

## **Auto - Transformador Monofásico**

### ***Transformação de Tensão***

Transformação de tensão para várias tensões de entrada:  $U_2, U_3, U_{23} = f(U_1)$

#### 1.1. - Generalidades

A função do transformador é transformar a tensão da rede eléctrica para uma mais baixa ou mais alta tensão.

A tensão da rede é aplicada como tensão de entrada no primário do transformador; A nova tensão criada é a tensão de saída disponível no enrolamento de secundário.

Toda a potência aparente que pode ser produzida é transportada desde o primário para o secundário via campo magnético. Estes transformadores também são chamados de transformadores multi-enrolamentos, porque os seus enrolamentos e o núcleo magnético devem ser projectados para a potência máxima a ser transportada.

Se se pretende uma tensão mais elevada na saída, pode-se então utilizar o princípio da ligação em série de fontes de tensão.

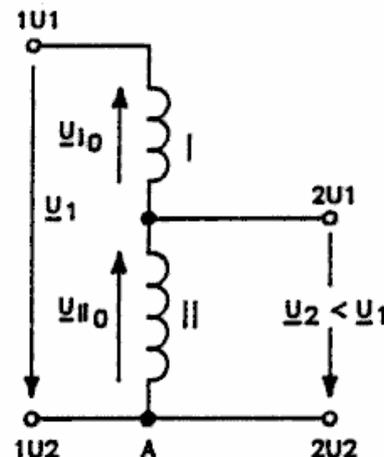
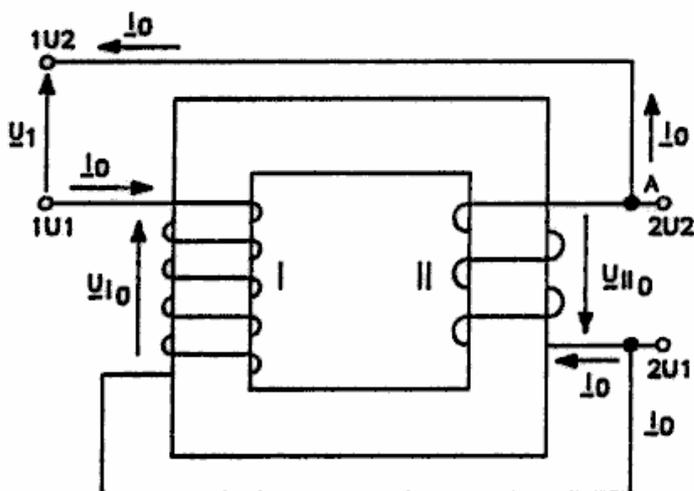
#### 1.2. - Esquema de Funcionamento

Se os enrolamentos de entrada e saída são considerados fontes de tensão, então a tensão de saída  $U_2$  é produzida quando os dois são ligados em série. A tensão de saída  $U_2$  torna-se superior devido à tensão de entrada  $U_1$  e à soma da tensão induzida do enrolamento de saída.

O transformador montado desta forma é chamado de auto-transformador. Esta designação é devida à semelhança com as bobinas de ignição do automóvel.

Aqui, não estamos a falar sobre um divisor de tensão indutivo, como nos pode parecer na fig. 1-a), porque  $U_2$  pode ser maior que  $U_1$ , o princípio de funcionamento do transformador também deve ser aplicado no auto-transformador.

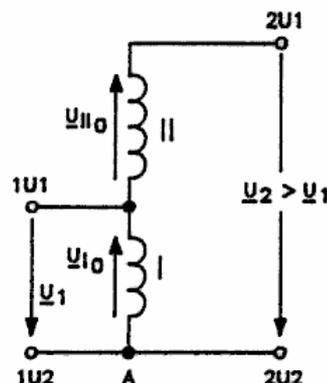
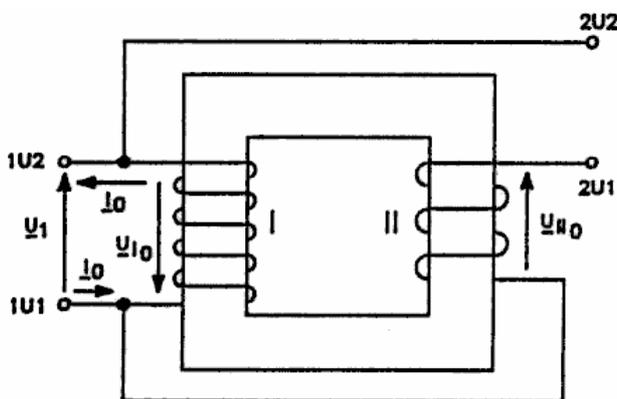
LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas



- |        |                               |    |                               |
|--------|-------------------------------|----|-------------------------------|
| I      | = enrolamento série           | II | = enrolamento paralelo        |
| I + II | = enrolamento de entrada      |    | = enrolamento de saída        |
|        | = enrolamento de tensão maior |    | = enrolamento de tensão menor |

$$I_0 = I_{10} = I_{110}$$

a) Transformação para tensão menor  $U_1 > U_2$



- |   |                               |        |                               |
|---|-------------------------------|--------|-------------------------------|
| I | = enrolamento paralelo        | II     | = enrolamento série           |
|   | = enrolamento de entrada      | I + II | = enrolamento de saída        |
|   | = enrolamento de tensão menor | I + II | = enrolamento de tensão maior |

$$I_0 = I_{10} ; \quad I_{110} = 0$$

b) Transformação para tensão maior  $U_2 > U_1$

Fig. 1 - Esquema de funcionamento do transformador

Por isso, os princípios de aplicação para o auto-transformador são idênticos aos do transformador multi-enrolamentos. Todavia, deve ser lembrado que um enrolamento está parcialmente contido no outro. Esta é outra razão porque se fala no auto-transformador

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

económico. A parte do enrolamento comum aos enrolamentos de entrada e saída torna possível poupar cobre.

1.3. - Designações dos terminais

Os terminais dos enrolamentos do auto-transformador são designados por um número ou por uma combinação de número-letra, exactamente como no transformador multi-enrolamentos

1.1	ou	1U1	→	Início do enrolamento de entrada
1.2	ou	1U2	→	Fim do enrolamento de entrada
2.1	ou	2U1	→	Início do enrolamento de saída
2.2	ou	2U2	→	Fim do enrolamento de saída

1.4. - Transformação de tensão em vazio

No caso dos dois enrolamentos do auto-transformador estarem ligados um depois do outro, eles são designados por enrolamento série e enrolamento paralelo. O enrolamento de tensão menor é o enrolamento paralelo, é localizado paralelamente à carga para reduzir a tensão, para aumentar a tensão é localizado em paralelo com a rede. O enrolamento de tensão mais elevada é a ligação série dos enrolamentos série e paralelo - ver fig. 1.

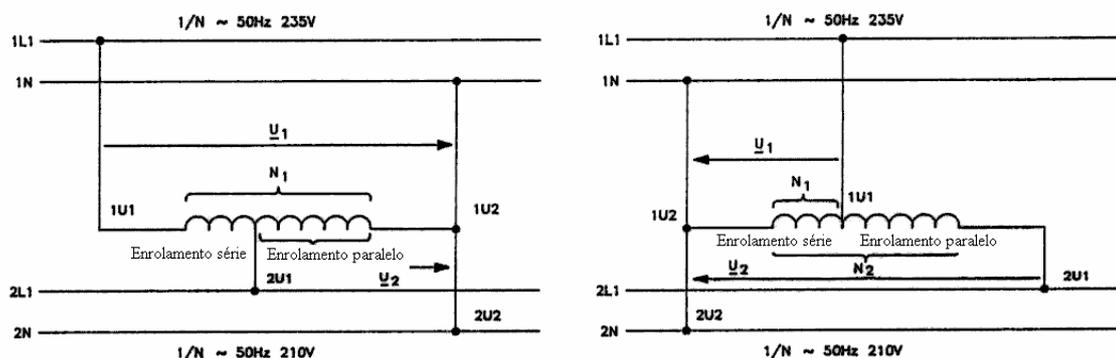
Devido ao facto do auto-transformador ser um transformador real, todos os princípios aplicados ao transformador multi-enrolamentos normal são aplicáveis aqui, nomeadamente a seguinte expressão, com a condição de que a queda devida à corrente em vazio seja desprezada.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

As tensões no auto-transformador são directamente proporcionais ao número de espiras dos enrolamentos.

Aqui, para diminuir a tensão, o número de espiras  $N_2$  está contido no número de espiras  $N_1$  - ver fig. 2.

LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas



a) Transformação para menor tensão

b) transformação para maior tensão

Fig. 2 - Tensões e espiras dos enrolamentos no auto-transformador

A relação total entre a tensão mais elevada e a tensão mais baixa é chamada a relação de transformação nominal do auto-transformador.

$$n = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \quad ; \quad \text{Exemplo (ver fig. 3):} \quad n = \frac{240V}{200V}$$

Neste caso, a tensão em vazio  $U_{20}$  na saída é dada como tensão nominal em transformadores com potência nominal de valor superior a 16 KVA.

No caso de transformadores de pequena potência nominal, a tensão nominal de saída é a tensão de secundário à carga nominal, com carga activa ( $\cos \varphi=1$ ) - ver fig. 3.

Fabricante					
Modelo	Nº		Ano de Fabrico	1990	
Potência Nominal	KVA	20	Tipo	Frequência	Hz
Tensão Nominal	V	200	240	Operação	S1
Corrente Nominal	A	101	83	Comutação	li0
Tensão de Impedância	%	1	Corrente de Curto-Circuito	K.A	

Fig. 3 - Placa de características do transformador monofásico

1.5. - Ângulo de fase entre as tensões

Durante a transformação para baixa tensão num auto-transformador, a tensão de saída é levada a cabo juntando uma porção do número total de espiras. A tensão de entrada é aplicada no número total de enrolamentos. Portanto, a tensão de saída é uma componente da tensão total. Consequentemente, não pode haver desfasamento entre  $U_1$  e  $U_2$  - ver fig. 1-a).

Quando aumentamos uma tensão, a tensão de saída  $U_2$  torna-se maior dado que é a soma da tensão  $U_1$  e da tensão  $U_{II}$  induzida no enrolamento de saída II.

Como o mostrado na fig.1.b), também neste caso, não há desfasamento entre a tensão de entrada e a tensão de saída.

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

1.6. - Nota para os vectores de tensão

As seguintes relações são para ser levadas em consideração, para os vectores de tensão dados:

- O transformador é um consumidor para a tensão de entrada  $U_1$ .
- A tensão de entrada deve conduzir a corrente de entrada pelo transformador.
- O vector de tensão para  $U_1$  é indicado desde  $1U_1$  até  $1U_2$ .

As tensões auto-induzidas  $U_{I0}$  e  $U_{II0}$  ocorridas nos enrolamentos são causadas pelo mesmo fluxo magnético. Consequentemente, eles têm a mesma direcção e opõe-se à tensão de primário  $U_1$ , de acordo com a Lei de Lenz. O transformador, que não está ligado em vazio, determina a direcção da tensão de saída  $U_2$ .  $U_2$  deve conduzir a corrente de carga, do lado de saída, desde  $2U_1$  até  $2U_2$  via carga resistiva.

O vector de tensão para  $U_2$  indica-se convenientemente desde  $2U_1$  até  $2U_2$  (ver fig. 1-b)).

***Transformação da corrente:  $I_1 = f(I_2)$ , com  $R = \text{constante}$***

2.1. - Generalidades

Quando um auto-transformador é usado para abaixamento de tensão, o número de espiras do enrolamento secundário está contido no enrolamento primário. Aqui, o enrolamento secundário é obtido do enrolamento primário. Se a resistência é ligada no enrolamento de saída do auto-transformador, então a corrente de carga  $I_2$  circula neste circuito de saída. A corrente de entrada  $I_1$  correspondente, gera um fluxo magnético alternado no enrolamento primário  $1U_1-1U_2$ . A tensão auto-induzida  $U_0$  induzida pelo fluxo alternado é dividida nas tensões componentes  $U_{I0}$  e  $U_{II0}$  - ver fig. 4.

LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas

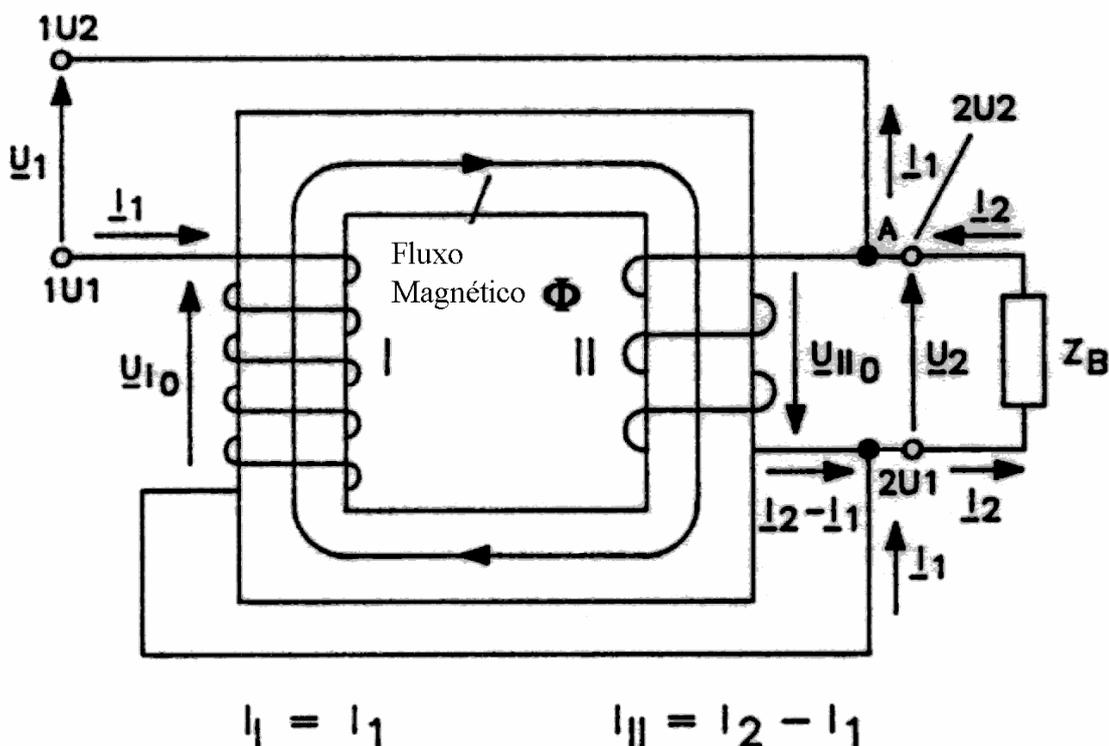


Fig.4 - Circuito do auto-transformador para redução da tensão

Estas tensões parciais têm a mesma direcção e são opostas à tensão de entrada  $U_1$  em conformidade com a Lei de Lenz.

Por isso, a corrente de secundário  $I_{II}$  tem direcção oposta à corrente de primário  $I_I$ .

A corrente na saída é a soma das correntes:

$$I_2 = I_1 + I_{II}$$

Como resultado, a secção do condutor do enrolamento secundário 2U1-2U2 não precisa ser dimensionado para a corrente de carga total - ver fig. 5a,b,c.

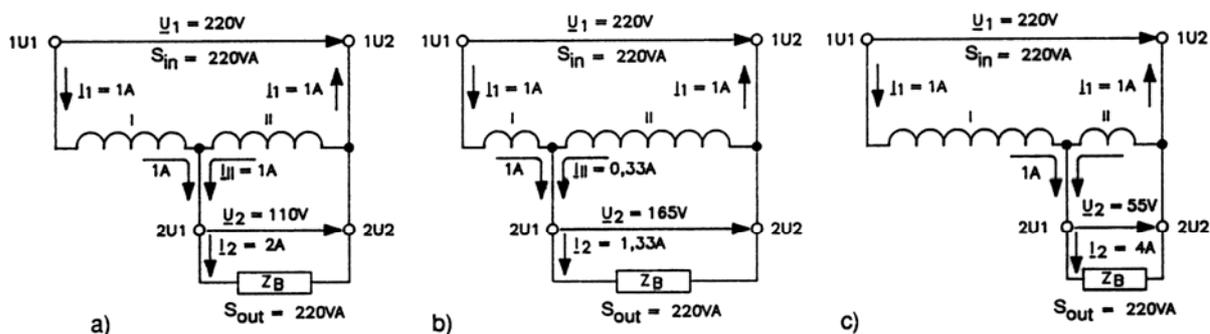


Fig. 5 - Correntes no auto-transformador durante o abaixamento da tensão  
as perdas no auto-transformador são desprezáveis:  $S_{in} = S_{out}$ .

A figura 6 mostra o circuito de um auto-transformador monofásico para elevar a tensão.

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

A corrente que entra pelo transformador em carga é dividida de acordo com o número de espiras dos enrolamentos:

$$I_1 = I_1 + I_2$$

$$I_1 = I_1 - I_2$$

O campo magnético alternado gerado pela corrente de primário II também atravessa o enrolamento secundário e produz aí o aumento de tensão requerido, através da indução. Como a figura 4 mostra, a secção do condutor do enrolamento de entrada não tem que ser dimensionado para toda a corrente de entrada  $I_1$  no circuito de aumento de tensão, mas apenas para a pequena corrente de primário II:

$$I_1 = I_1 - I_2$$

As figuras 5a a 5c mostram que na secção do enrolamento comum, a corrente decresce tanto mais quanto a tensão de saída se aproxima da tensão de entrada. Contudo, o auto-transformador torna-se mais vantajoso quando a relação de transformação de tensão se encontra próxima de 1.

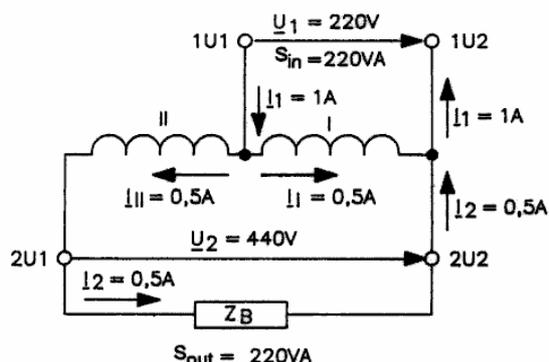
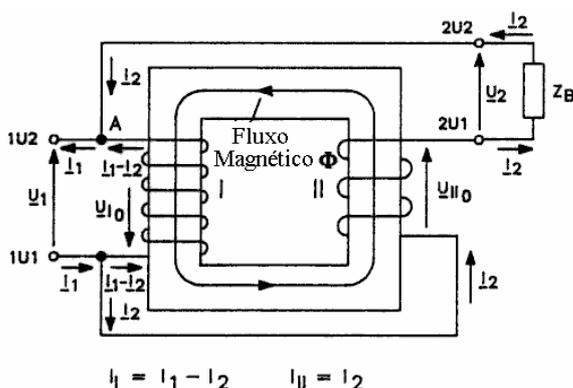


Fig. 6 - Circuito do auto-transformador para aumentar tensão      Fig. 7 - Correntes num auto-transformador em carga, para aumentar tensão

**2.2. - Energia (potência)**

Num auto-transformador monofásico apenas existe a diferença entre a circulação das correntes de entrada e saída na secção comum do enrolamento durante a carga.

A secção do enrolamento em carga desta forma, pode ser fabricado com uma secção mais reduzida.

Além de que, a potência de saída é entregue na maior parte directamente desde o lado de entrada para o lado de saída, através da condução de corrente, via a secção de enrolamento comum. Apenas uma reduzida componente é transportada via fluxo magnético.

Sendo assim, o núcleo de ferro pode ser construído de uma forma menos robusta.

Por conseguinte, nós diferenciamos no caso do auto-transformador:

A **potência indutiva  $S_{IP}$**  e a **potência consumida (aparente)  $S_T$**

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

No caso de um transformador multi-enrolamentos, toda a potência aparente produzida é transportada desde o primário para o secundário, via campo magnético.

Portanto, o primário e o secundário, assim como o núcleo de ferro devem ser dimensionados para transportar toda a energia a ser transformada:

A sua potência indutiva é igual à potência consumida:

$$S_{IP} = S_T$$

No caso do auto-transformador, uma porção de corrente e também de energia é transformada directamente desde o primário para o secundário, via ligação galvânica (pelo cobre), e apenas uma parte da energia é transportada via fluxo magnético.

Se ignorarmos as perdas do auto-transformador em vazio, então o seguinte aplica-se para a potência consumida:

$$S_T = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

O tamanho do transformador é determinado pela porção indutiva da potência consumida a ser transportada via fluxo magnético pelo núcleo de ferro. Esta é a chamada potência indutiva. É sempre mais pequena que a potência consumida do auto-transformador:

$$S_{IP} < S_T$$

Verifica-se o seguinte, quando se decresce a tensão de entrada:

$$U_1 > U_2$$

A diferença de correntes  $I_1 = I_2 - I_1$  deve ser transformada indutivamente - ver fig. 5.

$$S_{IP} = U_2 \cdot (I_2 - I_1)$$

$$S_{IP} = U_2 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1$$

Quando as perdas e a corrente em vazio são ignoradas, a seguinte relação de transformação é também verdadeira para o auto-transformador:

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

A corrente de entrada na equação para a potência indutiva pode ser substituída por:

$$n = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow I_1 = \frac{I_2}{n}$$

$$S_{IP} = U_2 \cdot I_2 - U_2 \cdot \frac{I_2}{n}$$

$$S_{IP} = U_2 \cdot I_2 \cdot \left(1 - \frac{I_2}{n}\right)$$

com:  $S_T = U_2 \cdot I_2$  e  $n = \frac{U_1}{U_2}$

então:  $S_{IP} = S_T \cdot \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)$

O seguinte aplica-se quando se aumenta a tensão de entrada:

$$U_1 < U_2$$

### **LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

A diferença de tensões  $U_{II} = U_2 - U_1$  deve ser gerada indutivamente - ver fig. 7.

$$S_{IP} = I_2 \cdot (U_2 - U_1)$$

$$S_{IP} = U_2 \cdot I_2 - U_1 \cdot I_2$$

Resultados com a relação de transformação  $n$  :

$$U_1 = n \cdot U_2$$

$$S_{IP} = U_2 \cdot I_2 - n \cdot U_2 \cdot I_2$$

$$S_{IP} = S_T (1 - n)$$

$$S_{IP} = S_T \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right)$$

### 2.3. - Áreas de aplicação do auto-transformador

As equações dadas no ponto anterior mostram que a potência indutiva e o tamanho do auto-transformador são pequenos. Quanto menor for a diferença entre as tensões de entrada e saída, mais a relação de transformação se aproxima de 1.

Consequentemente, os auto-transformadores são usados de preferência quando as tensões são aumentadas ou abaixadas apenas por um pequeno valor. Um exemplo típico será para a compensação de quedas de tensão em certos pontos da rede de distribuição eléctrica, que têm "pontos mortos" em redes locais. Também podem ser usados como transformadores reguladores em redes de alta tensão e de transformação de tensão ultra-alta, desde 220 KV até 750 KV.

Pequenos auto-transformadores também são utilizados de forma similar como potenciômetros rotativos, para operar como transformadores com núcleo toroidal de saída variável.

Exemplos adicionais de aplicações são: Arranque para lâmpadas de valor de sódio, transformadores de arranque para motores monofásicos e motores de comboios.

Também podem ser usados auto-transformadores trifásicos, para motores trifásicos - ver fig. 8.

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

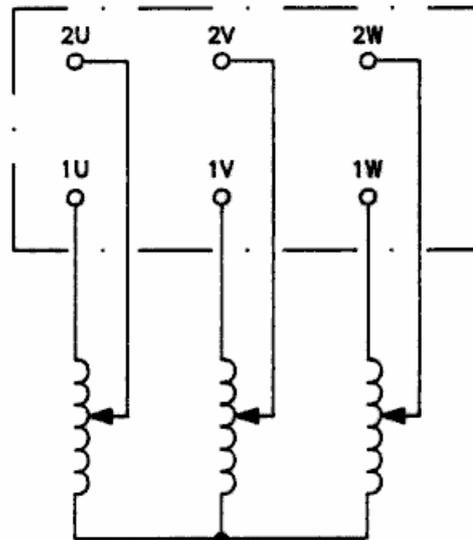


Fig. 8 - Auto-transformador trifásico com tensão de saída variável

**Nota especial:**

Existe uma condução galvânica entre o lado de entrada e saída do auto-transformador. Isso exclui certas aplicações para o auto-transformador.

É proibido usar o auto-transformador como:

- Transformador de isolamento de segurança;
- Transformador de isolamento;
- Transformador separador de tensão reduzida;
- Transformadores de campainhas e brinquedos;
- Transformador de instrumentação;

**2.4. - Transformação da corrente**

A transformação da potência do primário para o secundário é conseguida, com auto-transformadores, em parte directamente e em parte indirectamente, via campo magnético.

Se ignorarmos as perdas no auto-transformador - transformador ideal - o seguinte é verdade:

$$S_{in} = S_{out}$$

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

As correntes na entrada e na saída do auto-transformador são inversamente proporcionais às tensões.

Com o número de espiras a seguinte relação de transformação de corrente resulta em:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad , \text{ ou também } , \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{n}$$

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

A relação de correntes é inversa à relação entre o número de espiras.

Esta relação de correntes é aproximada, porque a corrente de entrada  $I_1$  contém sempre a corrente em vazio  $I_0$ . Isto é apenas uma pequena percentagem da corrente de entrada.

**Resposta em carga  $U_{out} = f(I_{out})$ , com  $U_{in} = \text{constante}$  e vários tipos de carga (óhmica, indutiva e capacitiva)**

3.1. - Generalidades

O auto-transformador, transforma a energia do lado de entrada para o lado de saída, em parte directamente via enrolamentos e em parte indutivamente via fluxo magnético.

Um auto-transformador pode ser considerado, pelo lado de saída, como um gerador de tensão, cujas impedâncias internas consistem numa componente resistiva e outra indutiva (ver fig. 9).

O auto-transformador em vazio, gera a tensão em vazio  $U_{20}$ .

Quando em carga, quedas de tensão resistivas e indutivas aparecem devido às impedâncias internas do auto-transformador. A tensão dos terminais do auto-transformador em carga, varia em função da carga.

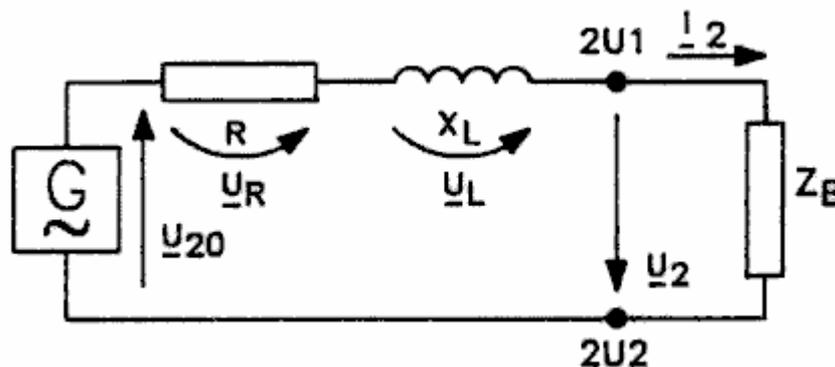


Fig. 9 - Circuito equivalente, simplificado, do auto-transformador

3.2. - Tensão de curto-circuito

Uma medida para as máximas quedas de tensão, ocorridas no auto-transformador à carga nominal, é a tensão de curto-circuito  $U_K$ . Aqui estamos a jogar com a tensão do enrolamento de entrada do auto-transformador, que permite fazer circular a corrente nominal, quando o enrolamento de saída está em curto-circuito (ver fig. 10).

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

A descrição gráfica das tensões, que aparecem neste caso, é representada pelo triângulo de Potier (ver fig. 11).

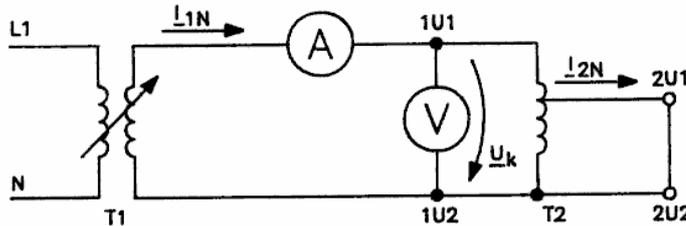


Fig. 10 - Configuração do ensaio para a medida da tensão de curto-circuito num auto-transformador redutor

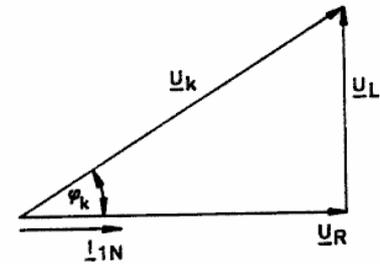


Fig. 11 - Triângulo de curto-circuito (Triângulo de Potier)

3.3. - Tensão de curto-circuito relativa

Na prática a tensão de curto-circuito relativa é dada como uma percentagem, com referência à tensão nominal do transformador:

$$u_k = \frac{U_K}{U_{1N}} \cdot 100\%$$

3.4. - Resposta em carga

No caso do transformador em carga - ver fig. 9 - a adição geométrica das quedas de tensão através das impedâncias internas do transformador e da tensão na carga (= tensão nos terminais do transformador), dá a tensão em vazio  $U_{20}$ .

Os diagramas de fase, representados na fig. 12, resultam da diferente relação de fases entre a corrente de carga  $I_2$  e a tensão em vazio  $U_{20}$ . Uma carga indutiva normalmente gera uma maior queda de tensão  $U_2$  que uma carga óhmica. Em contraste, a carga capacitiva provoca um aumento na tensão aos terminais em relação à tensão em vazio. Esta dependência da carga é mostrada na fig. 13.

LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas

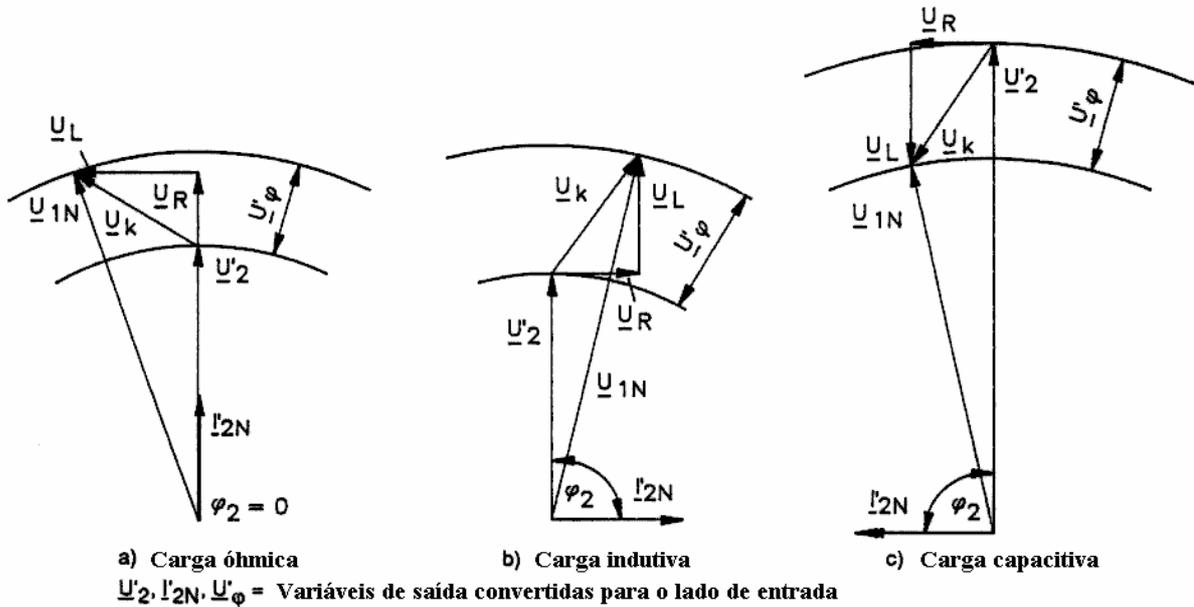


Fig. 12 - Diagrama vectorial para a determinação da tensão  $U_2$  nos terminais de saída

Como o explicado em 3.2, a tensão de saída do transformador em carga pode variar pelo valor da tensão de curto-circuito relativa  $u_K$ . Isto é também uma medida para a impedância interna  $Z_K$  do transformador:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{1N}}$$

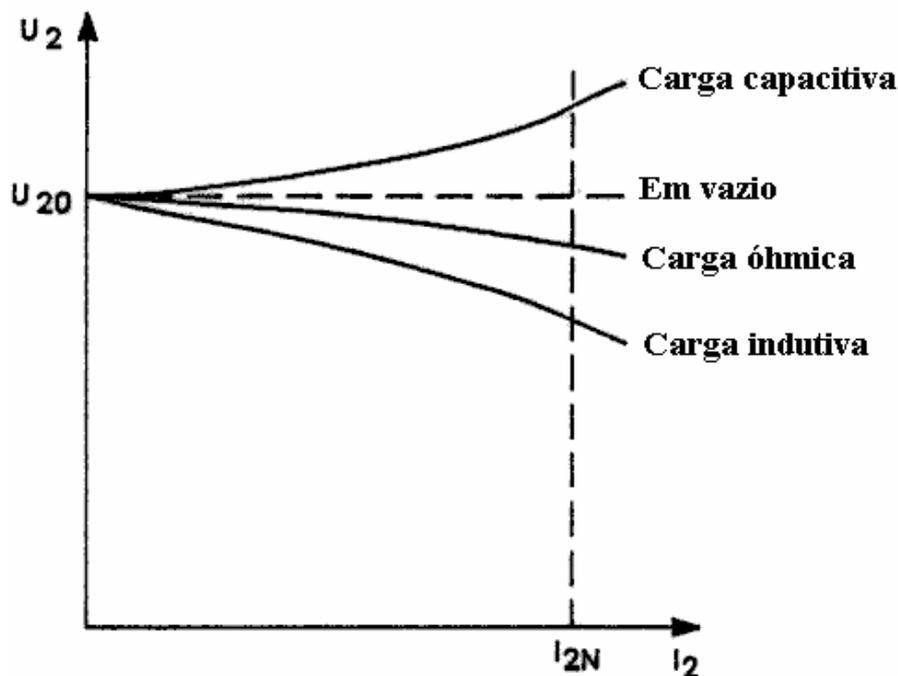


Fig. 13 - Tensão de saída para vários tipos de carga no auto-transformador

Em geral, transformadores com pequena tensão de curto-circuito têm uma leve queda de tensão  $U_2$ , em carga. Aqui, fala-se de transformadores de tensão inflexível, como por ex., os requeridos para as redes de distribuição. Naturalmente, estes transformadores estão

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

expostos ao perigo de curto-circuito, porque no caso de curto-circuito no lado de saída, a tensão nominal aplicada ao primário causa correntes muito elevadas.

Transformadores com grande tensão de curto-circuito são completamente diferentes. Em carga, eles respondem com grandes quedas de tensão. Estes transformadores são chamados de tensão flexível. Um curto-circuito no secundário não causa grande aumento de corrente. Estes transformadores limitam a corrente de curto-circuito e são à prova de curto-circuito. Este tipo, de resposta é requerido no caso de transformadores de ligação e de ignição, entre outros. Especialmente o auto-transformador é a excelência em tensões de curto-circuito reduzidas.

Embora o torne de tensão inflexível - ver fig. 15 - extraordinariamente, grandes correntes de curto-circuito circulam se existir um curto-circuito na saída.

Quando usado em redes de distribuição eléctrica, este transformador contribui muito menos para a limitação da corrente de curto-circuito, por exemplo, do que um transformador multi-enrolamentos.

Tipo de Transformador	Tensão de curto-circuito $u_k$ em %
Auto-transformadores	muito inferior a
Transformadores multi-enrolamentos:	1
Conversores de tensão	
Transformadores trifásicos	inferior a 1
Transformadores conectores de redes	4 a 8
Transformadores de isolamento	8 a 10
Transformadores de brinquedos	10
Transformadores de campainhas	20
Transformadores de ensaio	40
(podem ser montados)	
Transformadores de ignição	70
	100

Fig. 14 - Tabela das tensões de curto-circuito mais comuns

LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas

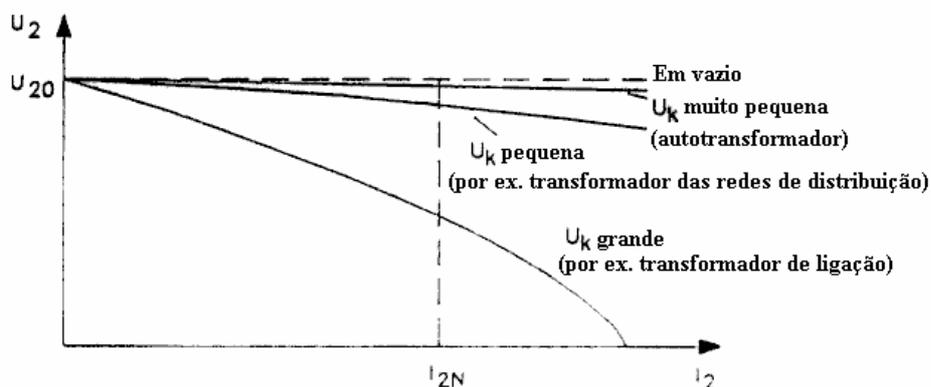


Fig. 15 - Resposta em carga de transformadores de tensão flexível e inflexível

A tensão de curto-circuito do auto-transformador é dependente da relação entre as tensões de entrada e saída, i.e., a relação de transformação  $n$ .

Quanto mais próximo o valor da relação de transformação estiver de 1, menor se torna a tensão de curto-circuito.

No caso de grandes transformadores, também chamados de reactâncias limitadoras, têm de ser usados para limitar a corrente de curto-circuito.

Transformadores com potências nominais acima de 16 KVA, indicam a tensão de curto-circuito na placa de características (ver fig. 16).

○		Fabricante				○
Modelo	□	Nº	□	Ano de Fabrico	1990	
Potência Nominal	KVA	20	Tipo	□	Frequência	Hz 50
Tensão Nominal	V	200	240	Operação	S1	
Corrente Nominal	A	101	83	Comutação	li0	
Tensão de Impedância	%	1	Corrente de Curto-Circuito	KA	□	
○						○

Fig. 16 - Placa de características de um transformador monofásico

#### 4.1. - Generalidades

A potência indicada na placa de características do transformador é a máxima potência que pode ser fornecida no lado de saída do transformador. Porque o tipo de carga pode variar, é normalmente indicada em potência aparente, em VA.

(De acordo com as normas DIN, a potência aparente e a potência reactiva podem também ser indicadas em Watt.)

Como em todos os casos de conversão de energia, também ocorrem perdas no auto-transformador.

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

O rendimento é definido como sendo uma relação entre duas potências activas. Nos transformadores, perdas de energia consideráveis ocorrem nos enrolamentos — perdas no cobre — e no núcleo de ferro — perdas no ferro por histerese e correntes de Foucault (Eddy) - ver fig. 17.

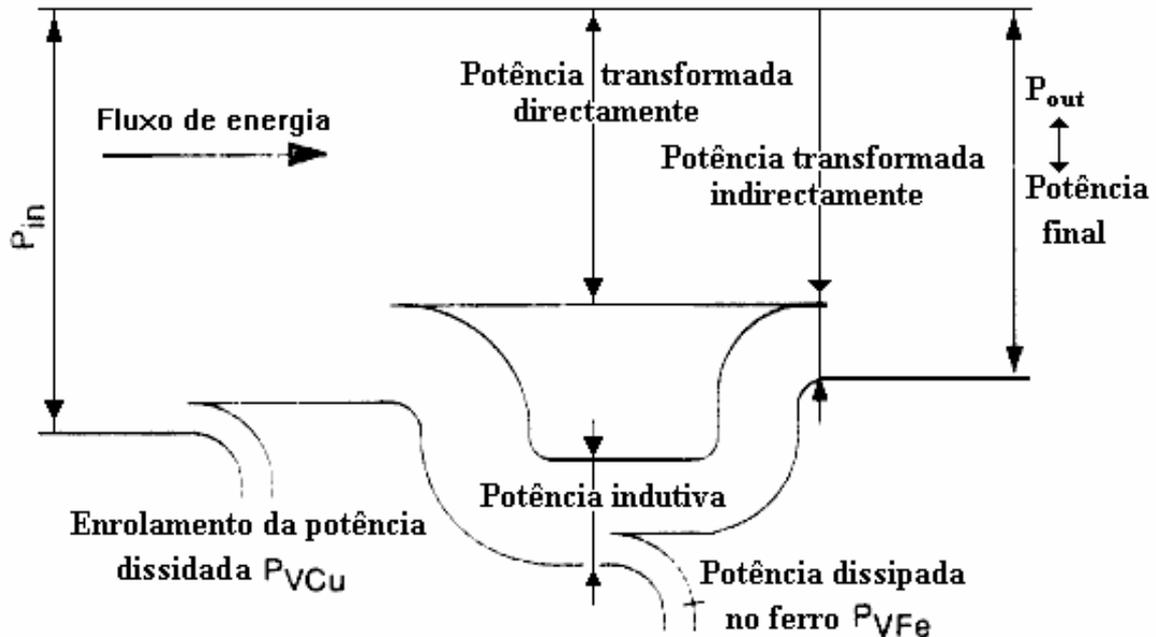


Fig. 17 - Potência activa que circula no auto-transformador  
As seguintes equações servem para calcular o rendimento:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

ou

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{VFe} + P_{VCu}}$$

$\eta$ = Rendimento sem unidades	$P_{in}$ = Potência activa fornecida em W
	$P_{out}$ = Potência activa de saída em W
	$P_{VCu}$ = Perdas no cobre em W (nos enrolamentos)
	$P_{VFe}$ = Perdas no Ferro em W (perdas por histerese e por correntes de Foucault)

Frequentemente o rendimento é indicado em percentagem. Assim, a equação acima poderá ser multiplicada por 100%.

**4.2. - Determinação directa do rendimento**

O rendimento pode ser determinado pela medição da potência activa que é fornecida, e pela potência activa à saída do transformador.

Devido ao facto do rendimento ser muito elevado nos grandes transformadores, não ocorrem diferenças significativas entre a potência activa aplicada ao transformador e a fornecida por este.

**LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas**

Neste caso o método directo poderá não ser suficientemente rigoroso - (ver fig. 18).  
No caso seguinte, determinam-se directamente as perdas de energia no transformador.

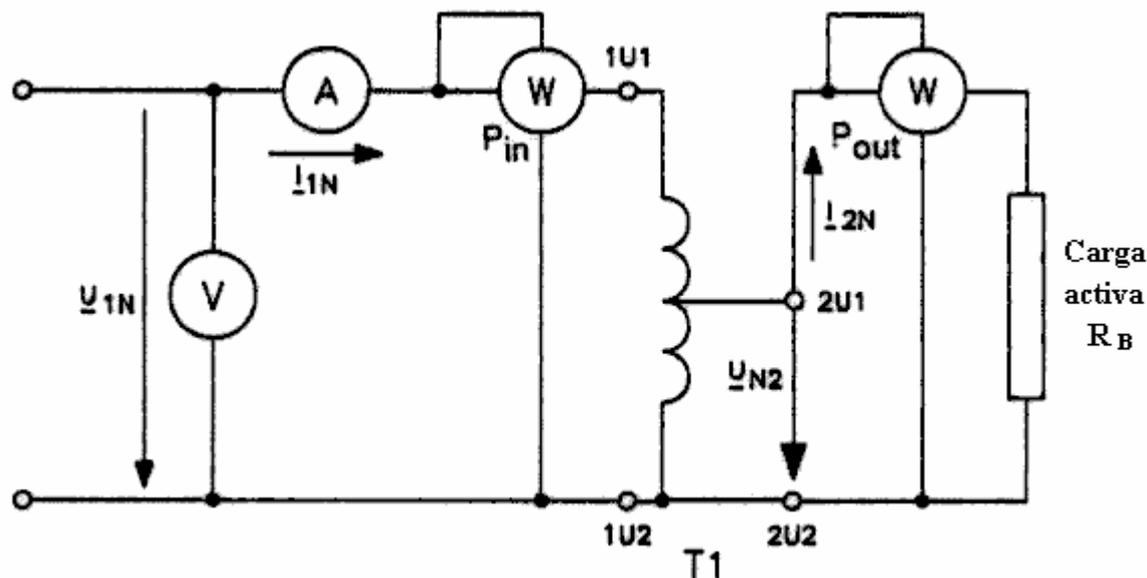


Fig. 18 - Determinação do rendimento através da medição da potência nominal na entrada e na saída.

Potência Nominal	Rendimento $\eta$
100 W	0,88
1 KW	0,92
10 KW	0,96
100 KW	0,97
1000 KW	0,98
10000 KW	0,99

Fig. 19 - Tabela com os vários rendimentos do transformador em plena carga.

**4.3. - Determinação do rendimento nominal pela medição das perdas de energia**

Quando o auto-transformador está a funcionar em vazio, apenas circula a corrente em vazio  $I_0$ . A corrente em vazio é muito pequena. Neste caso, as perdas no cobre podem ser desprezadas. Portanto, a potência activa mensurável em vazio, representa a potência dissipada no núcleo de ferro - ver fig. 20.

*LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas*

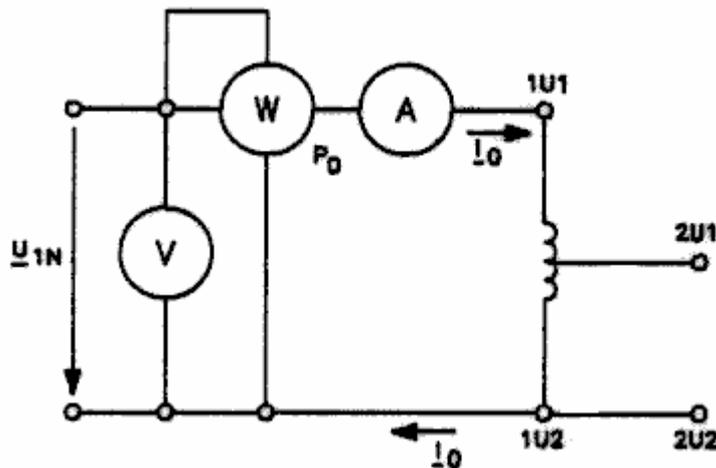


Fig. 20 - Ensaio em vazio para determinar as perdas no ferro.

Na medição da tensão de curto-circuito já descrita, normalmente as correntes nominais circulam nos enrolamentos a baixa tensão. O fluxo magnético é muito pequeno, devido ao facto das tensões serem pequenas. Praticamente não existe potência dissipada no ferro. Então, a potência activa consumida mensurável durante o ensaio em curto-circuito, representa as perdas no cobre do transformador - ver fig. 21.

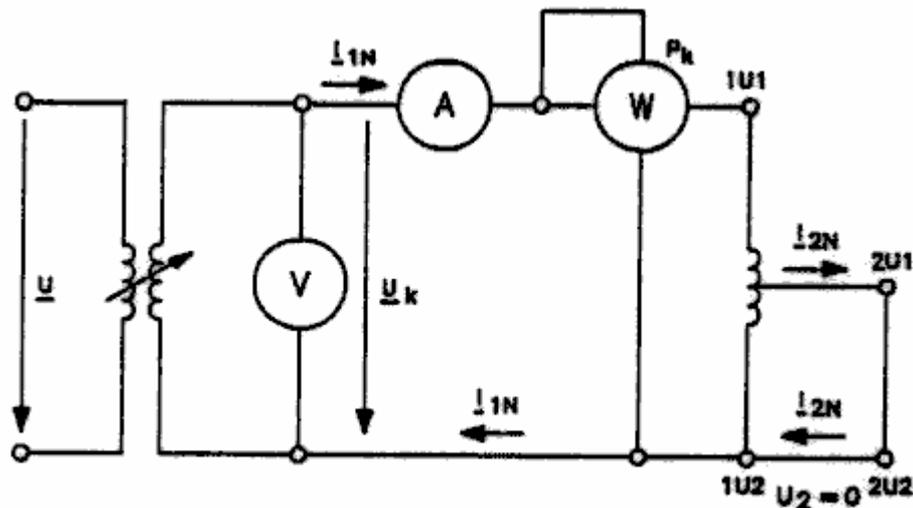


Fig. 21 - Ensaio em curto-circuito para determinar as perdas no cobre.

#### 4.4. - Curva do rendimento

O fluxo magnético no núcleo de ferro do auto-transformador é independente da carga e é sempre constante. Por conseguinte, as perdas no ferro também são constantes. Contrariamente, as perdas nos enrolamentos aumentam com o quadrado da corrente e com a carga. O rendimento do transformador varia com a carga - ver fig. 22.

A energia de perdas no auto-transformador depende da corrente consumida. Esta, por seu turno, depende da potência aparente que está a ser consumida.

*LME - Laboratório de Máquinas Eléctricas*

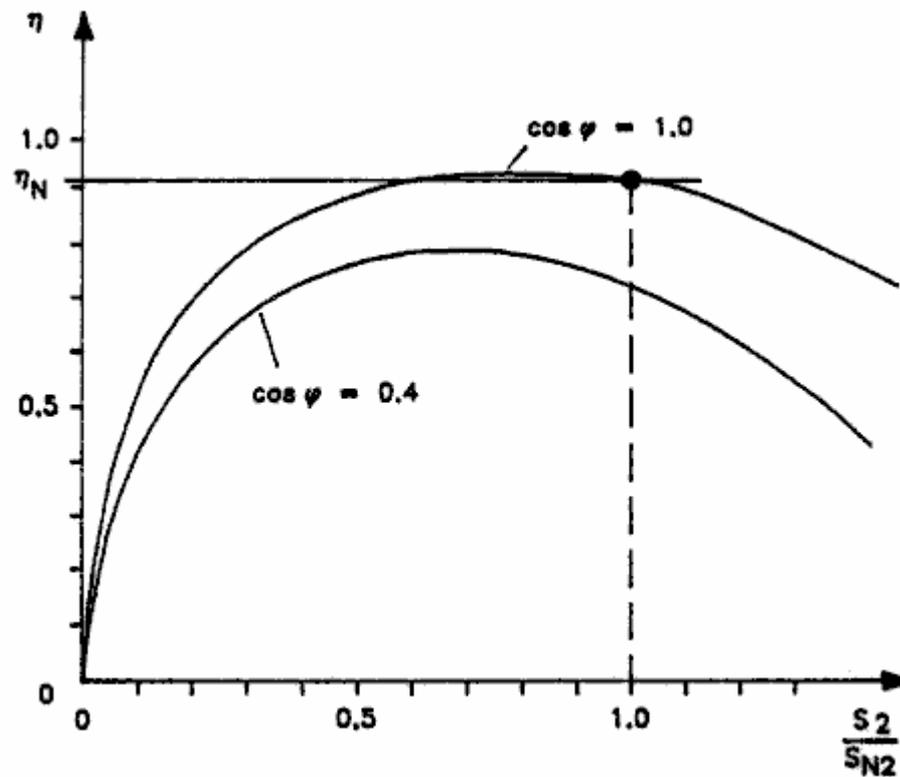


Fig. 22 - O rendimento do transformador como uma função da carga e do factor de potência.

$$\eta = \frac{S_N \cdot \cos \varphi}{S_N \cdot \cos \varphi + P_{VFe} + P_{VCu}}$$

Como resultado, o rendimento não é apenas dependente da carga, mas depende ainda do factor de potência - ver fig. 22.