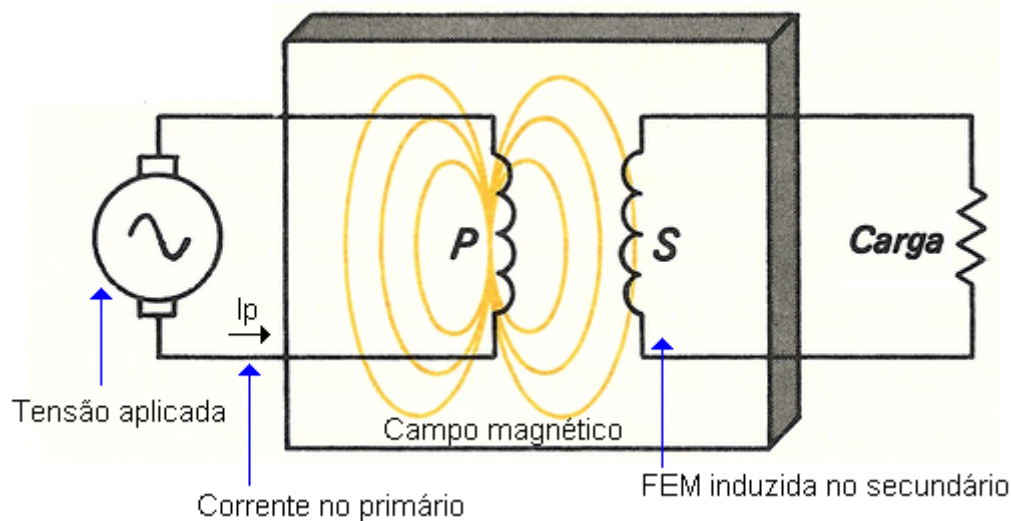


TRANSFORMADORES

Podemos definir o transformador como sendo um dispositivo que transfere energia de um circuito para outro, sem alterar a frequência e sem a necessidade de uma conexão física.

Quando existe indutância mútua entre duas bobinas (ou dois indutores), uma variação de corrente em uma das bobinas induz uma tensão sobre a outra. Dispositivos que se baseiam nesse princípio são denominados transformadores.



P = enrolamento do primário
S = enrolamento do secundário

Neste caso, o enrolamento do primário é o indutor e o enrolamento do secundário é o induzido, pois é o secundário do transformador que está submetido à variação do campo magnético que é produzido no primário pela variação da corrente.

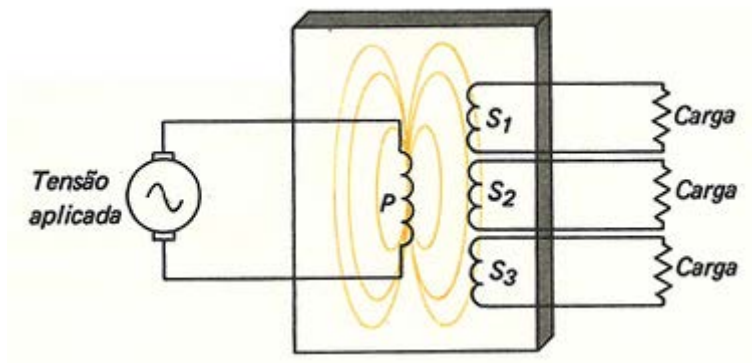
Isto significa que somente ocorre a indução quando o campo magnético for variável, daí então, os transformadores não funcionam em DC (corrente contínua).

A potência gerada no primário, resultante de uma tensão e de uma corrente é transferida para o secundário na forma de uma potência equivalente, mas não necessariamente com o mesmo valor de tensão e corrente. Devido a esse fato os transformadores podem ser classificados em:

1. Elevadores de tensão
2. Abaixadores de tensão
3. Transformadores de isolação

Qualquer transformador é constituído por um enrolamento primário que recebe energia elétrica de uma fonte de tensão, podendo ter um ou mais secundários.

A figura a seguir mostra um transformador com três secundários.



A potência desenvolvida no secundário (distribuída pelos três enrolamentos) é igual a potência gerada no primário.

TRANSFORMADOR COM SECUNDÁRIO ABERTO

Quando existe uma indução mútua entre duas bobinas, além da corrente do primário induzir uma tensão sobre o secundário, a corrente resultante do secundário também induz uma tensão sobre o primário.

Quando o transformador não tem carga no secundário, deduz-se que não havendo corrente no secundário, não haverá indução de tensão no primário.

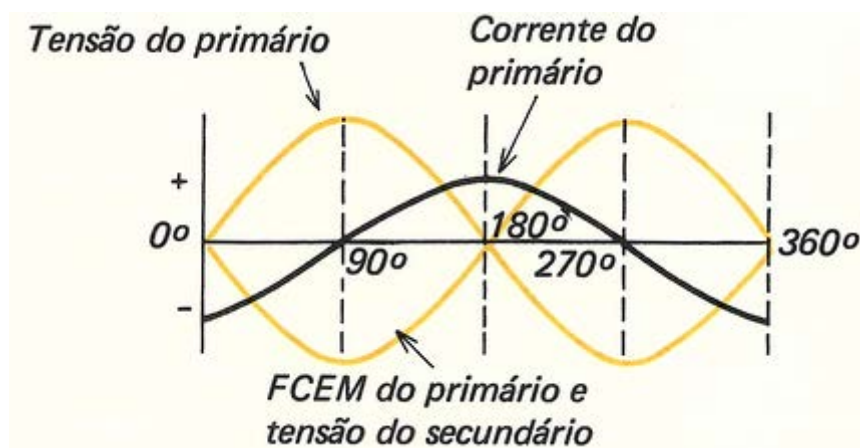
Quando o secundário está aberto existe uma relação de fase entre a FEM, FCEM e as correntes e tensões entre primário e secundário.

Mas o que é FCEM? (força contraeletromotriz)

Todo o indutor percorrido por corrente elétrica gera um campo elétrico proporcional a essa corrente, seja ele contínua ou alternada.

Todo o indutor sob a influência de um campo magnético variável gera uma corrente elétrica proporcional a esse campo. Quando a corrente variável é submetida a um indutor, gera um campo magnético variável e este gera de volta uma corrente no próprio indutor.

Então, como o próprio nome sugere, a força contraeletromotriz é uma energia que age contra.



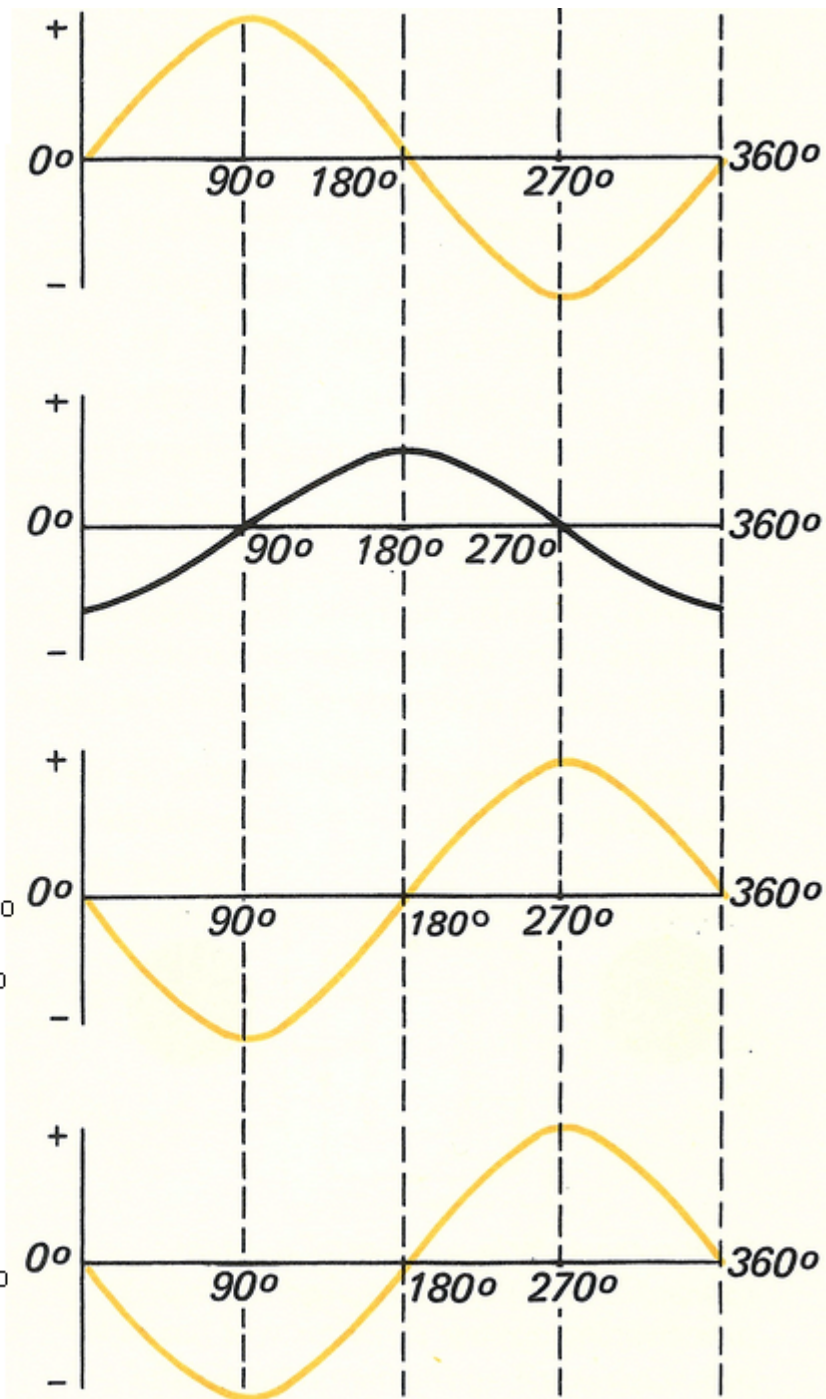
A figura a seguir mostra a relação de fase em um transformador com o secundário aberto.

- Tensão aplicada ao primário.**
- Está adiantada 90° em relação a corrente do primário.
 - Está defasada 180° da tensão do secundário.

- Corrente do primário.**
- Está atrasada 90° em relação a tensão aplicada.

- FCEM induzida no primário.**
- Está atrasada 90° em relação a corrente do primário.
 - Está defasada 180° em relação a tensão aplicada.
 - Está em fase com a tensão do secundário.

- Tensão no secundário.**
- Está atrasada 90° em relação a corrente do primário.
 - Está defasada 180° em relação a tensão aplicada.
 - Está em fase com a FCEM.



Ao analisarmos o gráfico acima, observamos que existe uma defasagem de 180° (inversão) entre a tensão aplicada no primário e a tensão no secundário.

Toda bobina ou indutor trabalha com o princípio da ação e reação, ou seja, quando é submetida a uma corrente, gera um campo magnético. Esse campo gera de volta na mesma bobina ou indutor uma corrente induzida de polaridade oposta que tende a ser subtraída da corrente original que criou esse campo.

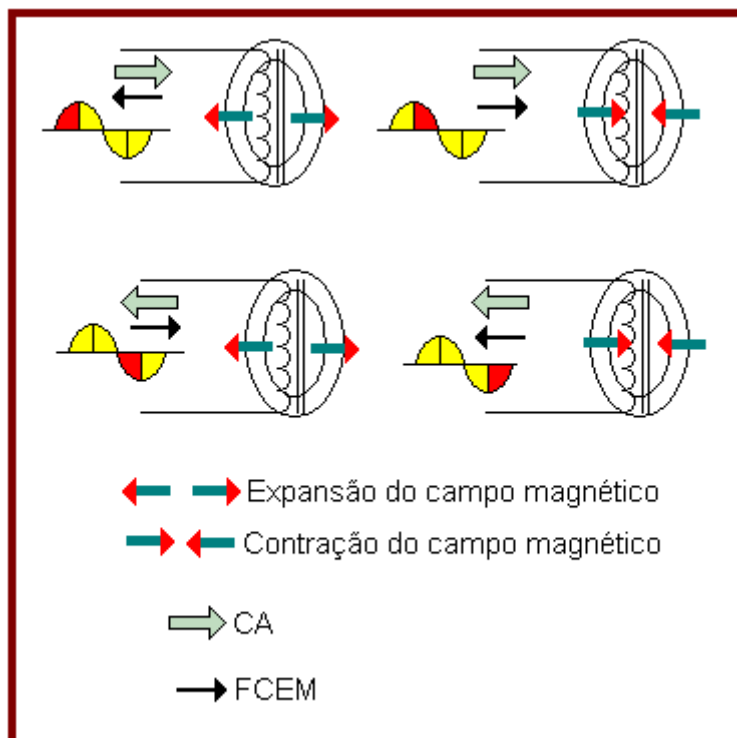
Daí levará certo tempo para a corrente atingir o seu valor máximo, até que haja a estabilização do campo magnético.

Se o campo magnético deixar de variar não haverá força contraeletromotriz.

A figura abaixo ilustra como se comporta o campo magnético em um indutor (no caso o primário do transformador) na aplicação de uma tensão alternada.

Observe o efeito da FCEM na expansão e contração do campo.

- 0 – 90° - expansão no semiciclo positivo
- 90 – 180° - contração no semiciclo positivo
- 180 – 270° - expansão no semiciclo negativo
- 270 – 360° - contração no semiciclo negativo



Somente ocorrerá indução quando variar o campo magnético, ou seja, na expansão e na contração.

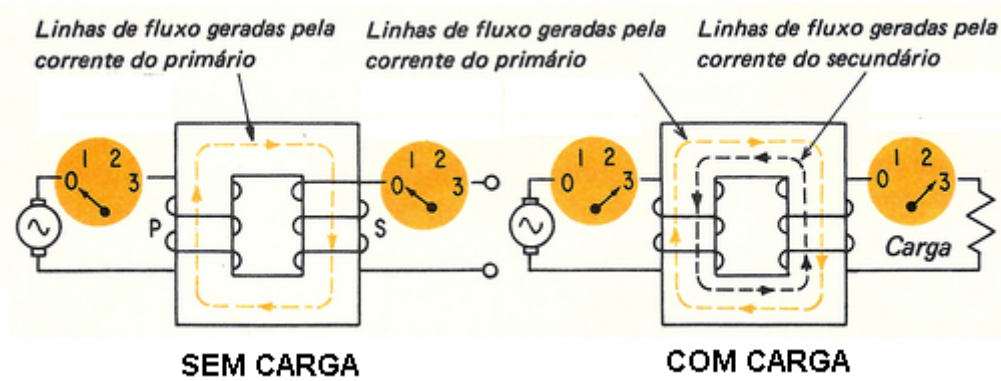
TRANSFORMADOR COM CARGA NO SECUNDÁRIO

Quando uma carga é ligada ao secundário de um transformador, haverá uma corrente no secundário que será refletida no primário de acordo com a relação de espiras entre primário e secundário.

Como ocorre em qualquer indutância, a corrente e tensão no secundário estão defasadas 90° (corrente atrasada em relação a tensão).

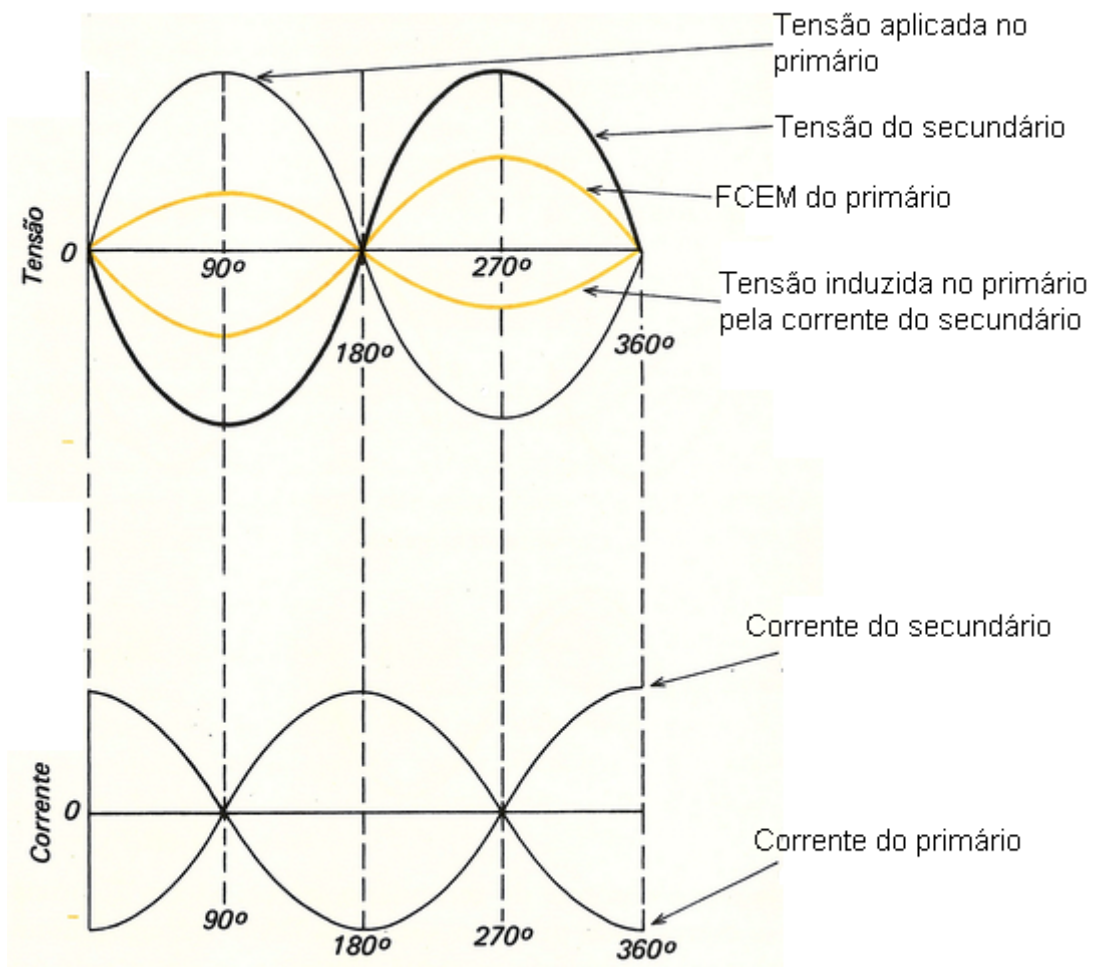
Como a corrente do secundário varia (AC), esta produz o seu próprio campo magnético e as linhas de fluxo (expansão e contração do campo magnético) se opõem ao campo gerado no primário. Isto tende a reduzir a intensidade do campo magnético do primário, provocando também a diminuição da FCEM do primário.

A figura abaixo ilustra as duas condições: secundário sem carga e com carga.



Observe que quando uma carga é ligada o medidor de corrente acusa corrente no primário e secundário. A corrente no secundário é refletida no primário gerando linhas de fluxo magnético opostas.

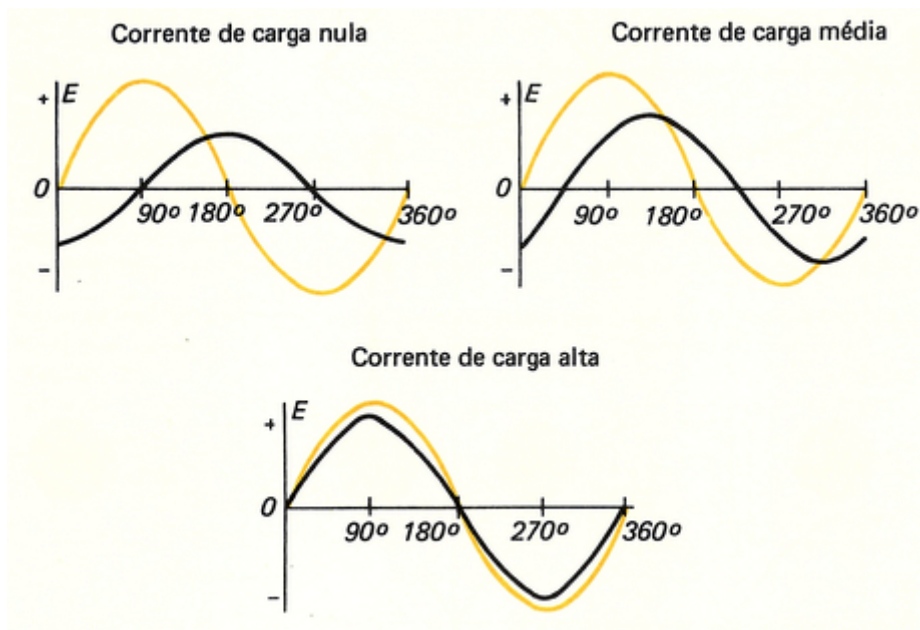
A figura abaixo mostra as relações de fase, quando uma carga é ligada ao secundário.



EFEITO DA CARGA NA RELAÇÃO DE FASE PRIMÁRIO-SECUNDÁRIO

A diferença de fase de 90° entre a tensão e corrente, tanto do primário como do secundário, é válida para cargas muito pequenas ou praticamente nulas.

Diminuindo a resistência de carga (o que significa aumento de carga) a corrente do secundário aumenta e o circuito tende a ficar resistivo, diminuindo assim a diferença de fase entre tensão e corrente.



→ Quando a corrente no secundário de um transformador ligado a uma carga resistiva for muito pequena, a corrente e a tensão tanto no primário como no secundário estão defasadas 90° . Quando a corrente na carga cresce (pela diminuição da resistência) a tendência do ângulo de fase entre corrente e tensão tanto no primário como no secundário tende a 0° .

TIPOS DE TRANSFORMADORES

Atualmente os transformadores são projetados para aplicações específicas, onde alguns parâmetros devem ser considerados:

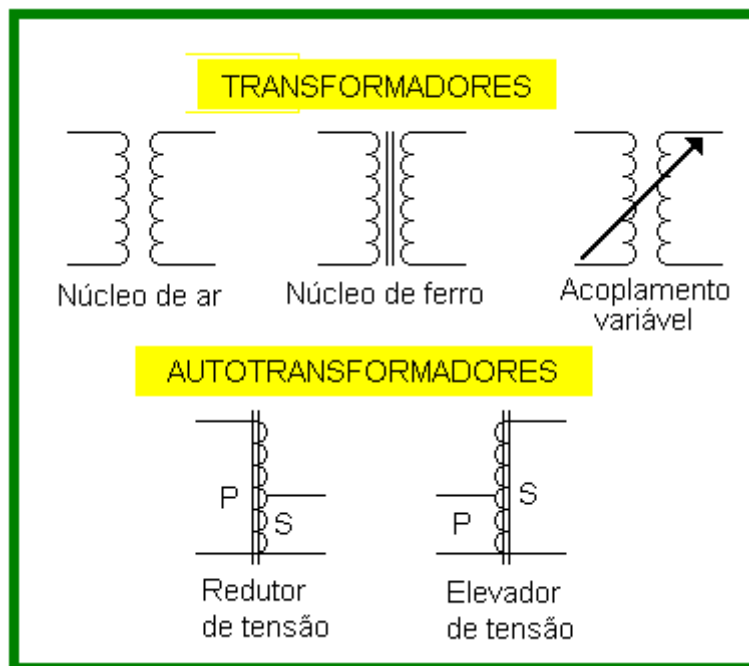
- 1 – tamanho e tipo de construção
- 2 – formato
- 3 – constituição do núcleo
- 4 – relação de espiras
- 5 – autotransformadores

Os autotransformadores são transformadores especiais com núcleo de ferro que possuem um único enrolamento.

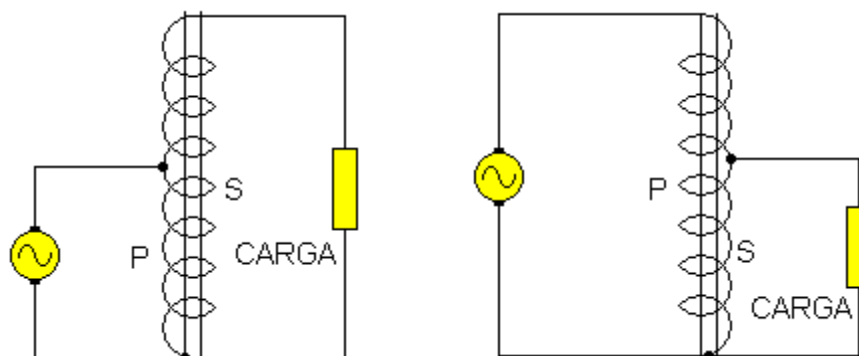
Esse enrolamento pode funcionar como primário ou secundário, podendo elevar ou reduzir uma tensão.

Seu funcionamento é basicamente o mesmo de um transformador de dois enrolamentos, porém tem a desvantagem de não isolar eletricamente o circuito do primário e do secundário.

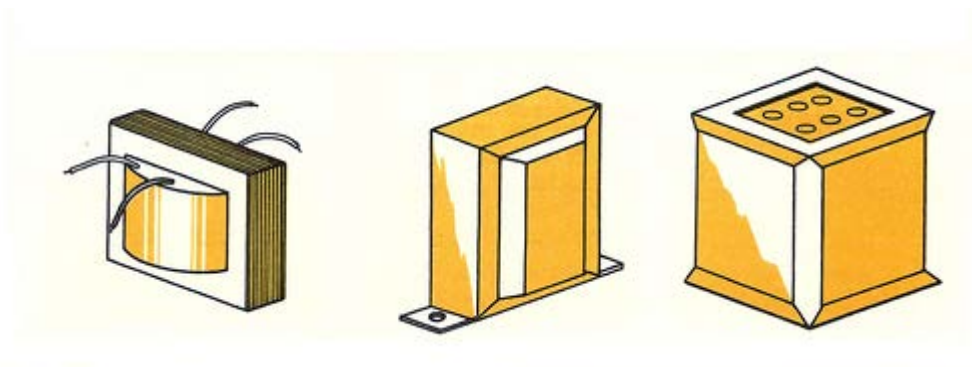
Simbologia adotada:



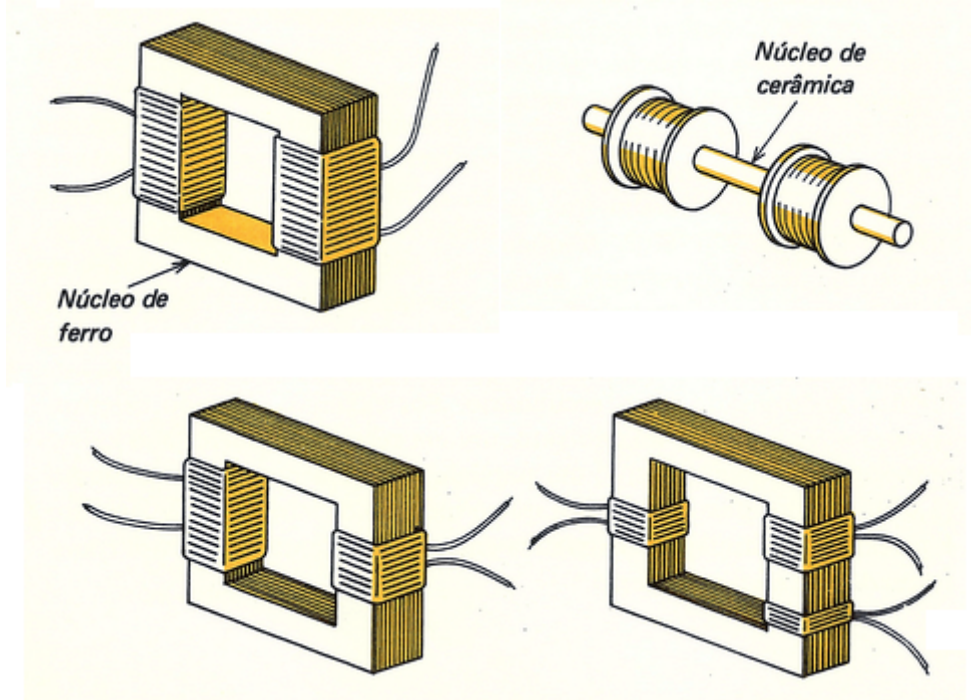
A figura a seguir ilustra uma forma típica de ligação de autotransformador para elevar e reduzir tensão, respectivamente.



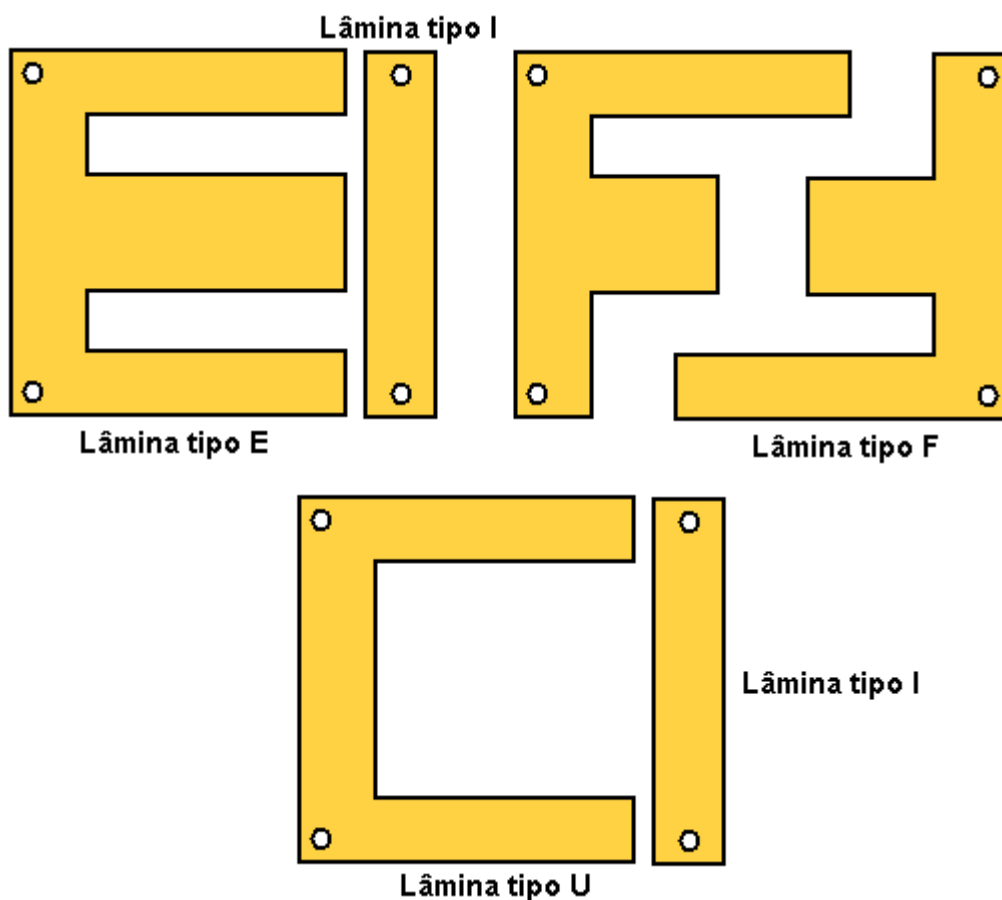
As figuras a seguir mostram alguns tipos de transformadores mais comumente usados:



Os formatos e tamanhos variam de acordo com as necessidades. Os transformadores com núcleo de ferro são os mais usados devido a sua melhor eficiência.



Os núcleos de ferro dos transformadores em sua maioria são confeccionados de lâminas de ferro delgadas de 0,01 a 0,03" (geralmente do tipo grão orientado ou ferro doce) que são empilhadas em direções opostas, formando o núcleo, com a finalidade de diminuir as correntes parasitas e aumentar a eficiência de acoplamento entre o primário e o secundário.



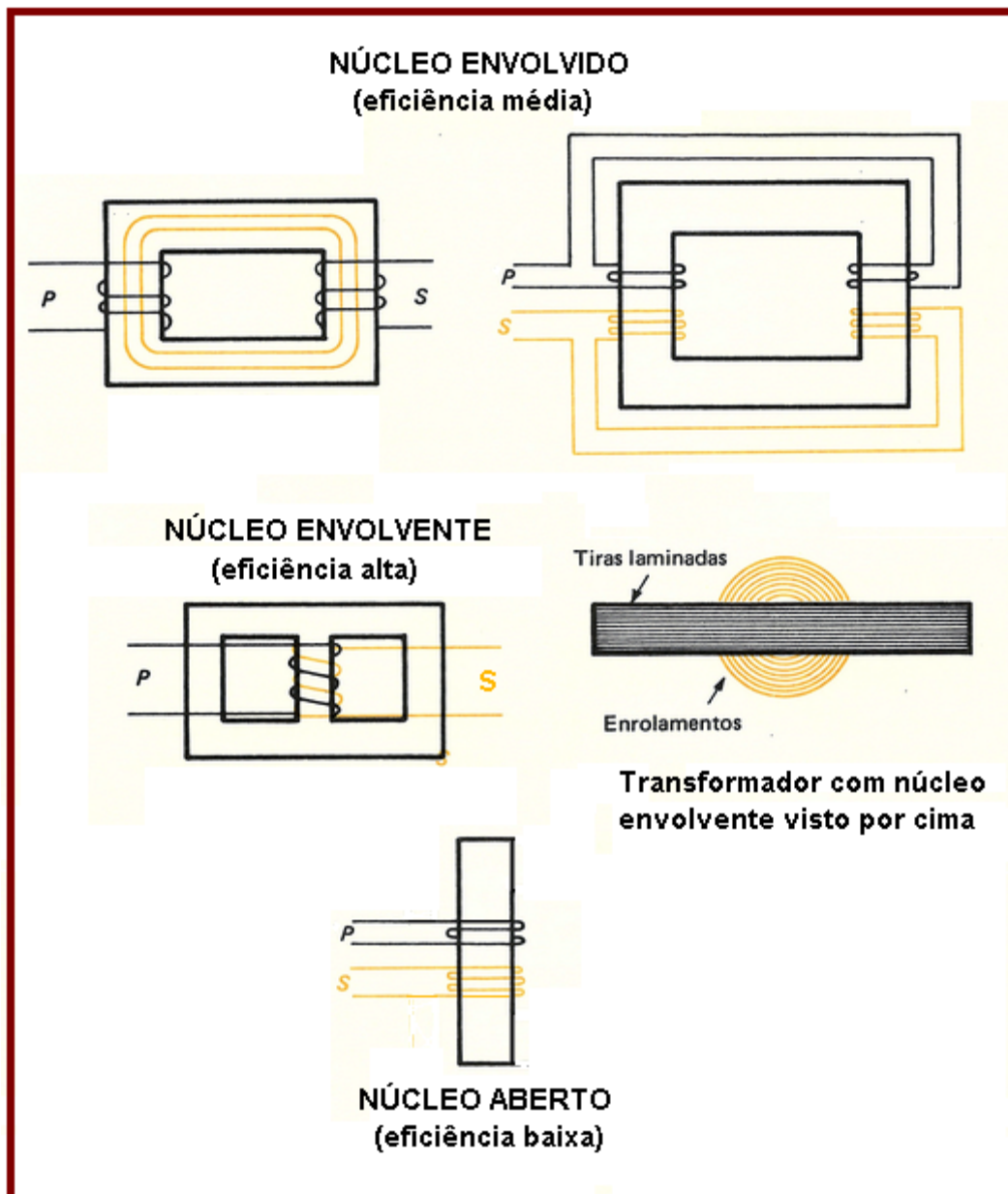
Os núcleos sólidos são formados por ferrite ou cerâmica porém, as perdas são maiores.

Esses núcleos são utilizados em aplicações especiais, principalmente quando envolvem frequências muito elevadas.

Construção dos núcleos:

Como vimos anteriormente a construção do núcleo com lâminas de ferro minimiza as correntes parasitas e aumenta a eficiência de acoplamento entre o primário e o secundário.

A figura abaixo mostra alguns núcleos comumente usados.



O transformador que usa o núcleo do tipo envolvente é o mais eficaz, visto que os enrolamentos são montados sobre a perna central minimizando as perdas.

PERDAS NOS TRANSFORMADORES

O desempenho em um transformador é dado pela eficiência, ou seja, é a relação entre a potência de saída e a potência de entrada.

Em um transformador ideal essa eficiência é 100%, onde as perdas são desconsideradas.

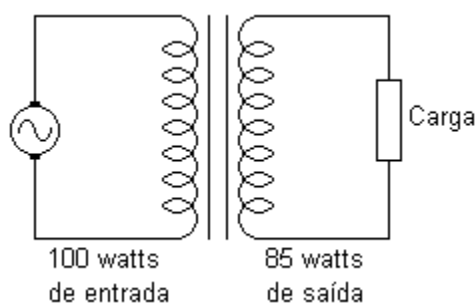
$$\text{Eficiência (\%)} = (\text{potência de saída} / \text{potência de entrada}) \times 100$$

A eficiência também pode ser dita como rendimento, representado por " η ".

Os cálculos que envolvem transformadores ideais e transformadores reais serão vistos mais adiante no capítulo *CÁLCULOS NOS TRANSFORMADORES*.

As perdas nos transformadores reduzem sua eficiência, principalmente quando são envolvidas potências elevadas. Isso faz com que a potência na saída seja menor do que a potência desenvolvida na entrada.

Tomemos como exemplo o circuito abaixo:



A eficiência desse transformador é:

$$\text{Eficiência} = 85\text{W} / 100\text{W} \cdot 100\% = 85\%$$

ou

$$\eta (\text{rendimento}) = 85 / 100 = 0,85$$

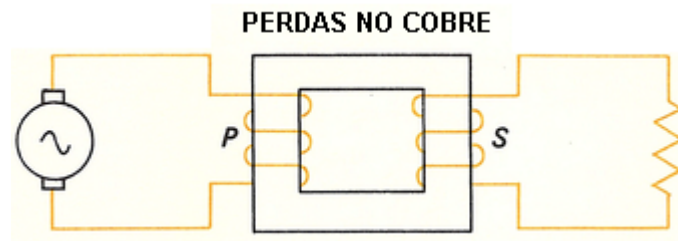
Conclui-se que 15% da energia do primário é perdida, não chegando ao secundário. Geralmente essa energia desperdiçada é dissipada em forma de calor.

Quanto menor for a eficiência, mais calor será dissipado pelo transformador.

As perdas mais comuns nos transformadores são:

1. Perdas no cobre e dispersão
2. Perdas por histerese
3. Perdas por correntes parasitas
4. Perda por saturação

Perdas no cobre:

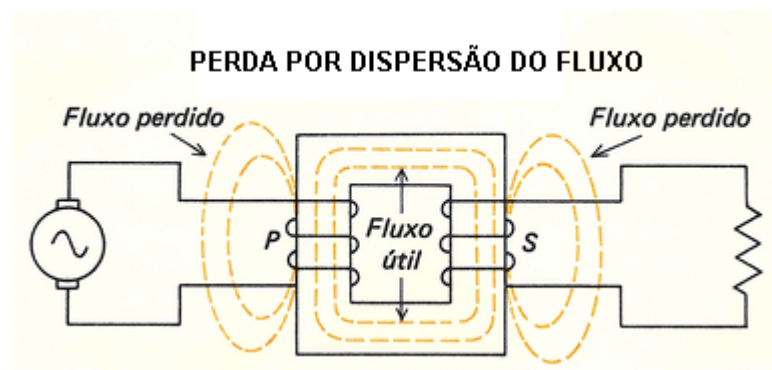


As perdas no cobre ocorrem devido a resistência ôhmica do fio usado nos enrolamentos. É dissipada em forma de calor e pode ser calculada pela fórmula:

$$P = R.I^2$$

Perdas por dispersão no fluxo:

São as linhas de fluxo que se dispersam no espaço, não participando efetivamente do acoplamento entre primário e secundário.



Perda por histerese:

Quando o núcleo é magnetizado pela ação da energia aplicada, a polaridade das moléculas do núcleo de ferro obedecem ao sentido da magnetização.

Assim, toda vez que o campo magnético variar as moléculas do núcleo de ferro devem obedecer a essa variação. Assim que o campo magnético mudar de sentido (lembre-se que estamos falando de AC) as moléculas do núcleo de ferro devem mudar sua polaridade na mesma velocidade.

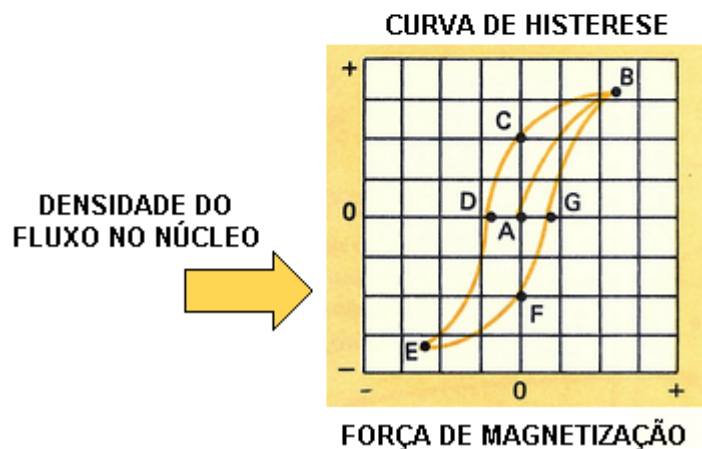
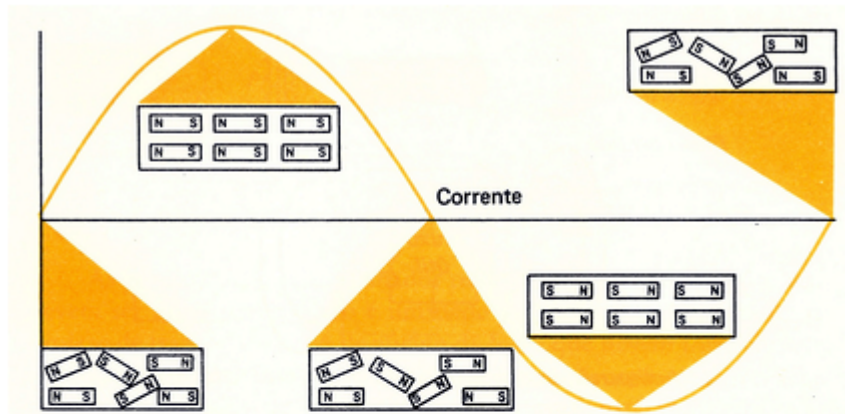
O atraso na inversão da polaridade ou orientação das moléculas em relação a força de magnetização constitui o que chamamos de *histerese*.

Quando as moléculas do núcleo não conseguem acompanhar a velocidade do campo magnético fornecido, isto se chama perda por histerese, uma vez que uma energia maior deverá ser aplicada a essas moléculas para que as mesmas acompanhem a velocidade de variação do campo magnético aplicado.

Lembrar ainda que as moléculas comportam-se como minúsculos ímãs, com propriedades próprias e polaridades N e S.

Veja a ilustração na figura a seguir.

ORIENTAÇÃO DAS MOLÉCULAS DO NÚCLEO DEVIDO AO CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO PELA TENSÃO APLICADA.



A perda por histerese depende muito do tipo de material usado no núcleo. Ferro de má qualidade retém grande parte da magnetização após a remoção da força de magnetização.

Observando a figura acima, a força de magnetização é removida em 0° , 180° e 360° .

A curva de histerese acima mostra como a magnetização do material (no caso a orientação das moléculas) atrasa em relação à força de magnetização aplicada.

Resumidamente:

- O ponto A corresponde a inexistência de magnetização;
- Quando a força de magnetização é aplicada a curva sobe até o ponto B (sentido do fluxo no sentido positivo);
- O ponto C corresponde a força de magnetização igual a zero onde se observa que ainda existe fluxo no núcleo no sentido positivo;
- A força de magnetização deve inverter o seu sentido e atingir o ponto D antes que o material seja desmagnetizado devido a densidade do fluxo nula;
- Do ponto D ao ponto E é completado o primeiro ciclo da força de magnetização;
- O segundo ciclo completo ocorre entre E-F-G-B-C-D-E, que ilustra o atraso da magnetização do núcleo em relação a força de magnetização.

A perda por histerese está diretamente relacionada à frequência da corrente do transformador, ou seja, é diretamente proporcional à frequência.

Devido a isso, para frequências elevadas deve-se utilizar núcleo feito de material especial como por exemplo ferro doce (grão orientado).

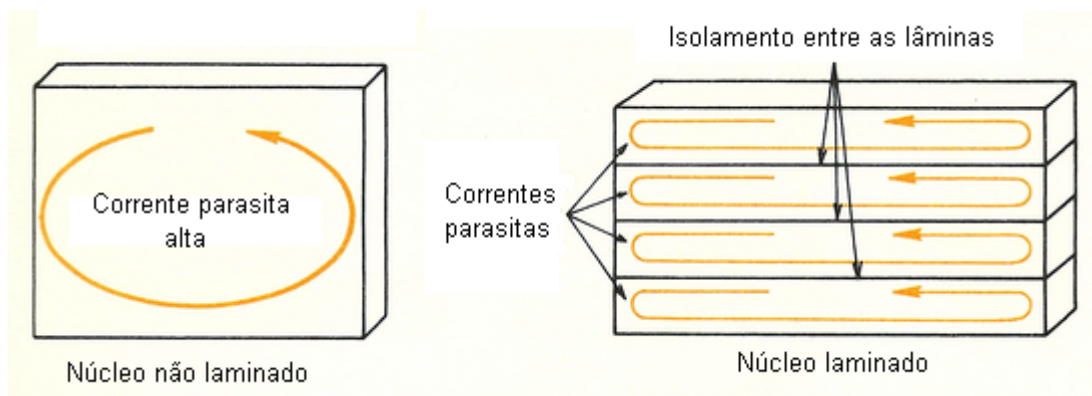
Perda por correntes parasitas:

Correntes de Foucault: Quando são utilizados núcleos de ferro nos transformadores, o campo magnético produzido pelo primário, induz corrente no núcleo de ferro, pois o núcleo atua como uma única espira.

Isto ocasiona perda de parte de energia produzida pelo primário, pois são formados campos magnéticos opostos ao principal. As correntes que circulam pelo núcleo são denominadas "Correntes de Foucault" (Eddy Current).

Uma das formas de atenuar esse efeito é a utilização de núcleo com ferro laminado (entre 0,01" a 0,03"). Na maioria das vezes essas lâminas são agrupadas em sentidos opostos.

Como as correntes parasitas circularão em cada uma das lâminas, elas serão bem menores e no caso das lâminas estarem agrupadas em sentidos opostos essas correntes tendem a se anular.



Perda por saturação do núcleo:

As linhas de fluxo geradas no primário são transferidas para o secundário do transformador através do núcleo de ferro.

Quando a corrente do primário aumenta as linhas de fluxo geradas que vão para o secundário, retornam através do núcleo para o enrolamento primário.

Quanto maior a corrente maior linhas de fluxo passarão pelo núcleo e para isso o núcleo deverá estar apto a fornecer essas linhas de fluxo.

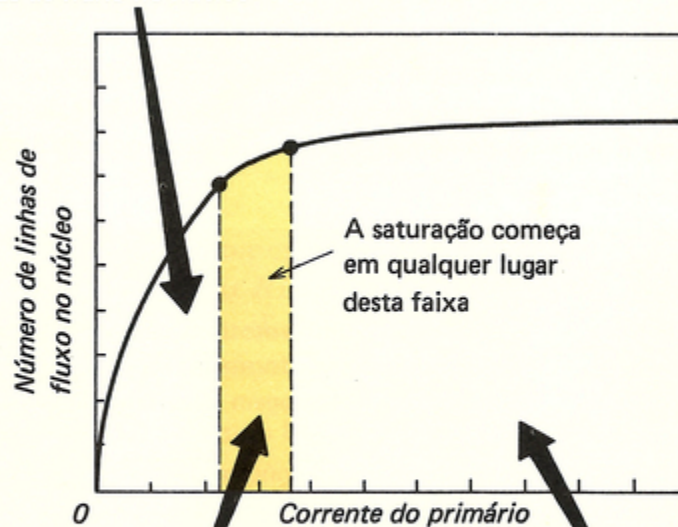
No entanto, pode ocorrer que o núcleo não consegue mais aumentar as linhas de fluxo em resposta a um aumento adicional da corrente.

Isto significa que um aumento adicional da corrente produz apenas um discreto aumento de linhas de fluxo.

Quando atinge essa situação, dizemos que o núcleo está saturado.

Depois de atingida a saturação, qualquer aumento da corrente do primário não será transferida para o secundário implicando assim em perda de potência.

Antes de se atingir a saturação, pequenas variações na corrente resultam em um aumento relativamente grande do número de linhas de fluxo no núcleo



Quando se atinge a saturação um aumento adicional na corrente possui pouco efeito sobre o número de linhas de fluxo no núcleo

Qualquer corrente no primário do transformador acima e abaixo daquela exigida para produzir a saturação resulta em potência perdida

CÁLCULOS NOS TRANSFORMADORES

A aplicação mais importante dos transformadores é converter uma potência dada por uma tensão e uma corrente, na mesma potência, porém com outros valores de tensão e corrente.

Quando os valores convertidos (tensão e potência) são outros em relação ao valor original dizemos tratar-se de um transformador abaixador ou elevador de tensão.

Quando esses valores são iguais, simplesmente o transformador está agindo como um isolador de circuitos.

Vamos abordar duas formas de cálculo:

- 1. Transformador ideal**
- 2. Transformador real**

1. TRANSFORMADOR IDEAL

No transformador ideal as perdas são desprezadas e desta forma temos:

$$P_p = P_s$$

A potência desenvolvida no primário é igual a potência do secundário.

Portanto:

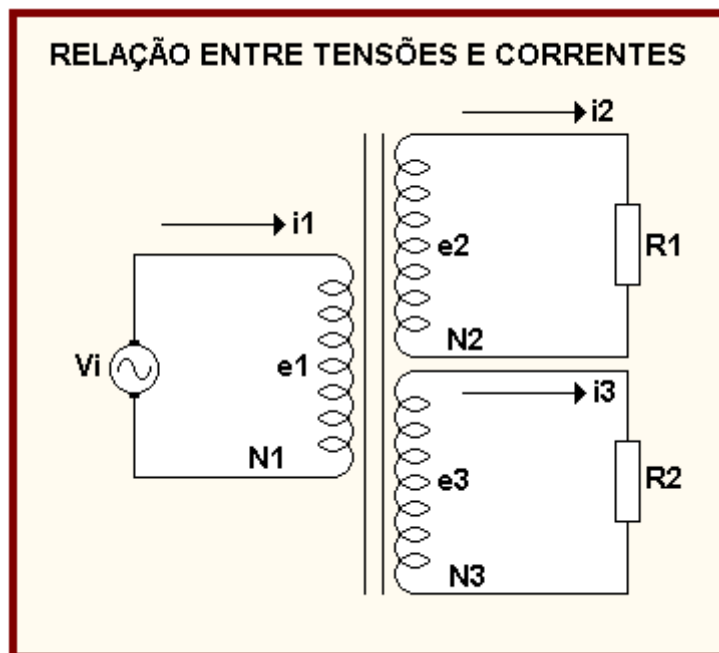
$R_i = 0$ (resistência ôhmica dos enrolamentos, também denominada R_p)

Para transformador com mais de um secundário: $P_p = \Sigma P_s$

Em um transformador ideal não há perdas no núcleo.

Nos transformadores as potências desenvolvidas no primário e secundário são calculadas através da *relação de espiras*, pois os enrolamentos são constituídos de espiras, sejam eles ideais ou reais.

Tomemos como exemplo a figura abaixo:



N_1 = número de espiras do primário

N_2 = número de espiras do secundário 1

N_3 = número de espiras do secundário 2

e_1 = tensão no enrolamento primário

e_2 = tensão no enrolamento secundário 1

e_3 = tensão no enrolamento do secundário 2

V_i = tensão aplicada na entrada

i_1 = corrente no primário

i_2 = corrente no secundário 1

i_3 = corrente no secundário 2

$$E = V_i \therefore e_1 = E_{\max} \sin \omega t \rightarrow E_1 = E_{\text{ef}}$$

$$e_1 = N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \rightarrow e_2 = N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \rightarrow e_3 = N_3 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{e_1}{N_1} \rightarrow \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{e_2}{N_2} \rightarrow \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{e_3}{N_3}$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \rightarrow \frac{e_1}{e_3} = \frac{N_1}{N_3} \rightarrow \frac{e_2}{e_3} = \frac{N_2}{N_3}$$

$$\frac{e_1}{N_1} = \frac{e_2}{N_2} \rightarrow \frac{e_2}{N_2} = \frac{e_3}{N_3} \rightarrow \frac{e_1}{N_1} = \frac{e_3}{N_3}$$

Pp = ΣPs: Podemos então relacionar as potências, tensões e correntes.

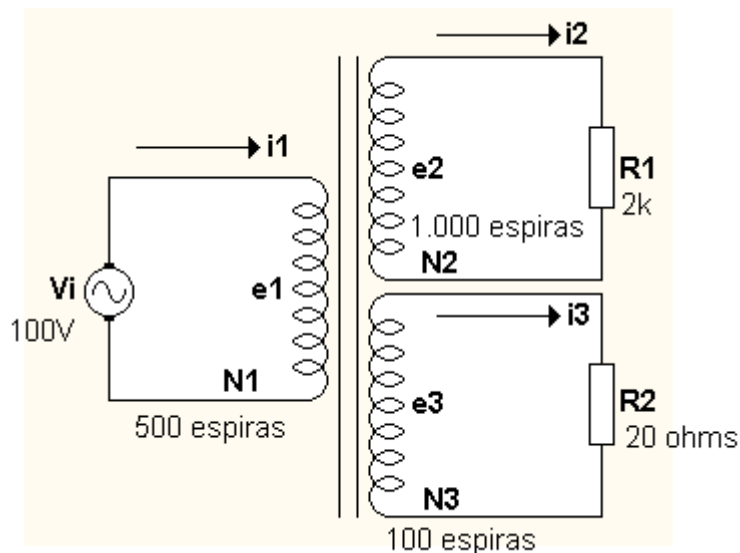
$$I_1 = \frac{E_2}{E_1} \cdot I_2 + \frac{E_3}{E_1} \cdot I_3$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 + \frac{N_3}{N_1} \cdot I_3$$

$$\text{Daí: } N_1 I_1 = N_2 I_2 + N_3 I_3 \rightarrow E_1 I_1 = E_2 I_2 + E_3 I_3$$

$E_1 I_1$ = potência no primário
 $E_2 I_2$ = potência no secundário 1
 $E_3 I_3$ = potência no secundário 2

→ Exemplo de cálculo de um transformador ideal com 2 enrolamentos no secundário.



espiras no primário = 500
 espiras no secundário 1 = 1.000
 espiras no secundário 2 = 100

Calcular as tensões, correntes e potências.

$$\frac{e_1}{N_1} = \frac{e_2}{N_2} \rightarrow \frac{100}{500} = \frac{e_2}{1.000} \rightarrow (1.000)(100) = 500e_2$$

$$e_2 = \frac{100000}{500} \rightarrow e_2 = 200V$$

$$\frac{e_1}{N_1} = \frac{e_3}{N_3} \rightarrow \frac{100}{500} = \frac{e_3}{100} \rightarrow (100)(100) = 500e_3$$

$$e_3 = \frac{10000}{500} \rightarrow e_3 = 20V$$

$$i_2 = 200V/2k = 200/2.000 = 0,1A$$

$$i_3 = 20V/20R = 20/20 = 1A$$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 + N_3 I_3$$

$$500 I_1 = 1.000 \times 0,1 + 100 \times 1 \rightarrow 500 I_1 = 100 + 100$$

$$I_1 = 200/500 = 0,4A$$

Calculando as potências:

$$\text{Potência no primário: } e_1 \times I_1 = 100 \times 0,4 = 40W$$

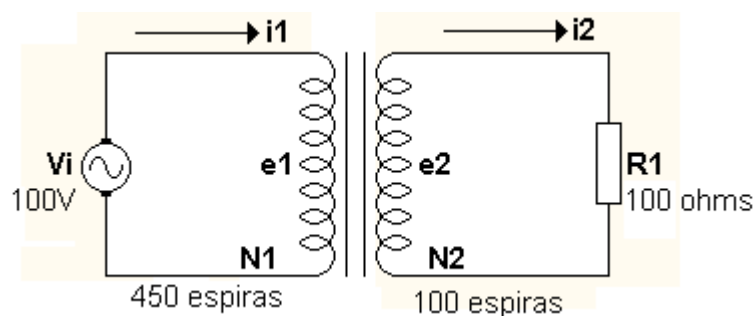
$$\text{Potência no secundário 1: } R I^2 = 2k \cdot 0,1^2 = 2.000 \times 0,01 = 20W$$

$$\text{Potência no secundário 2: } R I^2 = 20 \text{ ohms} \times 1^2 = 20 \times 1 = 20W$$

$$\text{Portanto: } P_p = P_{s1} + P_{s2}$$

$$40W = 20W + 20W$$

→ Exemplo de cálculo de um transformador ideal com 1 enrolamento no secundário.



Calcular as tensões, correntes e potências.

$$\frac{e_1}{N_1} = \frac{e_2}{N_2} \rightarrow \frac{100}{450} = \frac{e_2}{100} \rightarrow (100)(100) = 450e_2$$

$$e_2 = \frac{10000}{450} = 22,2V$$

$$i_2 = \frac{22,2V}{100 \text{ ohms}} = 222\text{mA} (0,222A)$$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \rightarrow 450 I_1 = 100 \times 0,222 \rightarrow I_1 = \frac{22,2}{450} = 49,33\text{mA}$$

$$P_p = V_i I_1 = 100 \times 49,33\text{mA} = 4,933\text{W}$$

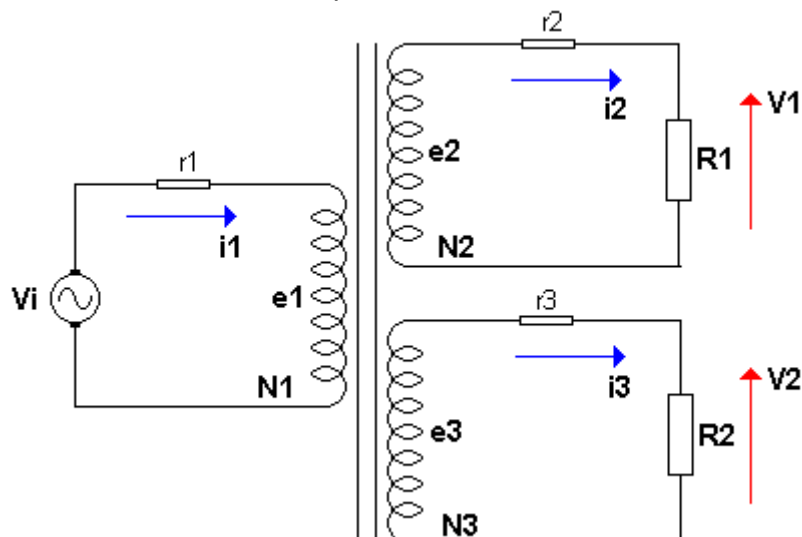
$$P_s = R I^2 = 100 \times 0,222^2 = 4,928\text{W}$$

2. TRANSFORMADOR REAL

→ CONSIDERANDO APENAS PERDA NO COBRE

Como vimos anteriormente a perda no cobre deve-se a resistência ôhmica das espiras.

Neste caso, desconsideram-se as perdas no núcleo, onde $\eta = 1$.



- N1 – número de espiras do primário
- N2 = número de espiras do secundário 1
- N3 – número de espiras do secundário 2
- e1 = tensão nos enrolamentos do primário
- e2 = tensão nos enrolamentos do secundário 1
- e3 = tensão nos enrolamentos do secundário 2
- i1 = corrente no primário
- i2 = corrente no secundário 1
- i3 = corrente no secundário 2
- Vi = tensão de entrada
- V1= tensão na saída (carga) do secundário 1
- V2= tensão na saída (carga) do secundário 2
- r1 = resistência do fio do enrolamento do primário
- r2 = resistência do fio do enrolamento do secundário 1
- r3 = resistência do fio do enrolamento do secundário 2

As relações são dadas a seguir:

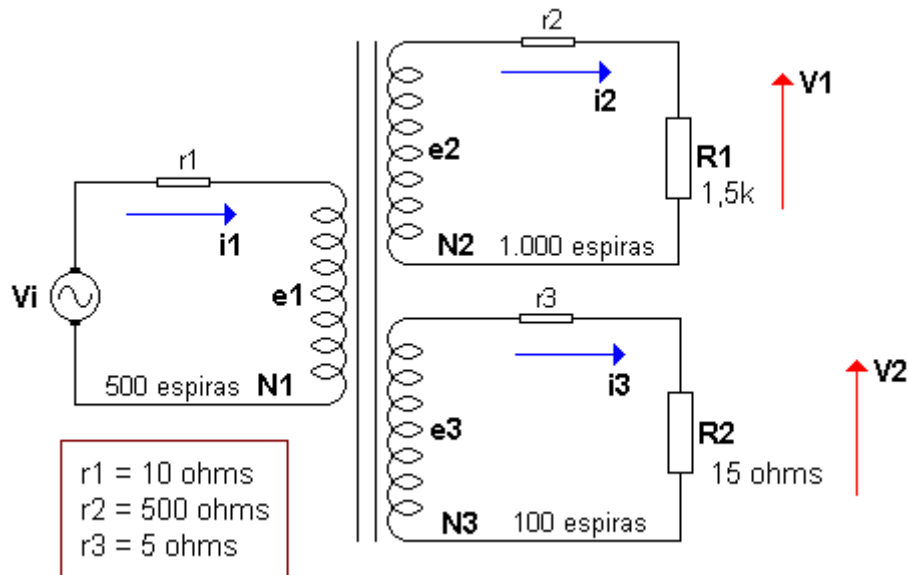
$$V_i = e_1 + r_1 \cdot i_1$$

$$e_2 = V_1 + r_2 \cdot i_2$$

$$e_3 = V_2 + r_3 \cdot i_3$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO:

No circuito abaixo, sabe-se que a potência desenvolvida na carga do secundário 2 é de 15W. Determine as tensões, correntes e potências.



1. Cálculo da corrente i_3 (secundário 2):

$$P = 15W \rightarrow 15W = R \cdot I^2 \rightarrow 15W$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \rightarrow \sqrt{\frac{15}{15}} \rightarrow 1A$$

2. Cálculo da tensão V_2 :

$$V_2 = R_2 \cdot I = 15 \cdot 1 = 15V$$

3. Cálculo da tensão e_3 :

$$e_3 = (r_3 + R_2) \cdot i_3 \rightarrow e_3 = (5 + 15) \cdot i_3$$

$$e_3 = 20 \cdot 1 = 20V$$

Portanto temos na carga uma tensão menor do que no enrolamento do secundário 2 devido a perda da resistência do fio de cobre.

$$e_3 = 20V \rightarrow V_2 = 15V$$

4. Cálculo da tensão e_1 :

$$\frac{e_1}{e_3} = \frac{N_1}{N_3} \rightarrow \frac{e_1}{20} = \frac{500}{100} \rightarrow e_1 = 20 \cdot \frac{500}{100} \rightarrow e_1 = 20 \cdot 5 = 100V$$

5. Cálculo da tensão e2:

$$\frac{e_2}{e_3} = \frac{N_2}{N_3} \rightarrow \frac{e_2}{20} = \frac{1.000}{100} \rightarrow e_2 = 20 \cdot \frac{1.000}{100} \rightarrow e_2 = 20 \cdot 10 = 200V$$

6. Cálculo da corrente i2:

$$e_2 = (r_2 + R_1) \cdot i_2 \rightarrow e_2 = (500 + 1.500) \cdot i_2$$

$$200 = 2.000i_2$$

$$i_2 = \frac{200}{2.000} = 0,1A$$

7. Cálculo da tensão V1:

$$V_1 = R_1 \cdot i_2 \rightarrow V_1 = 1.500 \cdot 0,1$$

$$V_1 = 150V$$

8. Cálculo da corrente i1:

$$N_1 \cdot i_1 = N_2 i_2 + N_3 i_3$$

$$500i_1 = (1.000 \cdot 0,1) + (100 \cdot 1)$$

$$500i_1 = 100 + 100$$

$$i_1 = \frac{200}{500} = 0,4A$$

9. Cálculo da tensão Vi:

$$V_i = e_1 + r_1 \cdot i_1$$

$$V_i = 100 + (10 \cdot 0,4) \rightarrow 100 + 4$$

$$V_i = 104V$$

10. Cálculo das potências:

Potência do primário: $P_p \rightarrow V_i \cdot i_1 = 104V \times 0,4A = 41,6W$

Potência no secundário 1 $\rightarrow P_{S1} = e_2 \cdot i_2 = 200V \times 0,1A = 20W$

Potência no secundário 2 $\rightarrow P_{S2} = e_3 \cdot i_3 = 20V \times 1A = 20W$

Em relação as potências nos secundários, observa-se que em virtude da perda no fio, as tensões nas cargas são menores.

Logo, as perdas no cobre são responsáveis também pelo aquecimento do transformador.

Veja na tabela abaixo o resultado dos cálculos desenvolvidos:

$e1 = 100V$	$V_i = 104V$	$i1 = 0,4A$	$P_p = 41,6W$	
$e2 = 200V$	$V1 = 150V$	$i2 = 0,1A$	$PS1 = 20W$	carga = 15W
$e3 = 20V$	$V2 = 15V$	$i3 = 1A$	$PS2 = 20W$	carga = 15W

Considerações:

Nos secundários (PS1 e PS2) houve uma perda de 5W em cada uma das cargas, devido a resistência ôhmica do fio.

A potência que a tensão de entrada V_i deve entregar é de 41,6W e são aproveitados 40W nos secundários.

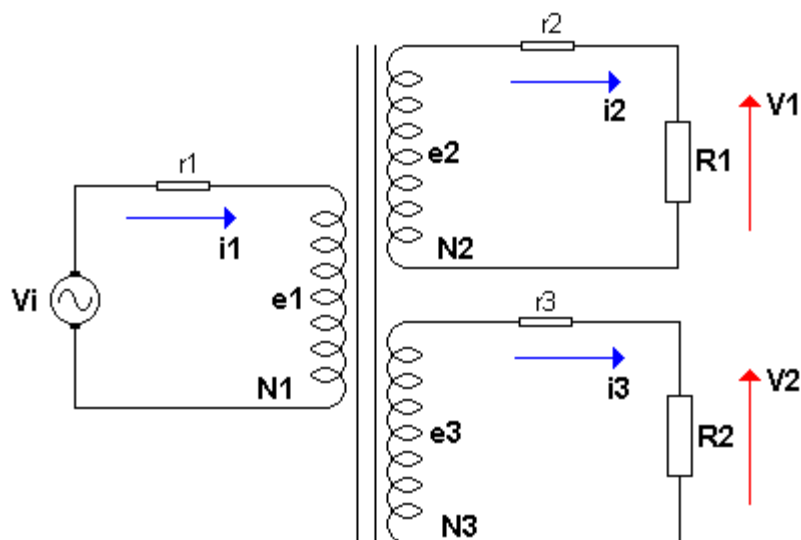
Daí, podemos calcular a eficiência:

$$\eta = \text{potência de saída/potência de entrada}$$

$$\eta = 40/41,6 = 0,962 \text{ (ou 96,2\%)}$$

→ CONSIDERANDO PERDA NO COBRE E NO NÚCLEO

Considerando o circuito abaixo, porém levando-se em conta a perda do cobre e a perda do núcleo.



$$\frac{e1}{e2} = \frac{N1}{N2} \rightarrow \frac{e1}{e3} = \frac{N1}{N3} \rightarrow \frac{e2}{e3} = \frac{N2}{N3}$$

$$e2 = V1 + r2 \cdot i2 \rightarrow e2 = (R1 + r2)i2$$

$$e3 = V2 + r3 \cdot i3 \rightarrow e3 = (R2 + r3)i3$$

$$\eta = \frac{\Sigma P_s}{P_p} \rightarrow (0 < \eta \leq 1)$$

No caso de dois secundários:

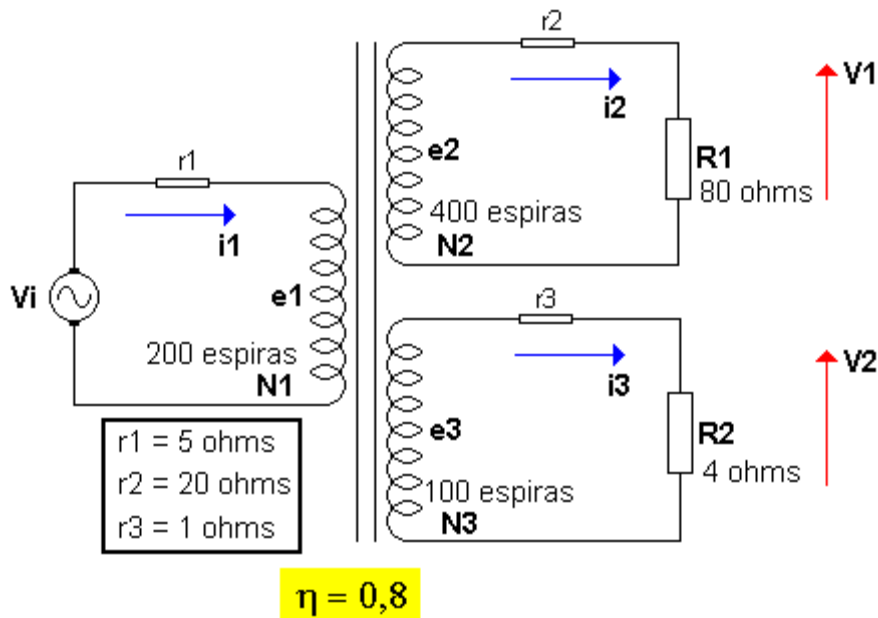
$$\eta P_p = \Sigma P_s \rightarrow \eta e1 \cdot i1 = e2 \cdot i2 + e3 \cdot i3$$

ou levando-se em conta a relação de espiras:

$$\eta N_1 \cdot i_1 = N_2 \cdot i_2 + N_3 \cdot i_3$$

→ Exemplo de cálculo levando-se em conta perdas no núcleo e cobre.

No circuito abaixo calcular as tensões, correntes e potências, sabendo-se que a corrente $i_2 = 2A$. A eficiência do transformador é de 80% ($\eta=0,8$).



$i_2 = 2A$ (valor dado)

1. Cálculo de V_1 :

$$V_1 = R_1 \cdot i_2 = 80 \cdot 2 = 160V$$

2. Cálculo de e_2 :

$$e_2 = (R_1 + r_2) i_2 \rightarrow e_2 = (80 + 20) \cdot 2 = 100 \cdot 2 = 200V$$

3. Cálculo de e_3 :

$$\frac{e_2}{e_3} = \frac{N_2}{N_3} \rightarrow \frac{200}{e_3} = \frac{400}{100} \rightarrow 400e_3 = 200 \cdot 100$$

$$e_3 = \frac{20000}{400} = 50V$$

4. Cálculo de V_2 :

$$V_2 = e_3 - r_3 \cdot i_3$$

$$V_2 = 50 - (1 \cdot 10) \rightarrow V_2 = 50 - 10 = 40V$$

5. Cálculo de e_1 :

$$\frac{e_1}{e_3} = \frac{N_1}{N_3} \rightarrow \frac{e_1}{50} = \frac{200}{100} \rightarrow 100e_1 = (200 \cdot 50)$$

$$e_1 = \frac{10000}{100} = 100V$$

6. Cálculo de i_3 :

$$e_3 = (R_2 + r_3) \cdot i_3$$

$$50 = (4 + 1) \cdot i_3$$

$$50 = 5i_3$$

$$i_3 = \frac{50}{5} = 10A$$

7. Cálculo de i_1 :

$$0,8N_1i_1 = N_2i_2 + N_3i_3$$

$$(0,8 \cdot 200)i_1 = 400 \cdot 2 + 100 \cdot 10$$

$$160i_1 = 800 + 1.000$$

$$i_1 = \frac{1.800}{160} = 11,25A$$

8. Cálculo de V_i (tensão de entrada do transformador):

$$V_i = e_1 + r_1 \cdot i_1$$

$$V_i = 100 + 5 \cdot 11,25$$

$$V_i = 100 + 56,25$$

$$V_i = 156,25V$$

9. Cálculo das potências:

Potência do primário: $P_p \rightarrow V_i \cdot i_1 = 156,25V \times 11,25A = 1,76kW$

Potência no secundário 1 $\rightarrow PS_1 = e_2 \cdot i_2 = 200V \times 2A = 400W$

Potência no secundário 2 $\rightarrow PS_2 = e_3 \cdot i_3 = 50V \times 10A = 500W$

Potência na carga R1 $\rightarrow P = R_1 \cdot i_2^2 = 80 \cdot 4 = 320W$

Potência na carga R2 $\rightarrow P = R_2 \cdot i_3^2 = 4 \cdot 100 = 400W$

Veja na tabela abaixo o resultado dos cálculos desenvolvidos:

$e_1 = 100V$	$V_i = 156,25V$	$i_1 = 11,25A$	$P_p = 1,76kW$	
$e_2 = 200V$	$V_1 = 160V$	$i_2 = 2A$	$PS_1 = 400W$	carga = 320W
$e_3 = 50V$	$V_2 = 40V$	$i_3 = 10A$	$PS_2 = 500W$	carga = 400W

Levando-se em consideração além da eficiência ou rendimento do núcleo (80%), a perda no fio do cobre, teremos ainda um rendimento final ainda mais baixo.

Potência desenvolvida no primário = 1,76kW

Potência aproveitada no secundário = 900W (0,9kW)

Teremos:

$$\text{eficiência} = P_s/P_p$$

$$\text{eficiência} = 0,9 / 1,76 \times 100 = 51,1\%$$

EXERCÍCIOS

1. Quantas espiras deve possuir o secundário de um transformador ideal para se obter 10V, sendo que o primário possui 450 espiras ligadas a uma tensão de 220V?
2. Qual é a tensão induzida no secundário de um transformador ideal, possuindo o primário 1.000 espiras e ligado a uma tensão de 110V e o secundário possui 500 espiras?
3. Qual é o número de espiras no primário de um transformador ideal, ligado em 220V, tendo o secundário 40 espiras e uma tensão de 440V?
4. Qual deve ser a tensão a ser aplicada no primário de um transformador ideal com 600 espiras, tendo o secundário 40V e 110 espiras?

Respostas:

1. 20,4 espiras
2. 55V
3. 20 espiras
4. 218,18V