

Transformador

Introdução

⇒ Resultados do ensaio em carregamento de um trafo monofásico:

| Potência no Primário (W) | Potência no Secundário (W) | Rendimento (%) |
|--------------------------|----------------------------|----------------|
| 35 | 0 | |
| 96 | 60 | |
| 155 | 120 | |
| 210 | 180 | |
| 265 | 240 | |
| 325 | 295 | |
| 375 | 345 | |
| 430 | 400 | |
| 480 | 450 | |
| 540 | 510 | |

Introdução

- ⇒ Os transformadores são construídos para serem máquinas com elevada eficiência, algo entre **96 e 99%**.
- ⇒ No entanto, eles **não estão “livres” de perdas** e se sabe que o **rendimento varia com o seu carregamento**.
- ⇒ Estima-se que cerca de 14% de toda a energia elétrica gerada no Brasil são consideradas perdas (técnicas e comerciais) nos sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica.
- ⇒ E **30% das perdas técnicas** se devem às perdas nos núcleos dos **transformadores**.
- ⇒ Portanto, entender como se dão as perdas nos transformadores e meios de determiná-las pode ser um fator importante para melhorar a eficiência energética de uma instalação.

Revisão

⇒ O transformador pode ser, basicamente, dividido nos seguintes elementos:

⇒ **Enrolamentos:** fios de cobre de seção circular ou retangular, isolados com esmalte ou papel

⇒ **Núcleo:** constituído por material ferromagnético, em chapas finas isoladas entre si, contendo silício em sua composição. Este deve proporcionar excelentes características de magnetização e perdas reduzidas.

⇒ **Tanque e meio refrigerante:** invólucro da parte ativa (núcleo+enrolamentos) e recipiente para o óleo isolante.

⇒ **Acessórios:** terminais, buchas, parafusos, tampas, sensores, radiadores etc destinados a auxiliar o funcionamento do transformador.

Revisão

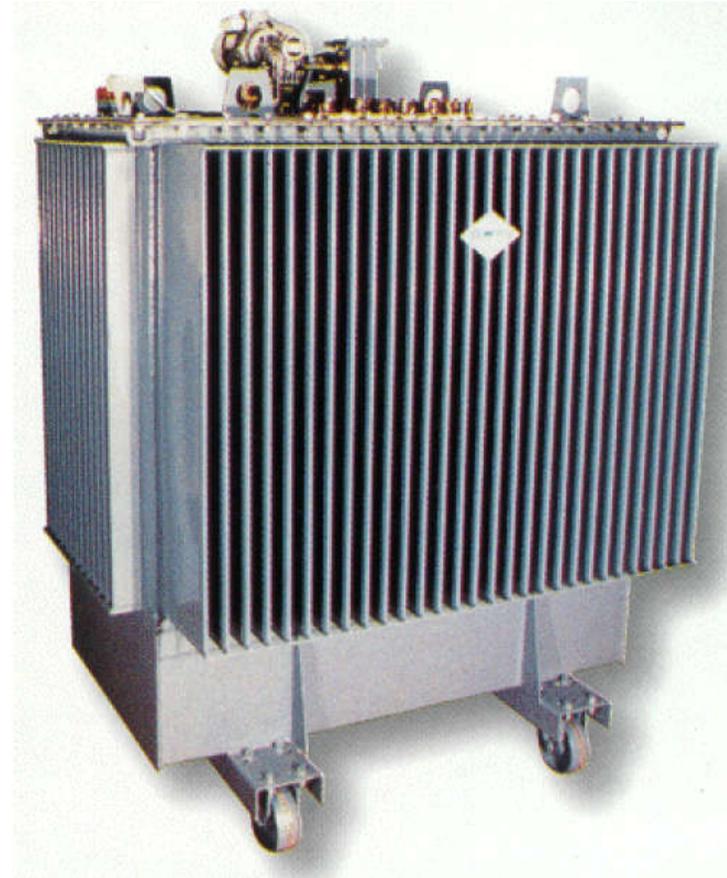


Fig. 22a/b: three-phase transformer 100 kVA (Ortea)

Revisão

Transformador utilizado em subestação de sistemas de distribuição (cerca de 3,5 metros de altura)



Revisão

Corte em um transformador de distribuição

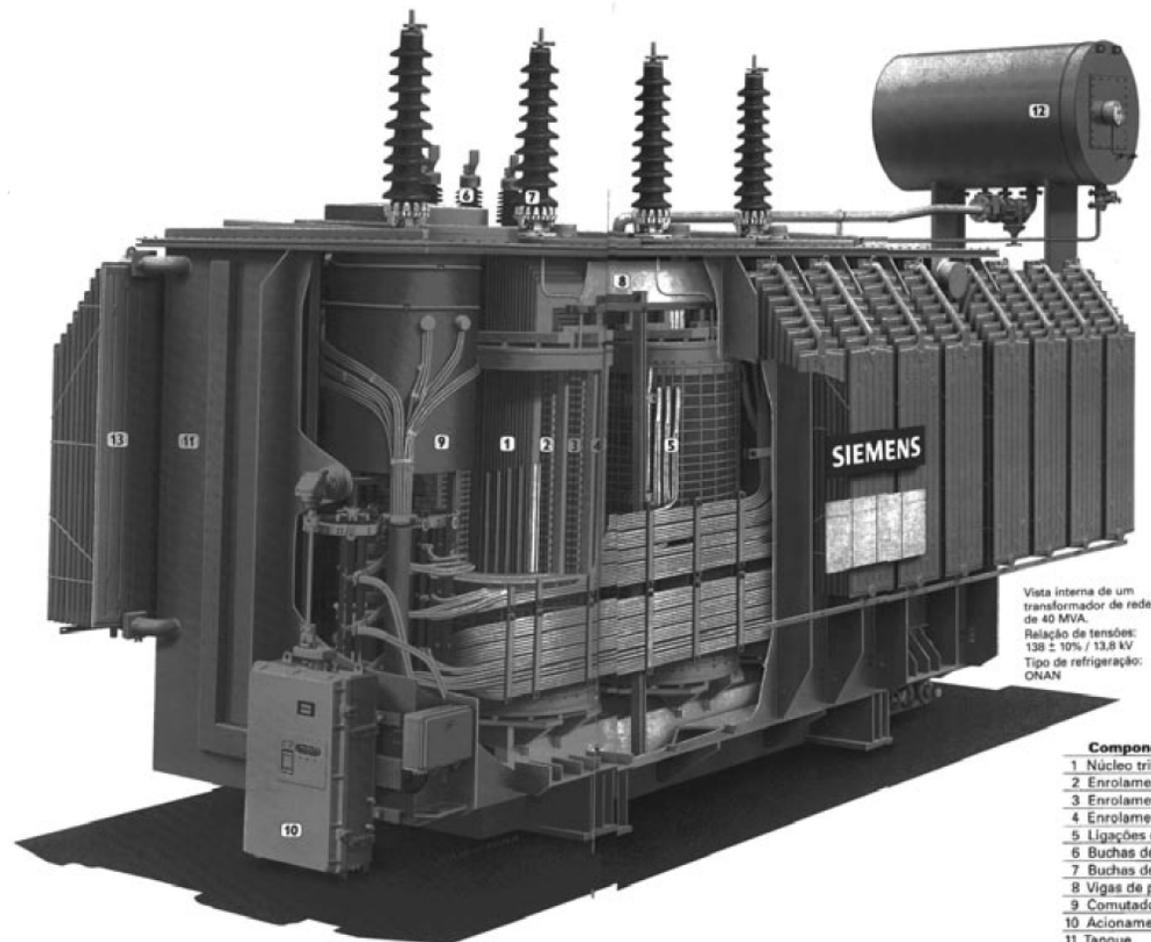


Revisão

Transformador de subestação de sistemas de transmissão ou subtransmissão



Revisão



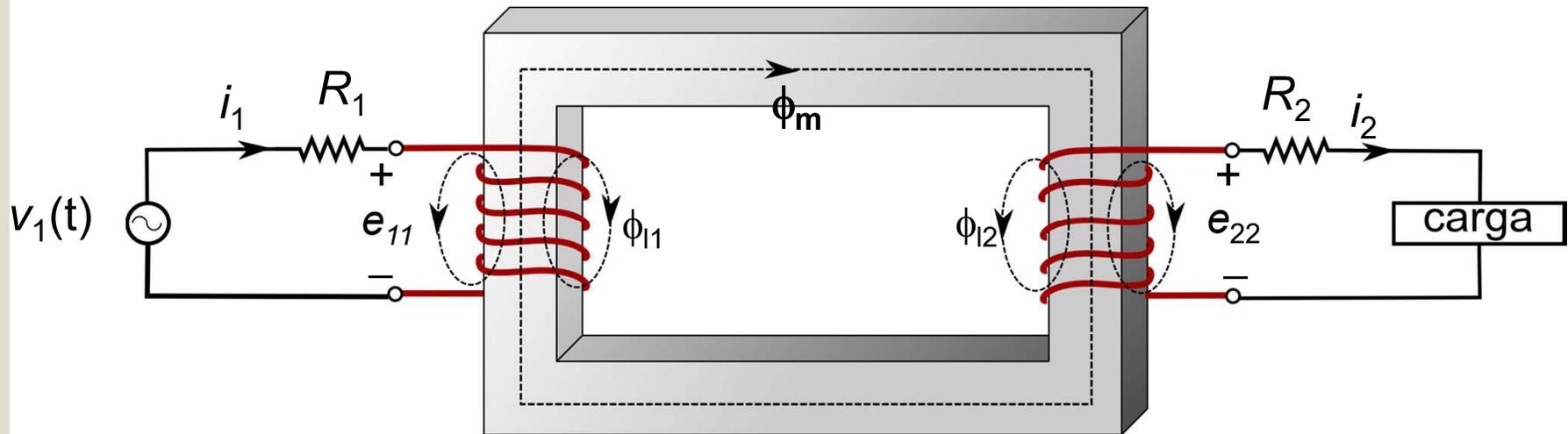
Vista interna de um transformador de rede de 40 MVA.
Relação de tensões:
138 ± 10% / 13,8 kV
Tipo de refrigeração:
ONAN

- | Componentes | |
|-------------|----------------------------------|
| 1 | Núcleo trifásico |
| 2 | Enrolamentos de baixa tensão |
| 3 | Enrolamentos de alta tensão |
| 4 | Enrolamentos de regulação |
| 5 | Ligações das derivações |
| 6 | Buchas de baixa tensão |
| 7 | Buchas de alta tensão |
| 8 | Vigas de prensagem do núcleo |
| 9 | Comutador de derivações em carga |
| 10 | Acionamento motorizado |
| 11 | Tanque |
| 12 | Tanque de expansão |
| 13 | Radiadores |

Transformador de 40 MVA – 138/13,8 kV

Revisão – Princípio de Funcionamento

⇒ Transformador Real



$\phi_m \rightarrow$ fluxo mútuo produzido pelo efeito combinado das correntes do primário e do secundário

$\phi_{l1} \rightarrow$ fluxo de dispersão do primário

$\phi_{l2} \rightarrow$ fluxo de dispersão do secundário

$R_1 \rightarrow$ resistência do enrolamento do primário

$R_2 \rightarrow$ resistência do enrolamento do secundário

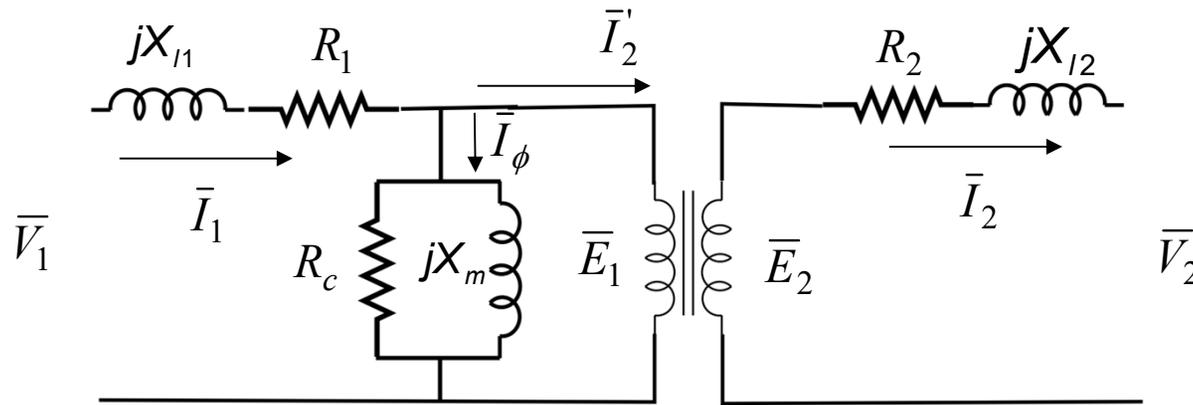
Revisão – Princípio de Funcionamento

⇒ O transformador real possui as seguintes características:

- As resistências dos enrolamentos não são desprezíveis
- A permeabilidade magnética do núcleo é finita (portanto é necessário haver uma corrente de magnetização não nula e a relutância do núcleo é diferente de zero)
- Há dispersão do fluxo magnético
- Há perdas no núcleo (por correntes parasitas e histerese)

Revisão – Princípio de Funcionamento

⇒ Circuito equivalente:



$X_{l1} \rightarrow$ reatância de dispersão do primário

$X_{l2} \rightarrow$ reatância de dispersão do secundário

$R_C \rightarrow$ resistor fictício que representa as perdas no núcleo

$X_m \rightarrow$ reatância de magnetização

Perdas Elétricas em Transformadores

⇒ Perdas no circuito elétrico

- Perdas RI^2 devidas à corrente de carga
- Perdas RI^2 devidas à corrente de excitação
- Perdas por correntes parasitas devidas ao fluxo de dispersão

⇒ Perdas no circuito magnético

- Perdas por histerese no núcleo
- Perdas por correntes parasitas de Foucault, no núcleo
- Perdas por dispersão das correntes parasitas no núcleo por meio dos grampos, parafusos etc

Perdas no Circuito Elétrico

⇒ Perdas RI^2 devidas à corrente de carga

- *Como reduzir essas perdas?*
 - Aumentar fator de potência das cargas;
 - Aumentar a seção transversal dos condutores dos enrolamentos (trafos maiores);
 - Reduzir o comprimento dos condutores.

⇒ Perdas RI^2 devidas à corrente de excitação

- Podem ser desprezadas por serem muito pequenas. Em geral, a corrente de excitação é cerca de 5% da corrente nominal do transformador.

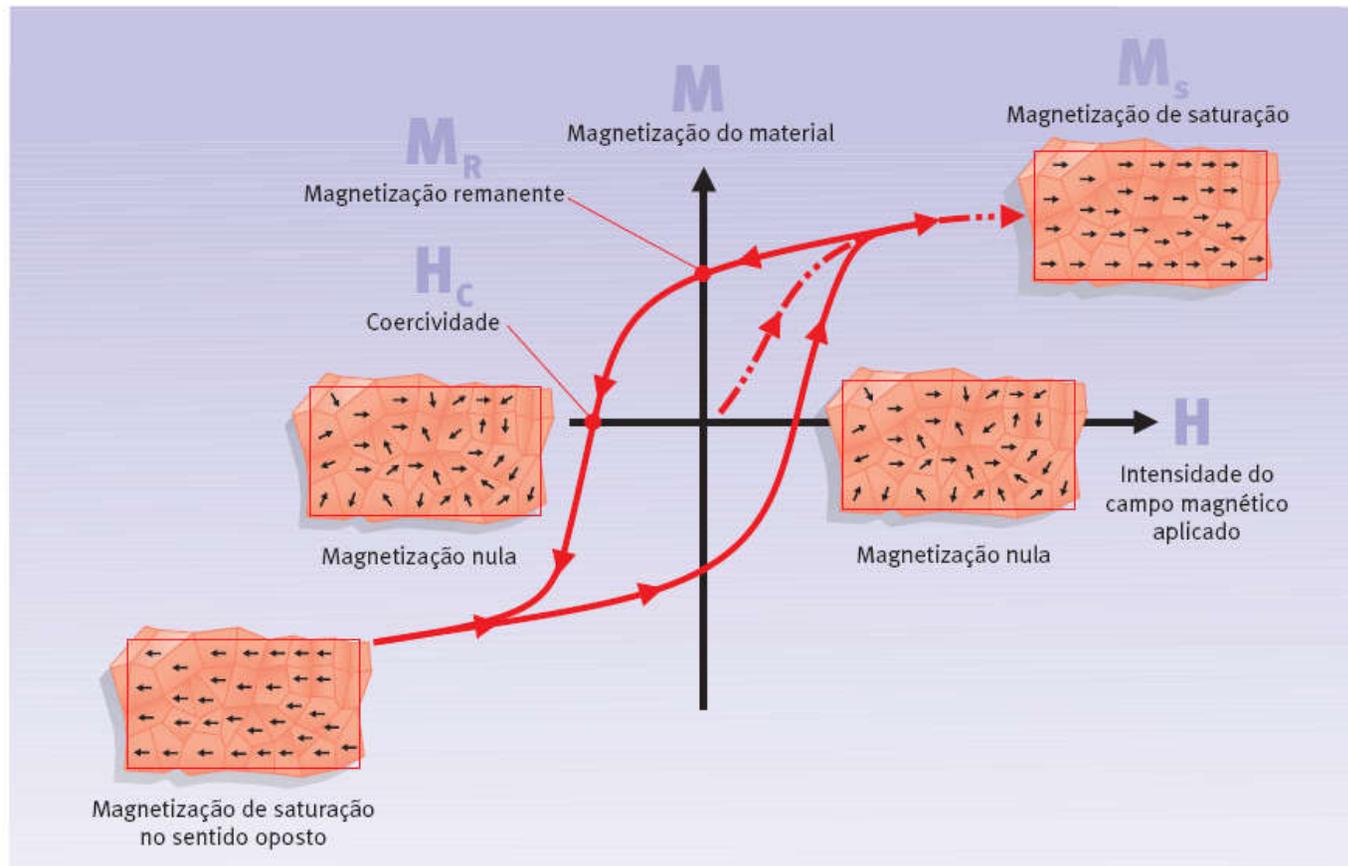
Perdas no Circuito Elétrico

⇒ Perdas por correntes parasitas devidas ao fluxo de dispersão

- São perdas de difícil cálculo e que normalmente são adicionadas como um percentual fixo nas perdas devidas à corrente de carga.
- A determinação deste percentual é experimental e varia conforme o tipo do transformador.
- *Em geral essas perdas são proporcionais ao fluxo de dispersão, à massa do cobre e ao quadrado da dimensão de cada condutor pelos quais passa o fluxo de dispersão.*
- O único fator que pode ser alterado para tentar reduzir as perdas é a dimensão dos condutores. Então, pode-se reduzir a dimensão, subdividindo os condutores e isolando-os uns dos outros.

Perdas no Circuito Magnético

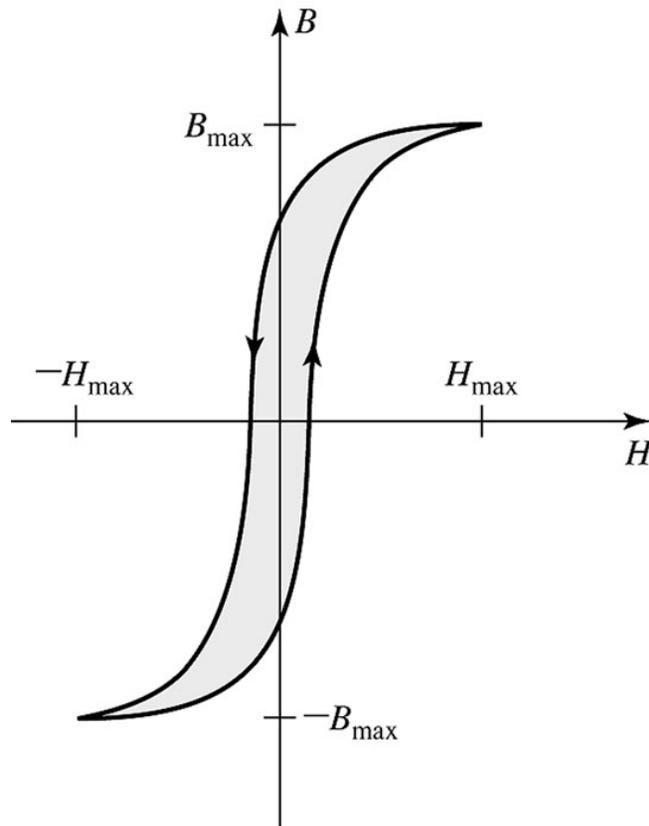
⇒ Perdas por histerese no núcleo



Ciclo de Histerese

Perdas no Circuito Magnético

⇒ Perdas por histerese no núcleo



$$P_{\text{histerese}} = A.l.f. \oint HdB$$

$$\oint HdB = K_h B_{\text{max}}^n$$

n e K_h são constantes que dependem do material ferromagnético (Steinmetz - GE)

Perdas no Circuito Magnético

⇒ Perdas por correntes parasitas de Foucault no núcleo

- São correntes que circulam no material ferromagnético, provocando aquecimento. Portanto, representam energia não transferida para a carga do transformador.

Perdas no Circuito Magnético

⇒ Perdas por correntes parasitas de Foucault no núcleo

- Podem ser reduzidas de duas formas:
 - Usar um material ferromagnético de elevada resistividade. A adição de uma pequena porcentagem de silício ao aço pode aumentar sua resistividade significativamente.
 - Laminação do núcleo

$$P_{foucault} = K_e B_{\max}^2 f^2$$

K_e depende do tipo do material e da espessura de cada lâmina

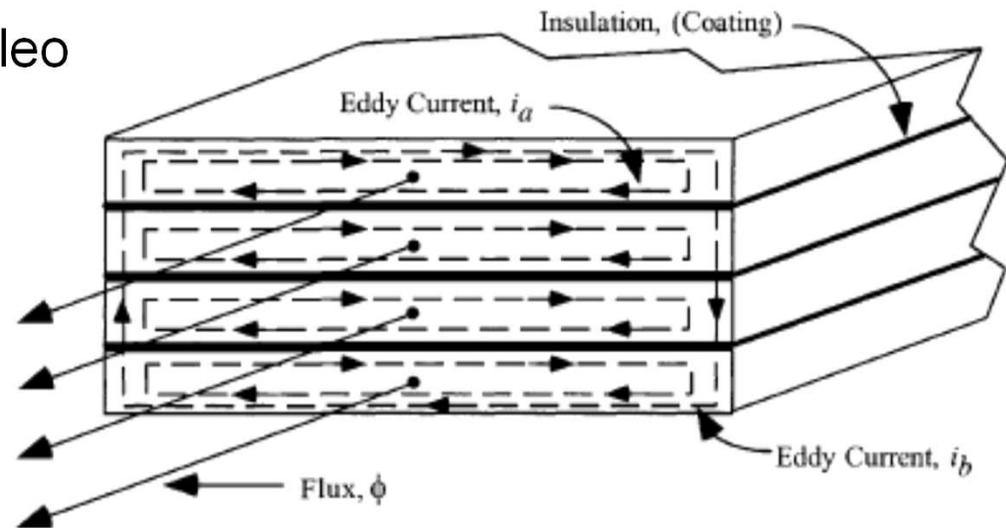


Figure 3-6. Insulation is Required Between Laminations to Reduce Eddy Currents.

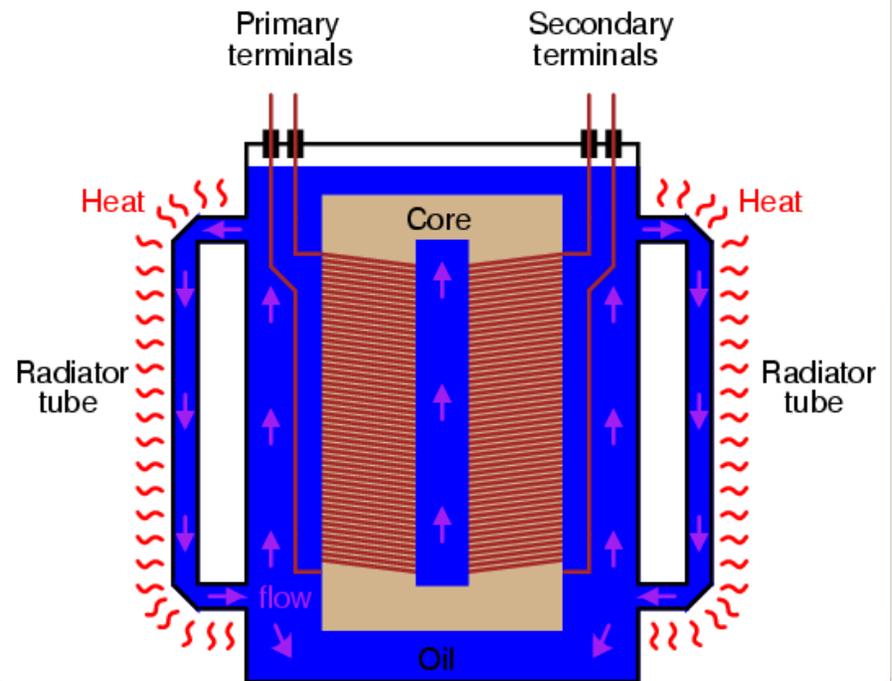
Perdas no Circuito Magnético

⇒ Perdas por dispersão das correntes parasitas no núcleo e no tanque

- São perdas difíceis de serem determinadas e usualmente, admite-se adicionar uma porcentagem às perdas no núcleo e no cobre.

⇒ Dissipação de calor

- Projeto de tanques eficientes
- Radiadores
- Ventiladores



Rendimento

⇒ Os transformadores são projetados para operarem com alto rendimento.

⇒ Os seguintes aspectos contribuem para que os transformadores apresentem valores baixos de perdas:

- O transformador é uma máquina estática, ou seja, não tem partes rotativas, não apresentando, portanto, perdas por atrito no eixo e por resistência do ar no entreferro.
- O núcleo é constituído por placas laminadas e dopadas de materiais de alta resistência elétrica, as quais têm o objetivo de minimizar as perdas por correntes parasitas.
- Materiais com alta permeabilidade magnética são utilizados para diminuir as perdas por histerese.
- Transformadores de alta potência apresentam rendimento maior que 99 %.

Rendimento



$$P_{PERDAS} = P_{ENTRADA} - P_{SAIDA}$$

$$\eta = \frac{P_{SAIDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{P_{SAIDA}}{P_{SAIDA} + P_{PERDAS}}$$

As perdas no transformador incluem:

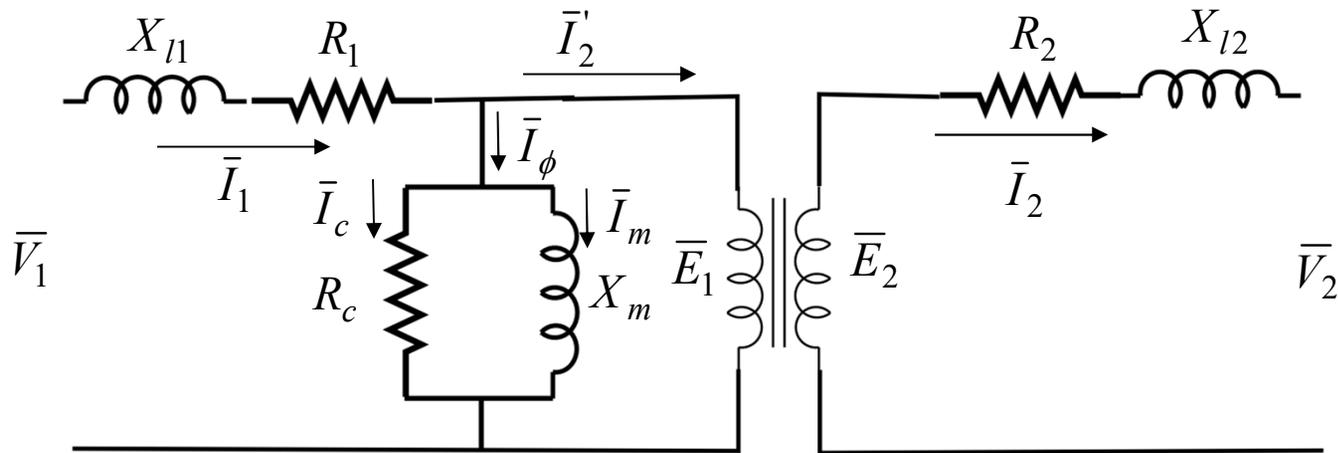
- ✓ Perdas no núcleo (ferro): P_C (perdas por correntes parasitas e perdas por histerese)
- ✓ Perdas no cobre: P_{Cu} (perdas ôhmicas)

Portanto:

$$\eta = \frac{P_{SAIDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{P_{SAIDA}}{P_{SAIDA} + P_C + P_{Cu}}$$

Como determinar essas perdas?

Rendimento: Perdas no Cobre



$$P_{Cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_{eq,1} = I_2^2 R_{eq,2}$$

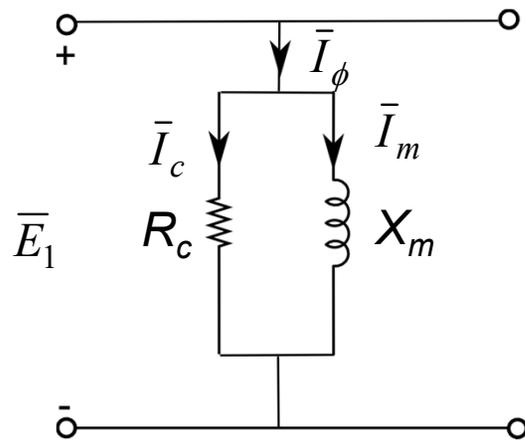
$R_{eq,1}$ = resistência equivalente dos enrolamentos referida ao primário

$R_{eq,2}$ = resistência equivalente dos enrolamentos referida ao secundário

As perdas no cobre são, portanto, proporcionais ao quadrado da corrente de carga.

Rendimento: Perdas no Núcleo

⇒ As perdas no núcleo podem ser determinadas pelo teste em vazio, ou a partir dos parâmetros do circuito equivalente.



$$P_C = R_C I_C^2 = R_C \left(\frac{E_1}{R_C} \right)^2 = \frac{E_1^2}{R_C}$$

As perdas no núcleo são, portanto, proporcionais ao quadrado da tensão aplicada.

Rendimento: Potência de Saída

⇒ A potência de saída do transformador pode ser obtida por:

$$P_{SAIDA} = V_2 I_2 \cos \theta_2$$

⇒ Finalmente, a partir da obtenção dos valores de perdas no núcleo e no cobre, o rendimento do transformador em estudo pode ser obtido, para qualquer condição de operação por:

$$\eta = \frac{P_{SAIDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + \frac{E_1^2}{R_C} + I_2^2 R_{eq,2}}$$

Rendimento: Potência de Saída

⇒ Considerando que a tensão na carga é mantida constante e que as perdas no núcleo praticamente não variam com o carregamento, pode-se concluir que o rendimento depende da corrente exigida pela carga (I_2) e do fator de potência da carga ($\cos\theta_2$)

$$\eta = \frac{P_{SAIDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_C + I_2^2 R_{eq,2}}$$

Condições para Rendimento Máximo

⇒ **Variação na corrente de carga (I_2):**

Considerando a tensão na carga (V_2) e o fator de potência ($\cos\theta_2$) constantes, e avaliando somente a variação da corrente de carga (I_2), tem-se que o rendimento máximo ocorre para:

$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0$$

Temos que:

$$\frac{d\eta}{dI_2} = \frac{V_2 \cos\theta_2 (V_2 I_2 \cos\theta_2 + P_C + I_2^2 R_{eq,2}) - V_2 I_2 \cos\theta_2 (V_2 \cos\theta_2 + 2I_2 R_{eq,2})}{(V_2 I_2 \cos\theta_2 + P_C + I_2^2 R_{eq,2})^2} = 0$$

Condições para Rendimento Máximo

⇒ Variação na corrente de carga (I_2):

Logo, temos que:

$$V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_C + I_2^2 R_{eq,2} = V_2 I_2 \cos \theta_2 + 2I_2^2 R_{eq,2}$$

E, finalmente, isolando P_C :

$$P_C = I_2^2 R_{eq,2} = P_{Cu}$$

Do resultado acima, pode-se concluir que o rendimento máximo ocorre quando as **perdas no núcleo se igualam às perdas no cobre**.

Condições para Rendimento Máximo

⇒ **Variação no fator de potência ($\cos\theta_2$):**

Considerando agora somente a variação do ângulo θ_2 , tem-se que o rendimento máximo ocorre para:

$$\frac{d\eta}{d\theta_2} = 0$$

Temos que:

$$\frac{d\eta}{d\theta_2} = \frac{-V_2 I_2 \operatorname{sen}\theta_2 (V_2 I_2 \cos\theta_2 + P_C + I_2^2 R_{eq,2}) - V_2 I_2 \cos\theta_2 (-V_2 I_2 \operatorname{sen}\theta_2)}{(V_2 I_2 \cos\theta_2 + P_C + I_2^2 R_{eq,2})^2} = 0$$

Condições para Rendimento Máximo

⇒ **Variação no fator de potência ($\cos\theta_2$):**

Simplificando a expressão anterior, temos que:

$$V_2 I_2 (P_C + I_2^2 R_{eq,2}) \text{sen}\theta_2 = 0$$

Para que essa equação seja válida:

$$\text{sen}\theta_2 = 0$$

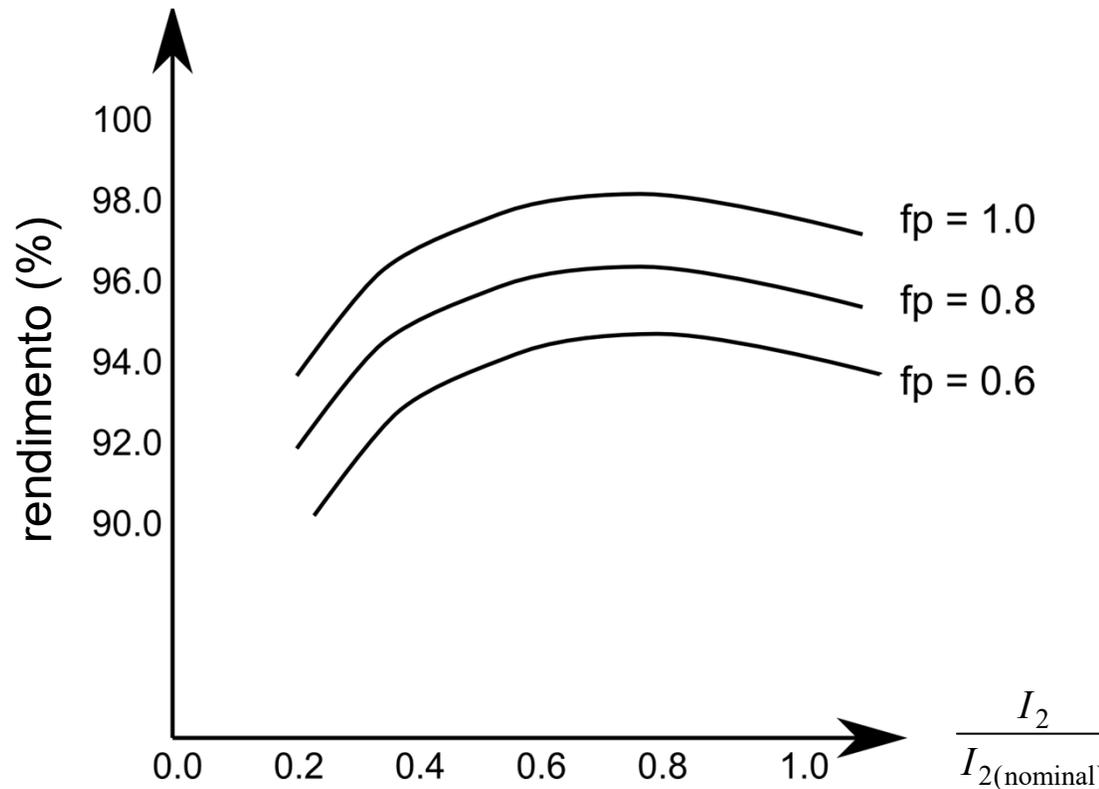
ou

$$\theta_2 = 0 \Rightarrow \cos\theta_2 = 1 \text{ (fator de potência unitário)}$$

Portanto, o rendimento máximo ocorre para quando o **fator de potência da carga ($\cos\theta_2$) é unitário.**

Rendimento

⇒ Usualmente, emprega-se um gráfico que representa a variação do rendimento com a corrente de carga e o fator de potência da carga.



⇒ O transformador pode ser projetado para apresentar rendimento máximo para corrente no secundário (I_2) próxima da nominal.

Rendimento Diário

⇒ Transformadores utilizados para atender as cargas do secundário em sistemas de distribuição usualmente atendem uma carga bastante variável. Neste caso, uma figura de mérito importante é o rendimento diário (ou rendimento energético), o qual pode ser calculado por:

$$\eta_D = \frac{\text{energia de saída em 24 horas}}{\text{energia de entrada em 24 horas}} = \frac{\text{energia de saída em 24 horas}}{\text{energia de saída em 24 horas} + \text{perdas em 24 horas}}$$

Operação de Transformadores em Paralelo

⇒ Aumento da confiabilidade no suprimento de energia elétrica

⇒ Aumento da capacidade de fornecimento de energia

⇒ O paralelismo de transformadores deve ser feito de forma a minimizar a circulação de corrente entre os mesmos, a fim de reduzir as perdas relativas a essa circulação. Para isso, devem ser obedecidas as seguintes condições:

- (1) mesma relação de transformação (fundamental)
- (2) mesmo grupo de defasamento angular (fundamental)
- (3) mesma impedância percentual (desejado)
- (4) mesma relação R/X (desejado)

Novas Tecnologias

⇒ A busca pela redução das perdas em transformadores tem levado os fabricantes a pesquisarem novos materiais. Algumas das tecnologias são apresentadas em seguida.

Alterações no formato dos condutores

⇒ Uso de condutores planos no formato de tiras:

- Reduz as perdas por correntes parasitas nos condutores
- Permite que uma maior quantidade de cobre seja instalada em espaços menores

Novas Tecnologias

Alterações no formato dos condutores

⇒ Resultados experimentais:

Comparação de transformador 48/64/80 MVA Convencional e Avançado

| Característica do transformador | Convencional | Avançado | Melhoria |
|--|--------------|----------|----------|
| Peso do núcleo e enrolamento (1000 kg) | 89,36 | 84,46 | 5,5 % |
| Perda a vazio (kW) | 21,5 | 19,3 | 10,4 % |
| Perda em carga (kW) | 90,8 | 76,6 | 17,0 % |
| Perda total (kW) | 112,3 | 95,9 | 14,6 % |

Novas Tecnologias

Aço Silício de Baixas Perdas / Metal Amorfo

⇒ Redução das perdas em vazio

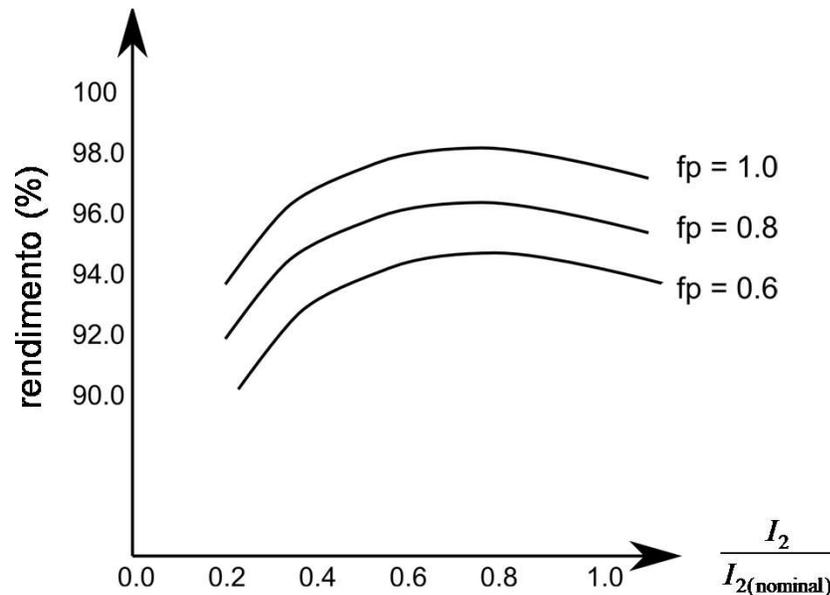
Aço Silício de Baixas Perdas / Metal Amorfo

Comparação dos valores de Perdas em vazio (W)

| Potência (kVA) | Silício típico | Silício de baixas perdas | Amorfo |
|----------------|----------------|--------------------------|--------|
| Monofásicos | | | |
| 10 | 60 | 30 | 11 |
| 25 | 100 | 50 | 20 |
| 50 | 210 | 105 | 32 |
| 75 | 260 | 130 | 39 |
| 100 | 320 | 160 | 54 |
| Trifásicos | | | |
| 75 | 370 | 185 | 67 |
| 150 | 540 | 270 | 107 |
| 300 | 950 | 475 | 185 |
| 500 | 1400 | 710 | 260 |
| 750 | 1750 | 875 | 310 |
| 1000 | 2400 | 1200 | 420 |
| 1500 | 3600 | 1800 | 555 |
| 2000 | 4000 | 2000 | 750 |
| 2500 | 4800 | 2400 | 850 |

Operação Otimizada

⇒ Análise do carregamento



Quais as implicações de operar em baixa carga ou em vazio?

⇒ Condições para rendimento máximo

- perdas no núcleo se igualam às perdas no cobre
- fator de potência da é unitário.

Referências Bibliográficas

⇒ P. C. Sen. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, Inc. 2nd. 1997.

⇒ A. H. M. Santos et al. *Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos*. Itajubá: Ed. da EFEI, 2006. 3^a edição revista e ampliada. Disponível em <http://www.eletronbras.com>