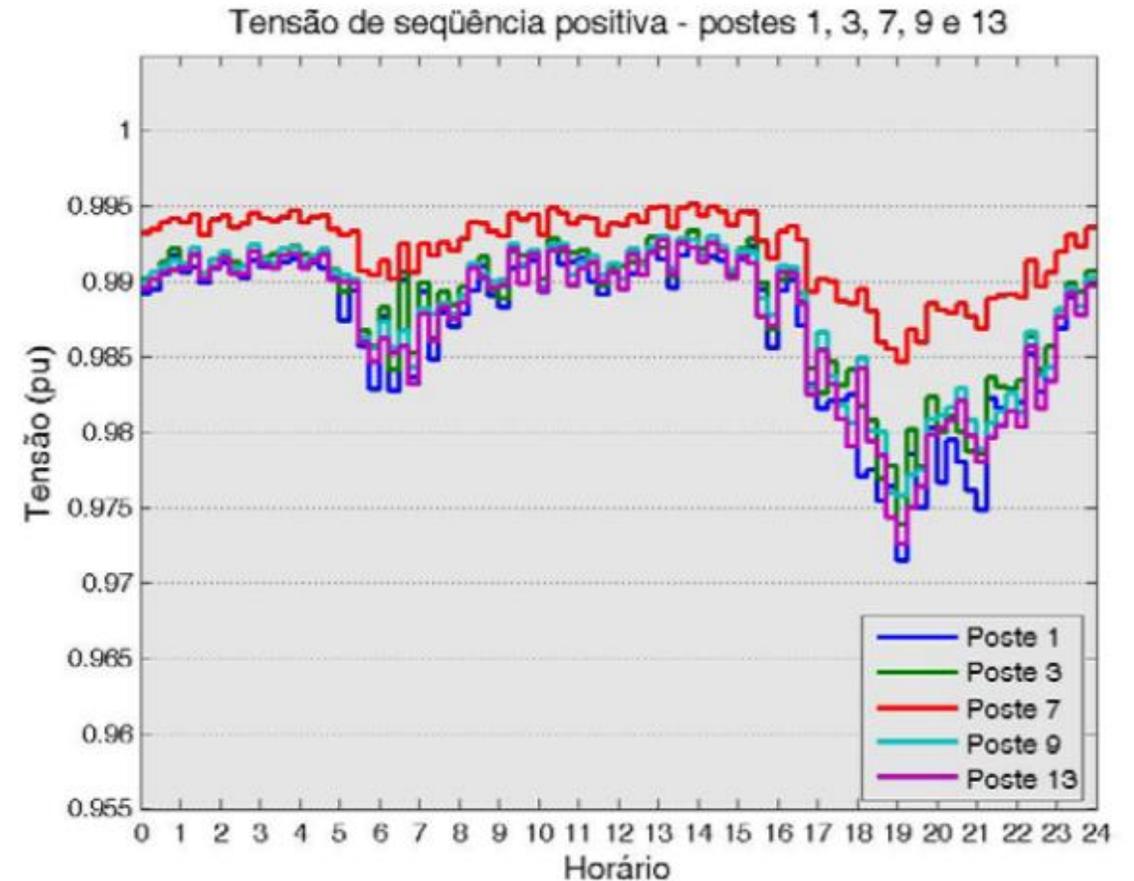


<http://www.semage.com.br/calternada.php>



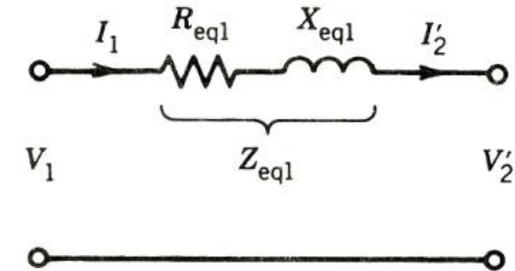
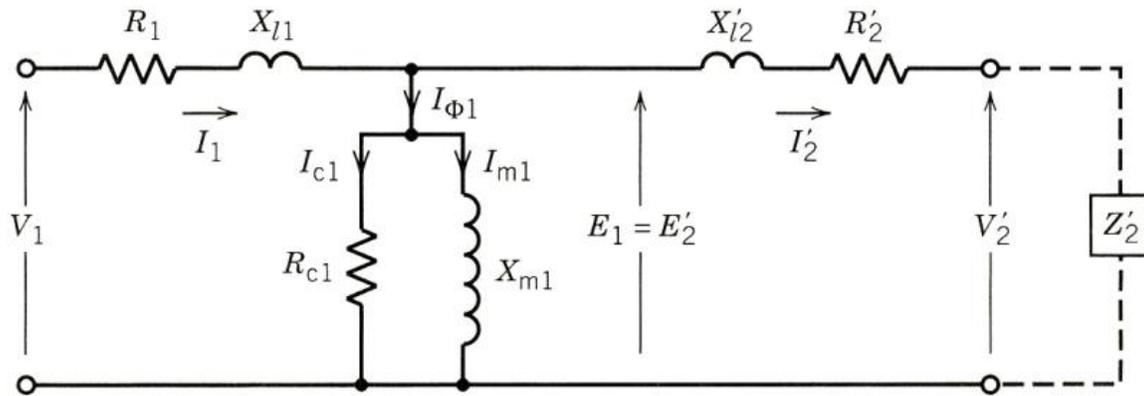
# Motivação

- ❑ Efeito da impedância do transformador;
- ❑ Tensão de saída varia com a carga;
- ❑ Regulação de tensão!



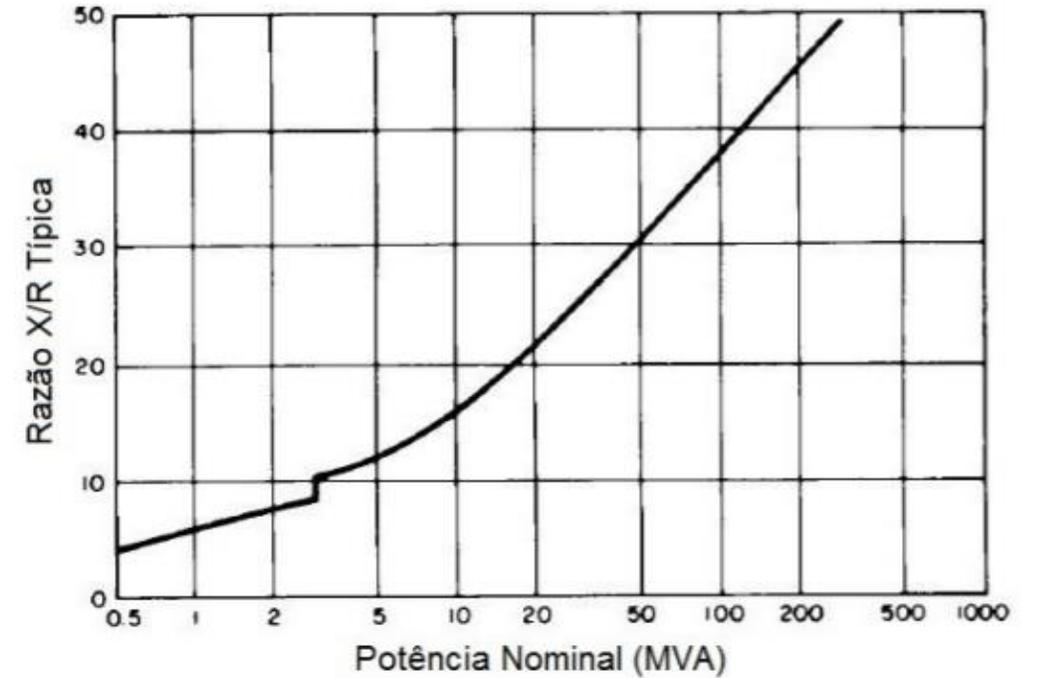
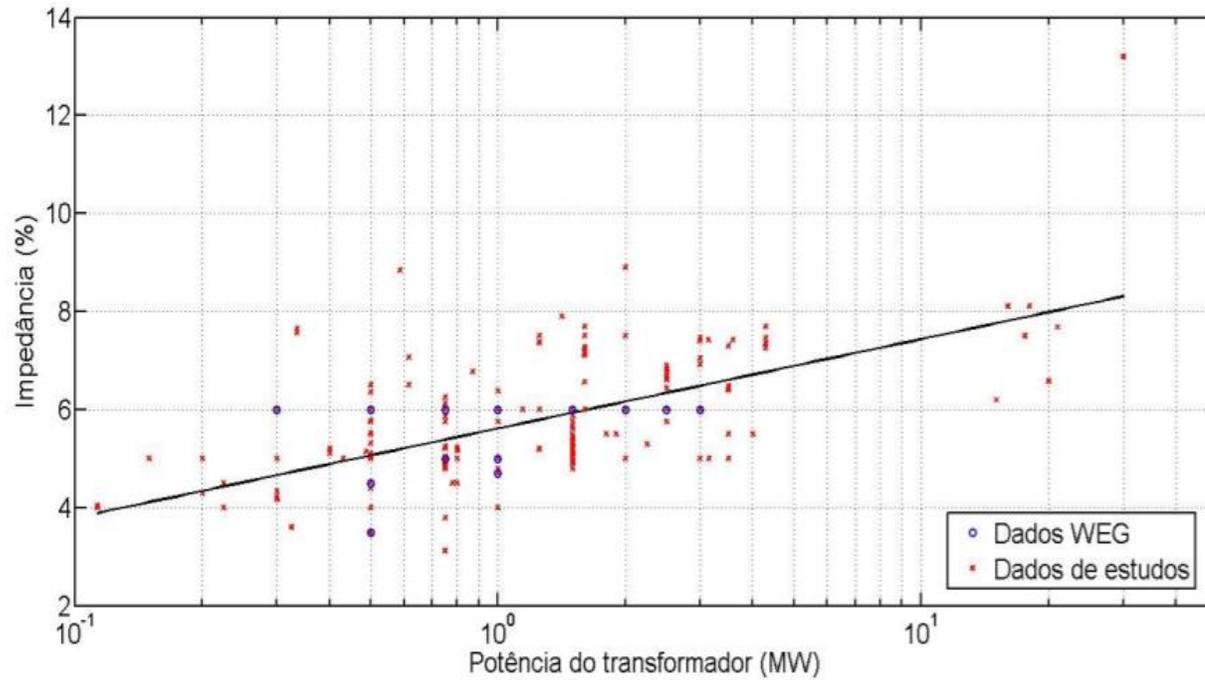
M. F. dos Santos “Análise de desempenho de uma rede de distribuição de energia elétrica em baixa tensão alternada e contínua”. Dissertação de mestrado - UFMG

# Circuito equivalente aproximado



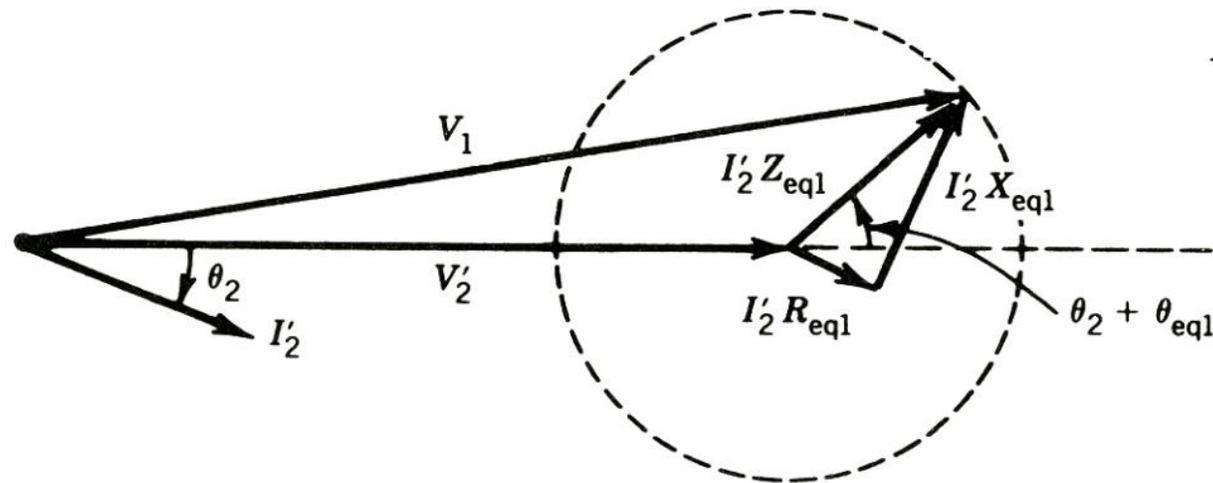
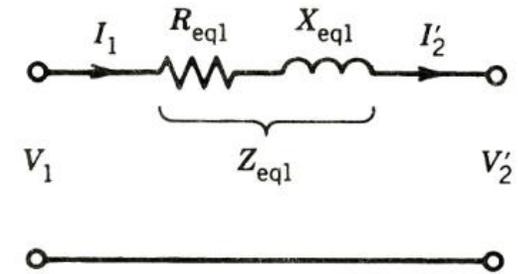
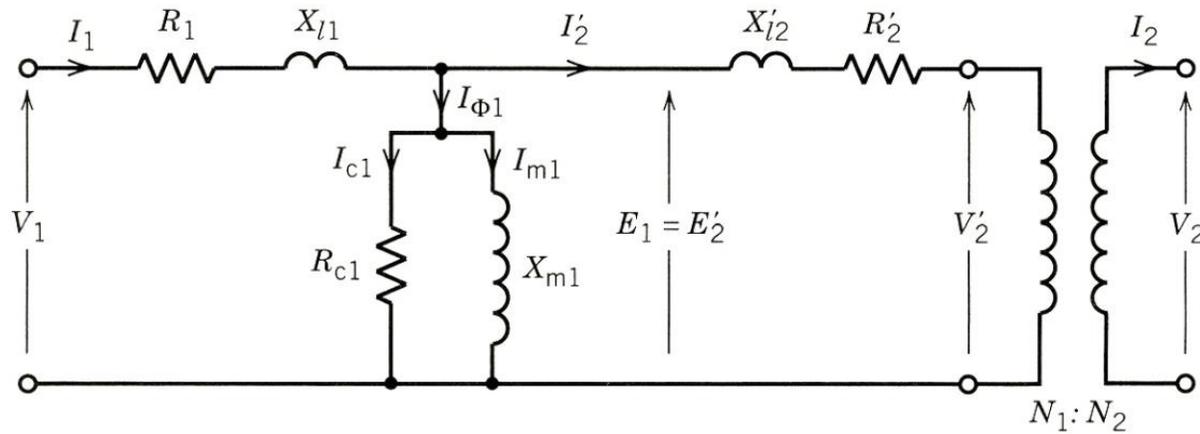
□ Útil para estimativa da regulação de tensão do transformador e fluxo de potência.

# Valores típicos



G. A. Mendonça “Avaliação das Abordagens Empregadas em Estudos de Propagação Harmônica em Sistemas Elétricos”. Dissertação de mestrado - UFMG

# Diagrama fasorial



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

# Regulação de tensão

$$R(\%) = 100 \frac{|V_1| - |V'_{n2}|}{|V'_{n2}|}$$

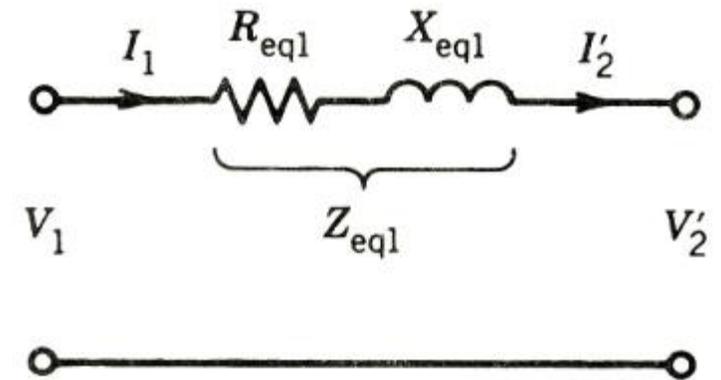
Onde:

$$V_1 = V'_{n2} + I'_2 R_{eq} + jI'_2 X_{eq}$$

$$V'_{n2} = \frac{V_{n2}}{a}$$

e  $V_{n2}$  é a tensão nominal do secundário do transformador.

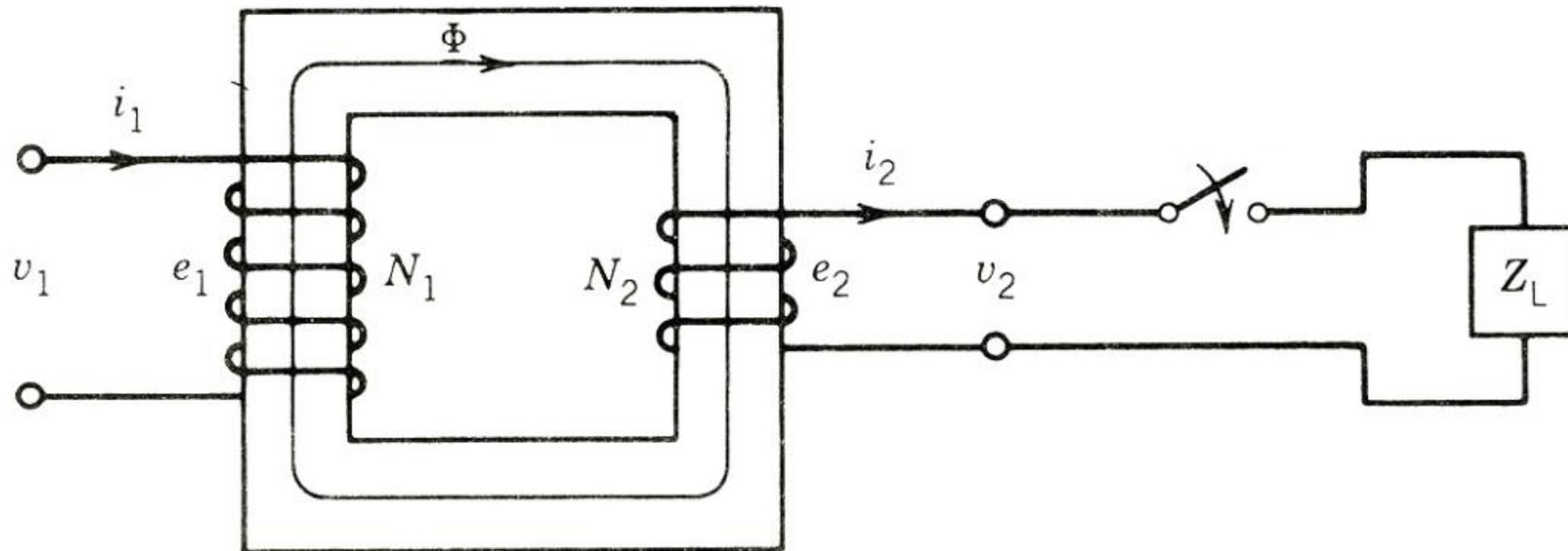
Nota: parâmetros referidos ao primário!



## Exemplo

Seja um transformador de 10 kVA, 2200/220 V e 60 Hz. O ensaio de curto-circuito permitiu calcular  $R_{eq} = 10,4 \Omega$  e  $X_{eq} = 31,3 \Omega$  referidos ao lado de alta tensão. Determinar a regulação de tensão para:

- 75 % da carga nominal e um fator de potência 0,6 atrasado;
- 75 % da carga nominal e um fator de potência 0,6 adiantado.



# Obrigado pela Atenção



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



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



[https://www.instagram.com/gesep\\_vicosa/](https://www.instagram.com/gesep_vicosa/)



[https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh\\_hDBIcxMU2Nw](https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw)



Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



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