

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PATO BRANCO
DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

Paulo dos Santos

**CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE UM TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO DIDÁTICO**

**PATO BRANCO
2012**

Paulo dos Santos

**CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE UM TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO DIDÁTICO**

Trabalho de diplomação apresentado como requisito parcial para obtenção do Título de Tecnólogo em Eletromecânica, do Curso de Tecnologia em Eletromecânica, Universidade Tecnologia Federal do Paraná, Campus Pato Branco.

Orientador: Prof. M. Sc. José Fabio Kolzer

**PATO BRANCO
2012**

TERMO DE APROVAÇÃO

Paulo dos Santos

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DIDÁTICO

Trabalho de Diplomação, aprovado como requisito parcial para obtenção do Título de Tecnólogo em Eletromecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. M.Sc. José Fabio Kolzer
Orientador

Prof. M.Sc. Beatriz A. Fontana Vargas
Primeiro Membro

Prof. M.Sc. Hervê StanglerIrion
Segundo Membro

Pato Branco, 01 de Novembro de 2012.

Dedicamos este trabalho aos nossos familiares, pelo apoio, força e coragem que nos deram, para que não desistíssemos nunca dos nossos objetivos.

AGRADECIMENTOS

Queremos agradecer primeiramente a Deus, pelo Dom da sabedoria e da inteligência. Às nossas famílias pelo incentivo aos estudos, aos professores e a todos que de certa forma contribuíram para neste momento estarmos concluindo mais uma etapa de nossas vidas: a conquista do objetivo de concluir um curso de graduação.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE EQUAÇÕES	xi
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiii
1 - Introdução.....	15
1.1 - Objetivos	15
1.2 - Justificativa	15
2 - Fundamentação teórica dos transformadores de potência.....	15
2.1.1 - Lei de Ampère.....	15
2.1.2 - Lei de Faraday.....	16
2.1.3 - Lei de Lenz.....	16
2.2- Principio de funcionamento	17
2.3 - Transformador ideal	18
2.4 - Transformador Real.....	20
2.4.1 - Perdas No Transformador Real.....	20
2.4.4 - Conseqüências da permeabilidade finita do circuito magnético	21
2.4.5 - Perdas no cobre	22
2.5 - Circuitos equivalentes	23
2.6 - Regulação de tensão.....	24
3 - Ensaio	25
3.1- Ensaio a vazio.....	26
3.2 -Ensaio de curto-circuito	27
3.3 - Ensaio com carga	27
4 -Resultados	33
5 - Discussão e conclusões	39

Referências 41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sentido de corrente e campo	16
Figura 2 - Movimento de um ímã em uma bobina.	16
Figura 3 - Movimento de um ímã em uma bobina e uma geração de uma fem.	18
Figura 4 - Transformador de potência.	19
Figura 5 - Transformador ideal.....	20
Figura 6 - Curva histerese magnética	21
Figura 7 - Transformador com fluxos dispersos.....	22
Figura 8 - Resistências e reatâncias primárias e secundárias ocasionando queda de tensão.....	23
Figura 9 - Circuito equivalente de um transformador de potência.	23
Figura 10 - Circuito equivalente aproximado com resistências e reatâncias refletidas..	24
Figura 11 - Circuito equivalente simplificado imaginando nula a corrente de magnetização	24
Figura 12 - Carga de fator de potência.	25
Figura 13 - Carga de fator de potência em atraso.....	25
Figura 14 - Carga de fator de potência em adianto.....	25
Figura 15 - Esquema elétrico para um ensaio de transformador a vazio.....	26
Figura 16 - Esquema elétrico para um ensaio de transformador em curto-circuito.	27
Figura 17 - Transformador comercial ensaiado.....	28
Figura 18 - Transformador didático e suas possíveis configurações.....	29
Figura 19 - Transformador didático ensaiado.....	29
Figura 20 - Instrumentos utilizados nos ensaios.....	30
Figura 21 - Esquema elétrico para um ensaio com carga resistiva.....	30
Figura 22 - Carga resistiva ensaiada.....	30
Figura 23 - Esquema elétrico para um ensaio com carga indutivo.....	31
Figura 24 - Carga indutiva ensaiada.	31
Figura 25 - Esquema elétrico para um ensaio com carga rc.....	31
Figura 26 - Carga rc ensaiada.	32
Figura 27 - Esquema elétrico para um ensaio com carga capacitiva.....	32
Figura 28 - Carga ensaiada capacitiva.	32
Figura 29 - Gráfico de regulação de tensão de um transformador comercial.....	35
Figura 30 - Gráfico de rendimento de um transformador comercial.....	35

Figura 31 - Gráfico de regulação de tensão de um transformador comercial.....	37
Figura 32 - Gráfico de rendimento de um transformador didático.....	38
Figura 33 - Gráfico de comparação da regulação de tensão em um transformador comercial.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dos transformadores ensaiados.....	25
Tabela 2 - Dados de ensaio a vazio	33
Tabela 3 - Dados de ensaio de curto circuito.....	33
Tabela 4 - Ensaio com carga resistiva com o transformador comercial.....	33
Tabela 5 - Ensaio com carga indutiva com transformador comercial	34
Tabela 6 - Ensaio com carga rc em um transformador comercial.....	34
Tabela 7 - Ensaio com carga capacitivo em um transformador comercial.....	34
Tabela 8 - Ensaio com carga resistiva com o transformador didático.....	36
Tabela 9 - Ensaio com carga indutiva com um transformador didático.....	36
Tabela 10 - Ensaio com carga rc com um transformador didático.....	36
Tabela 11 - Ensaio com carga capacitiva com um transformador didático.....	37

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Ralação de transformação de tensão.....	18
Equação 2 - Relação de transformação de correntes.	18
Equação 3 - Tensão induzida no enrolamento primário.	19
Equação 4 - Tensão induzida no enrolamento secundário.	19
Equação 5 - Relação de transformação.....	19
Equação 6 - Impedância no circuito primário.	22
Equação 7 - Impedância no circuito secundário.....	22
Equação 8 - Tensão induzida no primário.	22
Equação 9 - Tensão induzida no secundário.	23
Equação 10 - Regulação percentual de tensão.....	24
Equação 11 - Fator de potência	26
Equação 12 - Impedância de magnetização.....	26
Equação 13 - Resistência de magnetização.	26
Equação 14 - Modulo de corrente de magnetização.....	26
Equação 15 - Resistência de curto circuito.....	27
Equação 16 - Impedância de curto circuito	27
Equação 17 - Reatância de curto circuito	27
Equação 18 - Rendimento.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

V_1 : Tensão de alimentação

V_2 : Tensão entregue enrolamento secundário

I_1 : Corrente que circula no enrolamento primário

I_2 : Corrente que circula no enrolamento secundário

E_1 : Tensão induzida no enrolamento primário

E_2 : Tensão induzida no enrolamento secundário

X_L : Reatância indutiva

Z : Impedância do circuito

N_1 : Número de espiras no enrolamento primário

N_2 : Número de espiras no enrolamento secundário

RESUMO

Neste trabalho de conclusão de curso, será ensaiado um transformador comercial e um transformador didático, de modo a obter o circuito equivalente, através dos seguintes ensaios: ensaio a vazio, ensaio de curto-circuito e ensaio com carga de diferentes fatores de potência, sendo carga unitária (resistiva), carga em atraso (indutivo) e carga em adianto (capacitivo). Os ensaios serão realizados na sala de máquinas elétricas, com o acompanhamento do orientador.

Palavras chave: Transformadores, ensaios, regulação de tensão e rendimento.

1 - Introdução

1.1 - Objetivos

Determinar o rendimento e regulação de tensão de um transformador monofásico didático de núcleo intercambiável por meio de utilização da análise do circuito equivalente bem como por medição direta.

1.2 - Justificativa

O laboratório de máquinas elétricas dispõe de um transformador didático de núcleo intercambiáveis que atualmente é utilizado na disciplina de ensaios e manutenção de transformadores do curso de tecnologia de manutenção industrial bem como na disciplina de máquinas elétricas¹ do curso de Engenharia Elétrica. Em virtude de este transformador ter sido projetado com a possibilidade de utilizar bobinas primárias e secundárias com diferentes números de espiras e núcleos com características diferentes, há necessidade levantar o rendimento e a regulação de tensão do transformador para cada configuração possível.

2 - Fundamentação teórica dos transformadores de potência

O funcionamento de um transformador se baseia em conceitos do eletromagnetismo que serão brevemente descritos a seguir:

2.1.1 - Lei de Ampère

Hans Cristian Orsted demonstrou a relação entre eletricidade e magnetismo, observando que quando por um condutor circula uma corrente elétrica, surge ao redor deste um campo magnético. Faltava definir um sentido de campo, sendo que o físico Frances André Marie Ampère desenvolveu uma teoria afirmando que os fenômenos elétricos e magnéticos derivam de um princípio único, de uma ação mútua das correntes elétricas. Sendo assim através de uma regra chamada regra da mão direita, pode-se definir o sentido do campo através do sentido da corrente indicado pelo polegar, e o sentido do campo através dos outros dedos da mão como mostra a Figura 1 (CARVALHO, 2006).

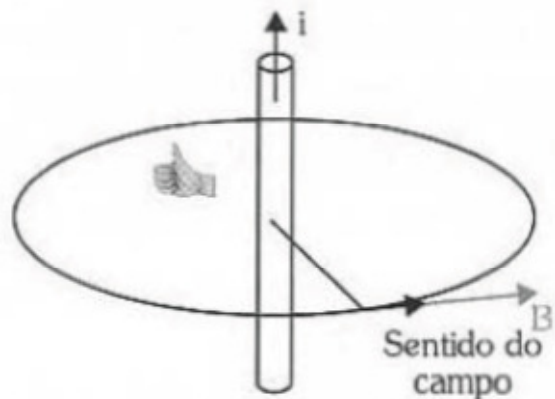


Figura 1 - Sentido de corrente e campo

2.1.2 - Lei de Faraday

Descoberta por volta de 1831 através de um experimento em eletricidade mostrado na Figura 2 que, ao aproximar um ímã de uma bobina conectada a um galvanômetro aparecia uma circulação de corrente, cessando a mesma quando parava a aproximação. Assim, demonstrou-se que não há tensão induzida sem a variação do fluxo. A lei de Faraday diz que a tensão induzida em uma espira de fio é proporcional a variação de linhas de força que concatenam com ela.

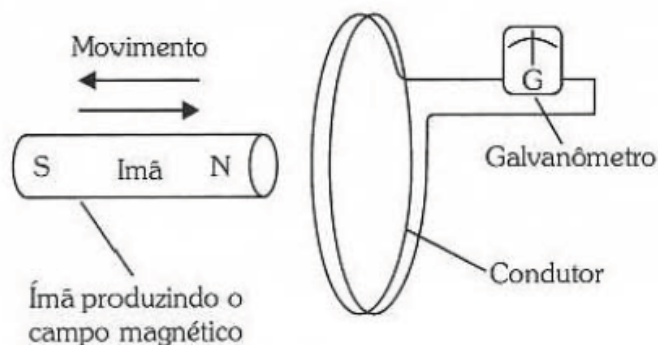


Figura 2 - Movimento de um ímã em uma bobina.

2.1.3 - Lei de Lenz

A lei de Lenz diz “que o sentido de uma fem induzida que resultou da variação do fluxo concatenado tem um sentido tal que seu efeito magnético se opõe à variação de fluxo que deu origem a essa fem.” (KOSOW,2005).

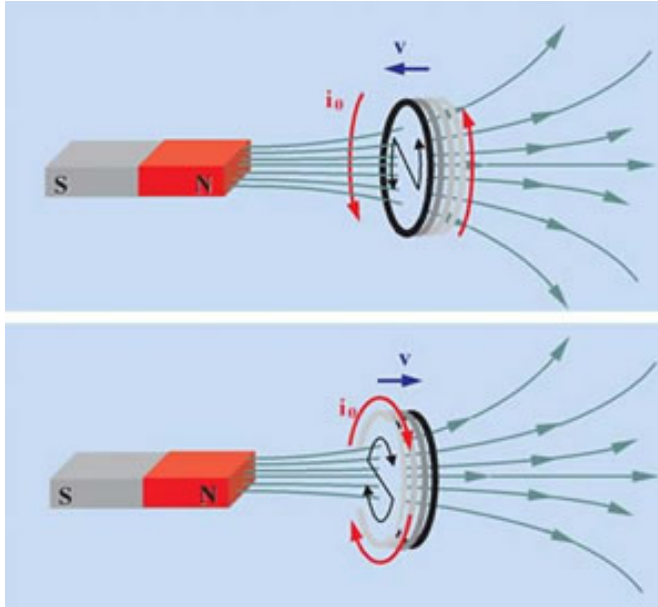


Figura 3 - Movimento de um ímã em uma bobina e uma geração de uma fem.

2.2 - Princípio de funcionamento

Um transformador de potência está constituído de pelo menos um enrolamento que recebe alimentação da rede alternada, denominado de enrolamento primário, e de um enrolamento isolado eletricamente do primeiro, mas acoplado magneticamente a ele, ao qual é ligado à carga. Como é possível observar na Figura 4, a tensão aplicada ao enrolamento primário dá origem a uma corrente que por sua vez produz um fluxo magnético alternado. Em virtude desse fluxo variável, tensões são induzidas tanto no enrolamento primário quanto no enrolamento secundário, cujo valor será proporcional ao número de espiras desses enrolamentos. Assim, o transformador pode ser utilizado tanto para abaixar uma tensão quanto para elevá-la.

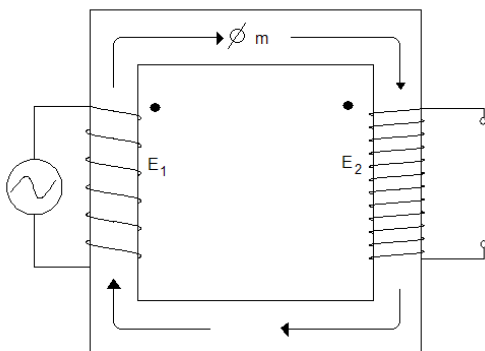


Figura 4 - Transformador de potência.

Transformadores ou trafos são dispositivos elétricos que têm a finalidade de isolar um circuito, elevar ou diminuir uma tensão.

Existem transformadores de diversos tipos, cada um com uma finalidade, construção e tamanho específicos.

Teoricamente, um transformador tem de transferir toda a potência do primário para o secundário, através de uma tensão primária (V_1) e corrente gerada pela carga (I_1) para uma tensão (V_2) e corrente secundária (I_2), mostrada pela fórmula ($V_1 I_1 = V_2 I_2$) especificado em KVA (primário e secundário são enrolamentos de entrada e saída, respectivamente).

Na prática, observa-se certa perda de potência nessa transferência de potência, ocasionada por diversos motivos, como a resistência de fio, correntes pelo núcleo, chamados de correntes de Foucault etc.

Um transformador é constituído pelo menos por dois enrolamentos ou mais quando há possibilidade de derivações da tensão. Esses enrolamentos são independentes entre si, mas sofrem a ação do campo eletromagnético, que é mais intenso quando esses transformadores possuem um núcleo de material ferromagnético. O enrolamento em que aplicamos a tensão que desejamos transformar chama-se primário e o enrolamento onde obtemos a tensão desejada se chama secundário.

A tensão induzida no secundário de um transformador é proporcional à relação de espiras entre o primário e o secundário. Já a relação de correntes é e inversamente proporcional à relação de espiras, como mostram as equações.

Equação 1 - Relação de transformação de tensão.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Equação 2 - Relação de transformação de correntes.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

2.3 - Transformador ideal

Considera-se um transformador ideal, de núcleo de ferro onde não há fluxos dispersos, isto é, onde existe apenas o fluxo mútuo ϕ , enlaçado por ambas as bobinas do enrolamento primário e secundário.

Com o enrolamento secundário aberto, a aplicação de uma tensão CA no enrolamento primário dá origem a uma corrente CA neste circuito, chamada de corrente magnetizante, de valor reduzido, a qual estabelece um fluxo magnético alternado que é enlaçado tanto pelo enrolamento primário quanto pelo enrolamento secundário. Em virtude da Lei de Faraday, a variação do fluxo concatenado nos enrolamentos primário e secundário induz tensões e_1 e e_2 , respectivamente.

Equação 3 - Tensão induzida no enrolamento primário.

$$e_1 = n_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Equação 4 - Tensão induzida no enrolamento secundário.

$$e_2 = n_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Equação 5 - Relação de transformação.

$$k = \frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Considere-se a Figura 5. No instante considerado nessa figura, a tensão aplicada no terminal superior do primário é positiva, dando origem a uma corrente entrante crescente nesse terminal e, portanto, a um fluxo magnético crescente que se estabelece em sentido horário no circuito magnético. Pela lei de Lenz, o sentido da fem induzida no primário e no secundário será tal que seu efeito magnético se oponha à variação do fluxo que deu origem a estas fem. Assim, se for indicado com um ponto o terminal superior do enrolamento primário onde nesse instante é aplicada tensão positiva, e for indicado por um ponto o terminal no secundário onde a tensão também é positiva nesse instante, verifica-se que esse ponto estará localizado no terminal superior do enrolamento secundário, pois, se uma carga for ligada no secundário, a corrente neste enrolamento irá ser desmagnetizante, opondo-se, portanto ao aumento desse fluxo, conforme lei de Lenz. Entretanto, pelo fato do fluxo ser aproximadamente constante, o efeito desmagnetizante da corrente no secundário será compensado por um acréscimo na corrente do primário, de modo que $n_1 i_1 = n_2 i_2$.

No entanto, para um transformador ideal temos, que $v_1 = e_1$ e $e_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt}$ de modo que $e_1 = cte$, $\frac{d\phi}{dt} = cte$ então com o intuito de manter ϕ no valor inicial, é preciso que no enrolamento primário circule uma corrente adicional de modo a cancelar o efeito desmagnetizante da corrente no enrolamento secundário.

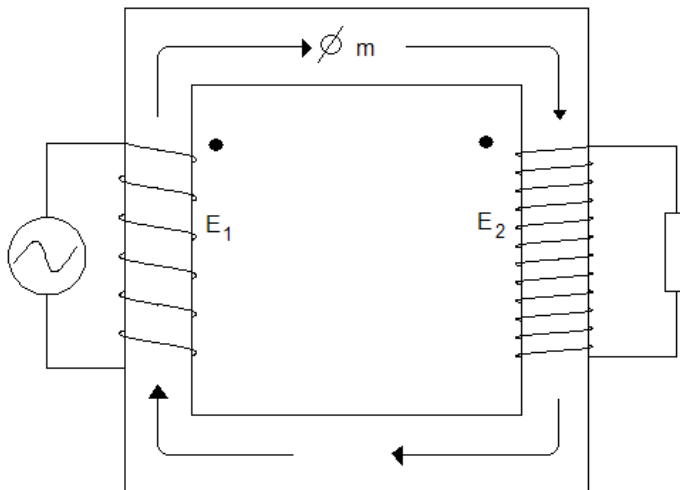


Figura 5 - Transformador ideal

2.4 - Transformador Real

2.4.1 - Perdas No Transformador Real

Um transformador real apresenta perdas no seu funcionamento normal, associadas à corrente que circula nos seus enrolamentos, bem como perdas decorrentes do fluxo variável no seu circuito magnético. Perdas referentes a corrente são perdas variáveis em função da carga do transformador e são denominadas perdas joule ou perdas no cobre, que podem ser modeladas por meio de resistência r_1 e r_2 nos enrolamentos primários e secundário respectivamente. Já as perdas associadas à variação do fluxo magnético no ferro são em função da tensão e são denominadas perdas no ferro ou perdas no núcleo. Estas perdas não dependem da carga pelo qual são denominadas perdas constantes. As perdas no ferro podem ser modeladas por meio de uma resistência R_c submetida à fem induzida E_1 .

2.4.2 - Correntes parasitas

Em virtude de o transformador funcionar com fluxo variável, tensões são induzidas no material magnético, dando origem a correntes conhecidas como correntes parasitas, pelo fato destas darem origem a perdas joules. Com o intuito de minimizar essas perdas, um material magnético é constituído de um empilhamento de laminas isoladas entre si. Deste modo diminui a área a qual essas correntes parasitas circulam e portando as perdas a elas associadas.

2.4.3 - Perdas por histerese magnética

Representa a energia gasta para mudar a orientação dos dipolos, como mostrado na Figura6.

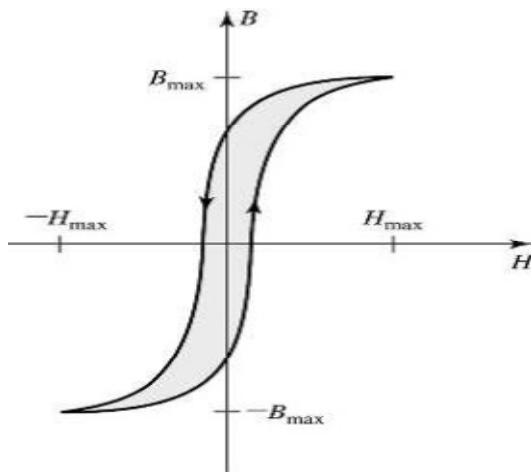


Figura 6 - Curva histerese magnética

2.4.4 - Consequências da permeabilidade finita do circuito magnético

Pelo fato da permeabilidade magnética do núcleo ser finita, é preciso de uma corrente no enrolamento primário para sustentar o fluxo magnético. Esta corrente, conhecida como corrente magnetizante, pode ser modelada como uma corrente através de uma reatância X_m , e submetida à tensão E_1 . Esta reatância é conhecida como reatância de magnetização, mostrada na Figura 7.

Outra consequência de permeabilidade magnética finita do circuito magnético é que nem todo fluxo produzido pela corrente no enrolamento primário irá ser concatenado pelo enrolamento secundário. Assim, parte do fluxo produzido no enrolamento primário irá se fechar através do ar, dando origem a fems induzidas que

podem ser modeladas com a queda de tensão numa reatância de dispersão X_{11} . De maneira semelhante, parte do fluxo produzido no enrolamento secundário se fecha pelo ar induzido uma fem que pode ser modelada através de uma reatância de dispersão X_{12} . Então o fluxo mútuo ϕ_m é aquele comum a ambos os enrolamentos.

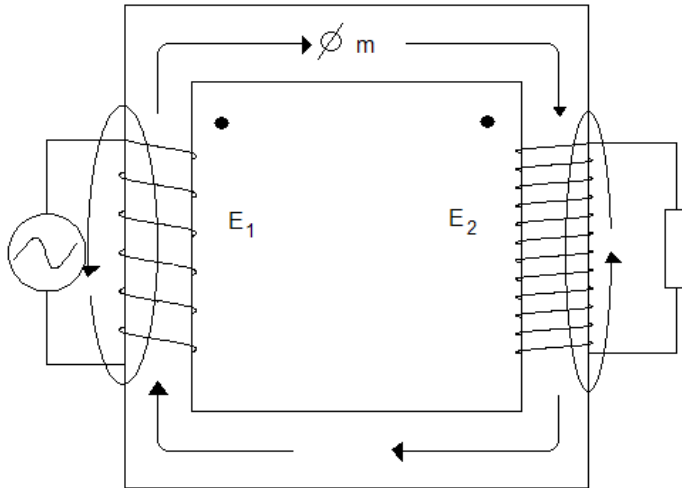


Figura 7 - Transformador com fluxos dispersos.

2.4.5 - Perdas no cobre

As perdas no cobre são ocasionadas pela resistividade do material condutor esmaltado utilizado na fabricação dos enrolamentos, podendo ser verificado através de ensaio de curto-circuito. As resistências e reatâncias dos enrolamentos produzem quedas de tensão em virtude da passagem de corrente pelos enrolamentos. Estes dois elementos constituem uma impedância Z como mostrada nas formulas e na Figura8.

Equação 6 - Impedância no circuito primário.

$$Z_1 = r_1 + jX_1$$

Equação 7 - Impedância no circuito secundário.

$$Z_2 = r_2 + jX_2$$

Equação 8 - Tensão induzida no primário.

$$E_1 = 4,44fN_1B_mA \times 10^{-8}V$$

Equação 9 - Tensão induzida no secundário.

$$E_2 = 4,44fN_2B_mA \times 10^{-8}V$$

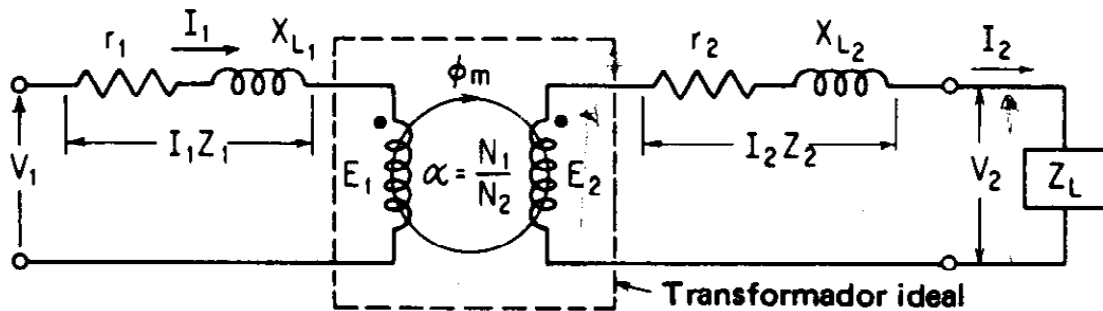


Figura 8 - Resistências e reatâncias primárias e secundárias ocasionando queda de tensão

2.5 - Circuitos equivalentes

Circuito equivalente se torna útil na aplicação do rendimento e regulação de tensão. Na Figura 9 é a representação de um transformador que satisfaz as condições dele a vazio e carregado. Na Figura 10 é possível obter um circuito equivalente aproximado deslocando o ramo paralelo L-R diretamente junto a fonte de suprimento V_1 , fazendo isto, é possível agrupar as resistências e reatâncias internas dos circuitos primário secundário, de modo a calcular os parâmetros equivalentes. Na Figura 11 despreza a componente de magnetização, I_m da corrente primária, I_1 . Com este efeito significa que o ângulo de fase da carga secundária é refletido diretamente para o primário sem alteração.

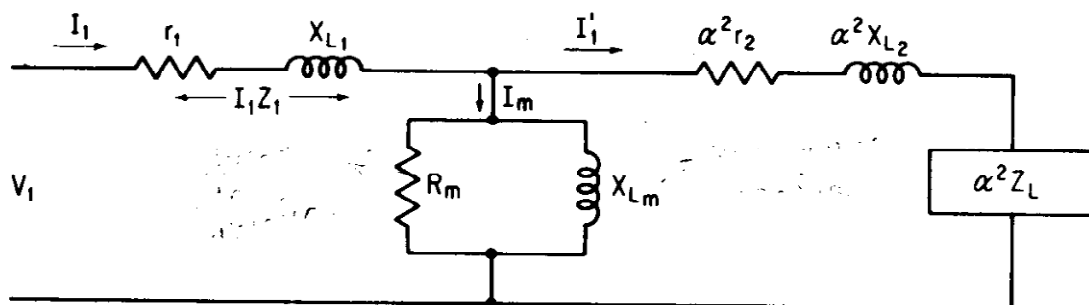


Figura 9 - Circuito equivalente de um transformador de potência.

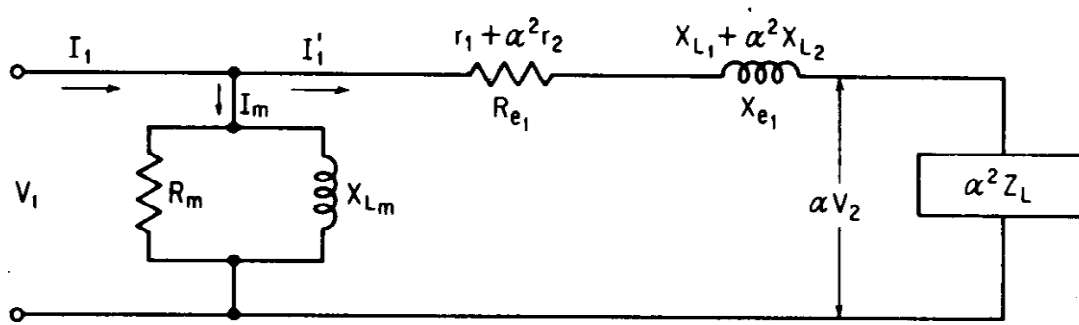


Figura 10 - Circuito equivalente aproximado com resistências e reatâncias refletidas.

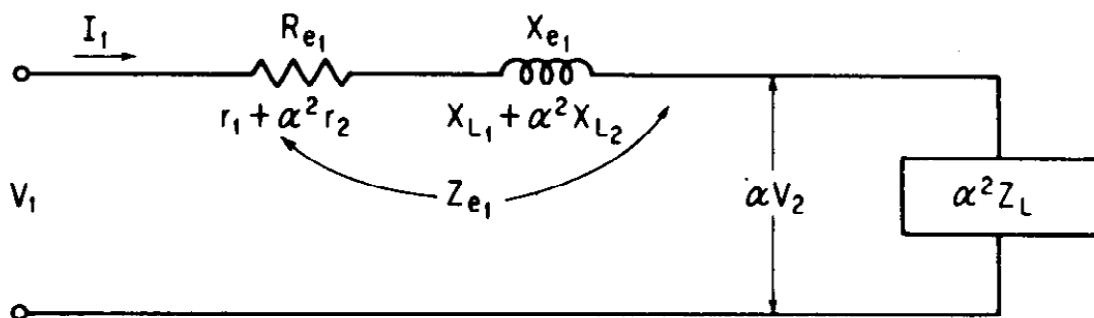


Figura 11 - Circuito equivalente simplificado imaginando nula a corrente de magnetização

2.6 - Regulação de tensão

Na Figura abaixo são representados os valores da tensão a vazio E_2 necessária para manter a tensão na carga no valor V_2 , para cargas que solicitam a corrente nominal do transformador, mas com diferentes fatores de potência. A Figura 12 correspondente a carga de fator de potência unitário. Percebe-se que a tensão a vazio é ligeiramente superior à tensão V_2 . Na Figura 13 correspondente a carga de fator de potência em atraso, sendo E_2 maior a V_2 . Já a Figura 14 corresponde à carga de fator de potência em adianto e neste caso E_2 é menor que V_2 . A regulação de tensão pode ser verificada através da fórmula seguinte.

Equação 10 - Regulação percentual de tensão.

$$R\% = \frac{E_2 - V_2}{E_2} \times 100$$

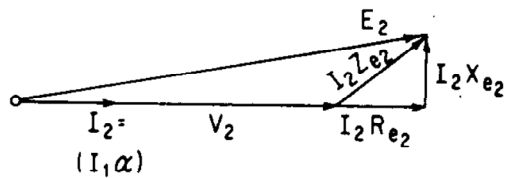


Figura 12 - Carga de fator de potência.

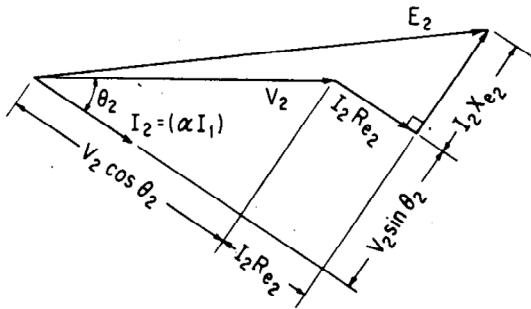


Figura 13 - Carga de fator de potência em atraso.

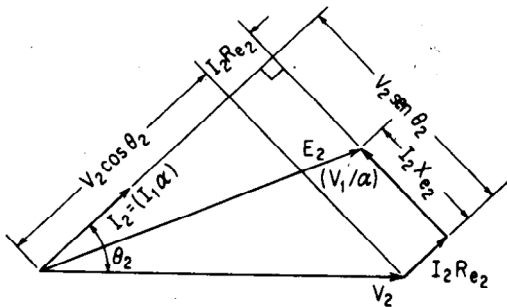


Figura 14 - Carga de fator de potência em adianto.

3 - Ensaio

No intuito de determinar o rendimento do transformador bem como os parâmetros do circuito equivalente, são necessários efetuar dois tipos de ensaios: ensaio a vazio e ensaio de curto circuito. E a seguir os dados dos transformadores ensaiados.

Tabela 1 - Dados dos transformadores ensaiados.

Transformador	V_1	V_2	$I_n(A)$	$P(VA)$
Comercial	50	127	2,0	100
Didático	127	127	0,63	79

3.1- Ensaio a vazio

Com a disposição dos instrumentos conforme no esquema da Figura15, alimentamos o enrolamento primário com a tensão nominal, registra-se a corrente e a potência para determinar as perdas no ferro e parâmetros para o circuito equivalente. Através das equações pode-se verificar o rendimento, a impedância do transformador a vazio, a resistência que modela as perdas no núcleo e reatância de magnetização.

Equação 11 - Fator de potência

$$\cos\varphi = \frac{P}{V I_{vz}}$$

Equação 12 - Impedância de magnetização.

$$Z_m = \frac{V}{I_{vz}}$$

Equação 13 - Resistência de magnetização.

$$R_m = V \frac{V}{I R_m}$$

Equação 14 - Modulo de corrente de magnetização.

$$I R_m = I_{vz} \cdot \cos\varphi$$

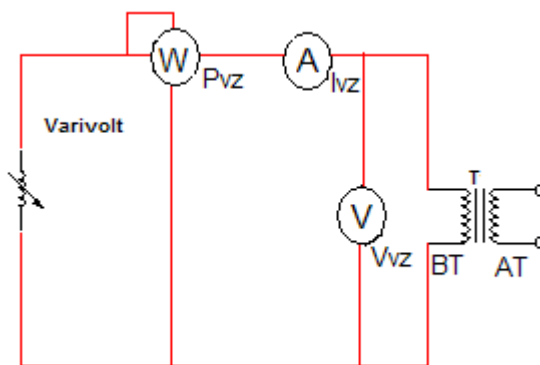


Figura 15- Esquema elétrico para um ensaio de transformador a vazio

3.2 -Ensaio de curto-circuito

Com a mesma disposição dos instrumentos utilizados anteriormente no ensaio a vazio, é realizado o ensaio em curto-circuito, com a diferença que o enrolamento secundário é curto-circuitado e, com o auxílio de uma fonte variável CA ou varivolt com tensão inicial em zero volt, incrementa-se a tensão até que atinja a corrente nominal. Com auxílio de instrumentos de medidas e cálculos, determina-se o valor da resistência, e a reatância indutiva do enrolamento.

Equação 15 - Resistência de curto circuito

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}$$

Equação 16 - Impedância de curto circuito

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{cc}}$$

Equação 17 - Reatância de curto circuito

$$X_{cc} = \sqrt{(Z_{cc}^2 - R_{cc}^2)}$$

Equação 18 - Rendimento

$$\cos\varphi = \frac{P_{cc}}{I_{cc} \times U_{cc}}$$

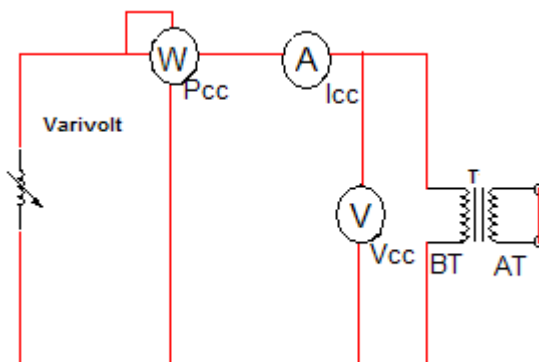


Figura 16 - Esquema elétrico para um ensaio de transformador em curto-circuito.

3.3 - Ensaio com carga

Através do ensaio com carga, podemos prever o real aproveitamento de um transformador, sabendo-se a maneira como ele se comporta em relação a cada tipo carga. Foi realizado ensaio com quatro tipos de carga diferentes, sendo elas resistiva, indutiva, rc e capacitiva. Cada tipo de carga foi iniciado com carga única e sendo incrementada uma a uma com o cuidado para não ultrapassar as escalas dos instrumentos de medidas e dos transformadores.

Foram ensaiados dois transformadores mostrados nas Figuras 17, 18 e 19, embora o transformador didático pudesse ser utilizado mais de uma configuração não foi viável realizar. Para os ensaios foram utilizados uma fonte variável CA para manter fixa a tensão de entrada no transformador, dois amperímetros, dois wattímetros e dois voltímetros, onde podemos levantar os dados de entrada e saída, mostrado na Figura 20.

Para realizar o ensaio com carga resistiva, mostrado na Figura 21 e 22 foram utilizadas lâmpadas incandescentes, com potência de 36 W a uma tensão nominal de 220 V as quais foram verificadas o valor de suas resistências a frio, onde aproximou de 98Ω . No ensaio de carga indutiva mostrado na Figura 23 e 24, utilizamos bobinas com núcleo de 900 e 1500 espiras em série com uma lâmpada e um reostato de 300Ω para limitar a corrente e ter mais pontos para ensaiar. Para o ensaio com carga rc e capacitivo utilizamos capacitores de 4 uF disponíveis em uma bancada didática que se encontra na sala de maquinas elétricas mostrado na Figura 25, 26, 27 e 28. Após os ensaios, foi calculado o fator de potência médio para entender melhor o tipo de carga que estava sendo ensaiada.



Figura 17 - Transformador comercial ensaiado.

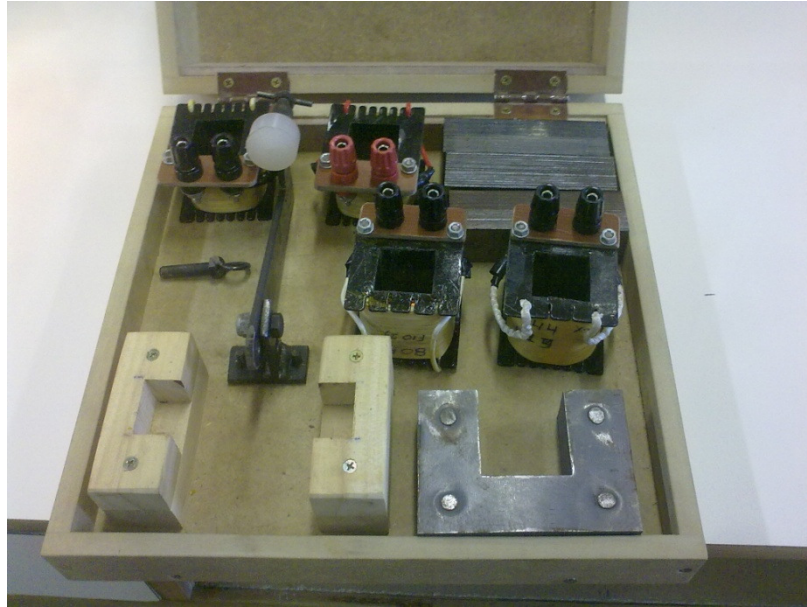


Figura 18 - Transformador didático e suas possíveis configurações.

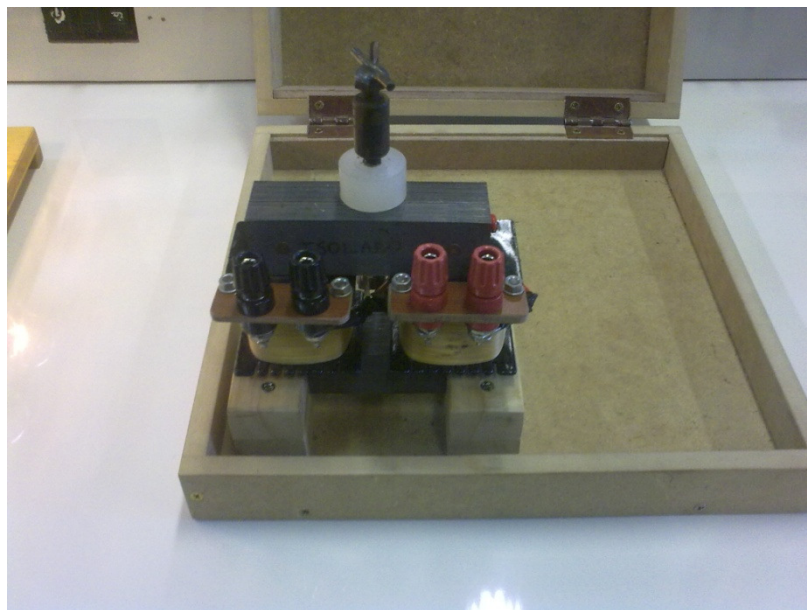


Figura 19 - Transformador didático ensaiado.



Figura 20 - Instrumentos utilizados nos ensaios.

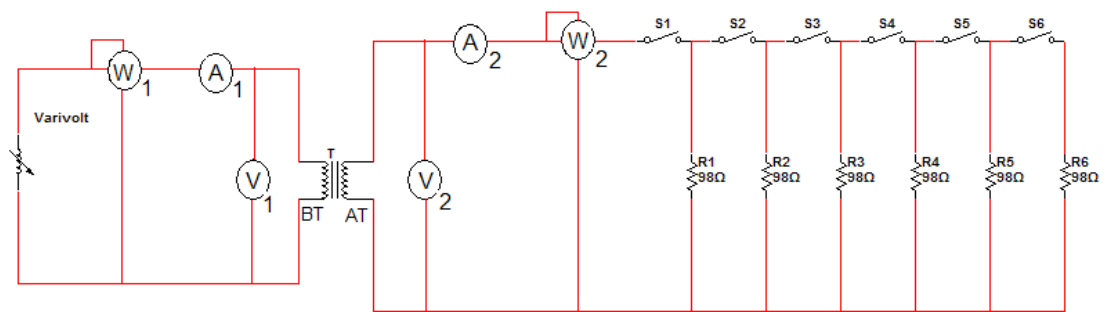


Figura 21 - Esquema elétrico para um ensaio com carga resistiva.



Figura 22 - Carga resistiva ensaiada.

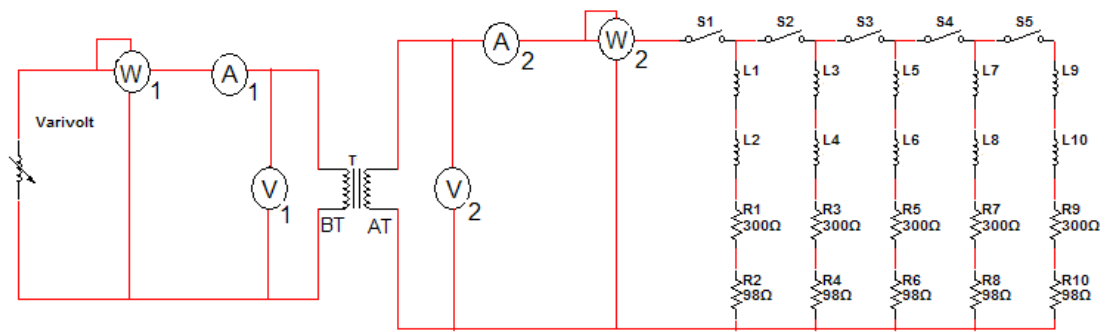


Figura 23 - Esquema elétrico para um ensaio com carga indutivo.

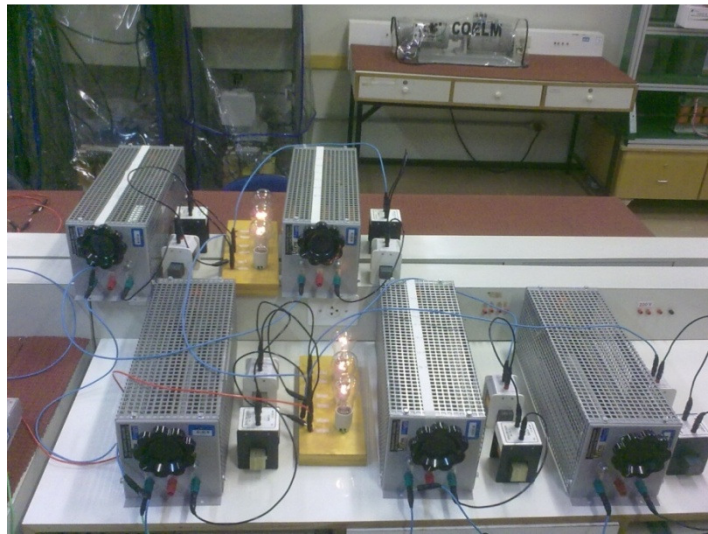


Figura 24 - Carga indutiva ensaiada.

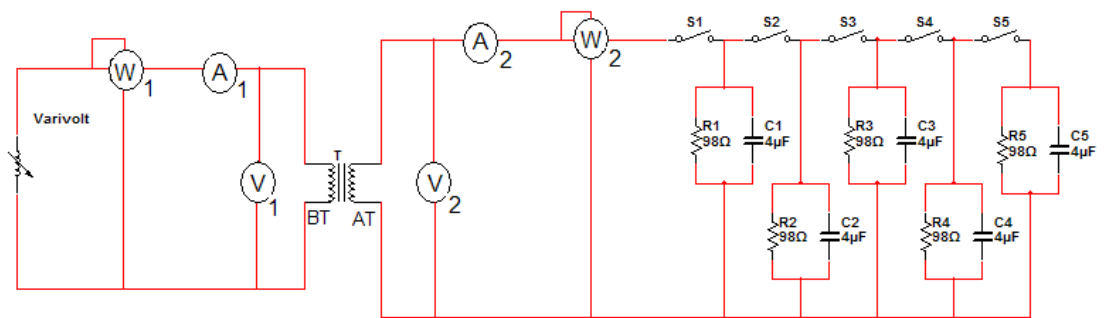


Figura 25 - Esquema elétrico para um ensaio com carga rc.

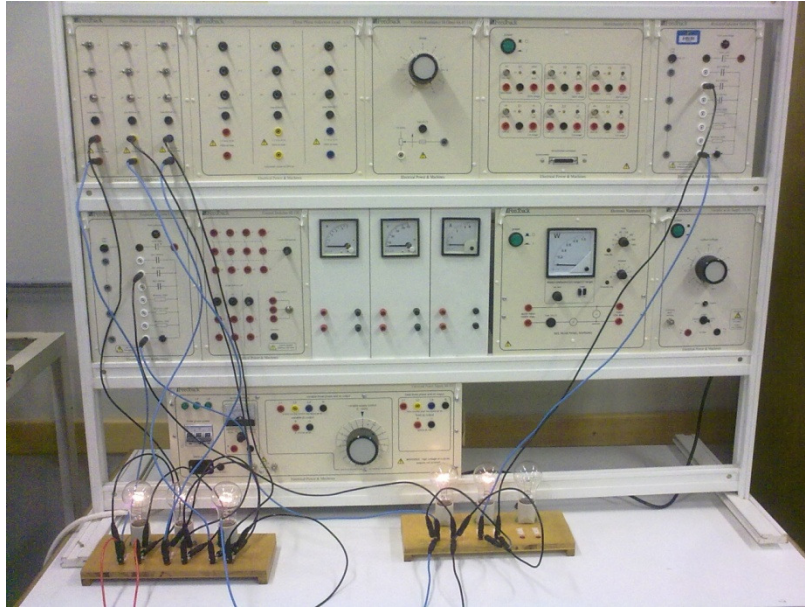


Figura 26 - Carga rc ensaiada.

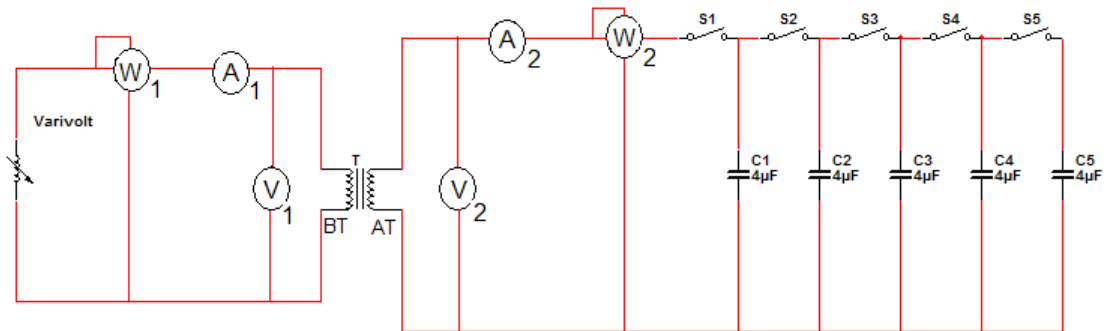


Figura 27 - Esquema elétrico para um ensaio com carga capacitiva.

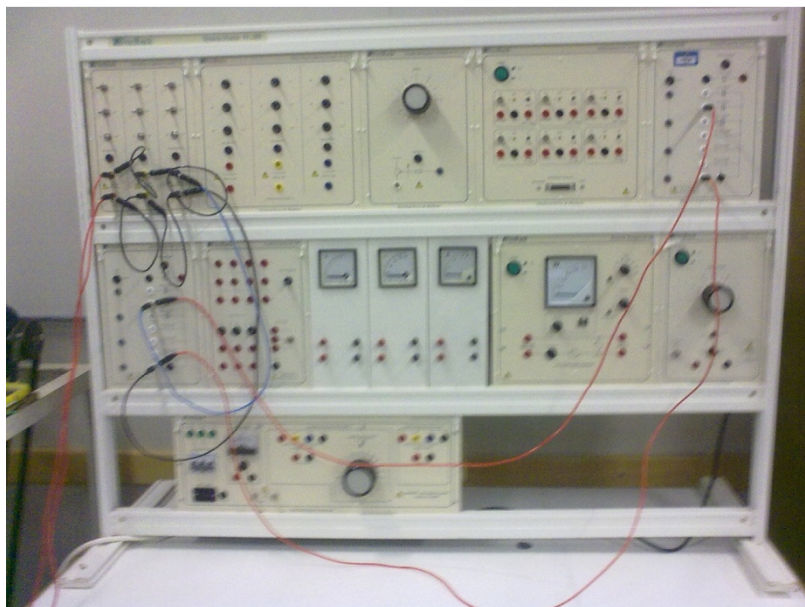


Figura 28 - Carga ensaiada capacitiva.

4 - Resultados

Tabela 2 - Dados de ensaio a vazio

Transformador	V_n	$I_{vz}(A)$	$P_{vz}(W)$
Comercial	50	0,17	3,6
Didático	127	0,63	10

Tabela 3 - Dados de ensaio de curto circuito

Transformador	V_{cc}	$I_{cc}(A)$	$P_{cc}(W)$
Comercial	4,9	0,8	5
Didático	18,8	0,52	4

Tabela 4 - Ensaio com carga resistiva com o transformador comercial.

Carga	Entrada			Saída			S	η	Reg. tensão	FP
	A	V	P1 (W)	A	V	P2 (W)	VA	P2/P1	%	P2/S
0	0,20	50,0	4,0	0,00	125,6	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,41	50,0	19,0	0,14	124,7	14,5	16,83	0,76	0,72	0,86
2	0,74	50,0	34,0	0,24	124,4	29,5	29,86	0,87	0,96	0,99
3	1,00	50,0	48,0	0,33	123,4	44,0	40,72	0,92	1,75	1,08
4	1,30	50,0	60,0	0,48	122,6	55,0	58,85	0,92	2,39	0,93
5	1,60	50,0	75,0	0,60	121,7	70,0	73,02	0,93	3,11	0,96
6	1,80	50,0	90,0	0,72	121,2	82,5	87,26	0,92	3,50	0,95

Tabela 5 - Ensaio com carga indutiva com transformador comercial

Carga	Entrada			Saída			S	η	Reg. Tensão	FP
	A	V	P1 (W)	A	V	P2 (W)	VA	P2/P1	%	P2/S
FP=0,9 em atraso										
0	0,2	50	5,0	0,0	125,5	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00
1	0,4	50	17,0	0,1	124,9	10,5	12,5	0,62	0,48	0,84
2	0,65	50	29,5	0,2	124,3	22,5	24,9	0,76	0,96	0,91
3	0,88	50	41,0	0,3	123,6	34	37,1	0,83	1,51	0,92
4	1,1	50	51,0	0,4	122,9	44	49,2	0,86	2,07	0,90
5	1,35	50	64,0	0,49	122,6	55	60,1	0,86	2,31	0,92

Tabela 6 - Ensaio com carga rc em um transformador comercial.

Carga	Entrada			Saída			S	η	Reg.Tensão	FP
	A	V	P1 (W)	A	V	P2 (W)	VA	P2/P1	%	P2/S
FP=0,57 em adianto										
0	0,18	50	4,5	0	120,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,52	50	21,0	0,22	120,6	17,5	26,53	0,83	0,16	0,58
2	1,0	50	38,0	0,44	119,8	35,5	52,71	0,93	0,82	0,56
3	1,6	50	50,0	0,66	119,3	49,0	78,73	0,98	1,24	0,57
4	2,1	50	69,0	0,87	118,8	65,0	103,35	0,94	1,65	0,55
5	2,6	50	84,0	1,10	118,1	80,0	129,91	0,95	2,23	0,55

Tabela 7 - Ensaio com carga capacitivo em um transformador comercial.

Carga	Entrada			Saída			S	η	Reg.Tensão	FP
	A	V	P1 (W)	A	V	P2 (W)	VA	P2/P1	%	P2/S
FP=0,08 em adianto.										
0	0,18	50	4,0	0,0	120,4	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,34	50	7,0	0,19	120,6	2,3	22,91	0,32	-0,16	0,06
2	0,82	50	9,7	0,38	120,7	4,0	45,86	0,41	-0,24	0,07
3	1,30	50	12,0	0,56	120,8	5,0	67,64	0,41	-0,33	0,08
4	1,70	50	16,0	0,74	121,1	7,5	89,61	0,46	-0,58	0,10
5	2,15	50	20,0	0,92	121,3	9,0	111,59	0,45	-0,74	0,10

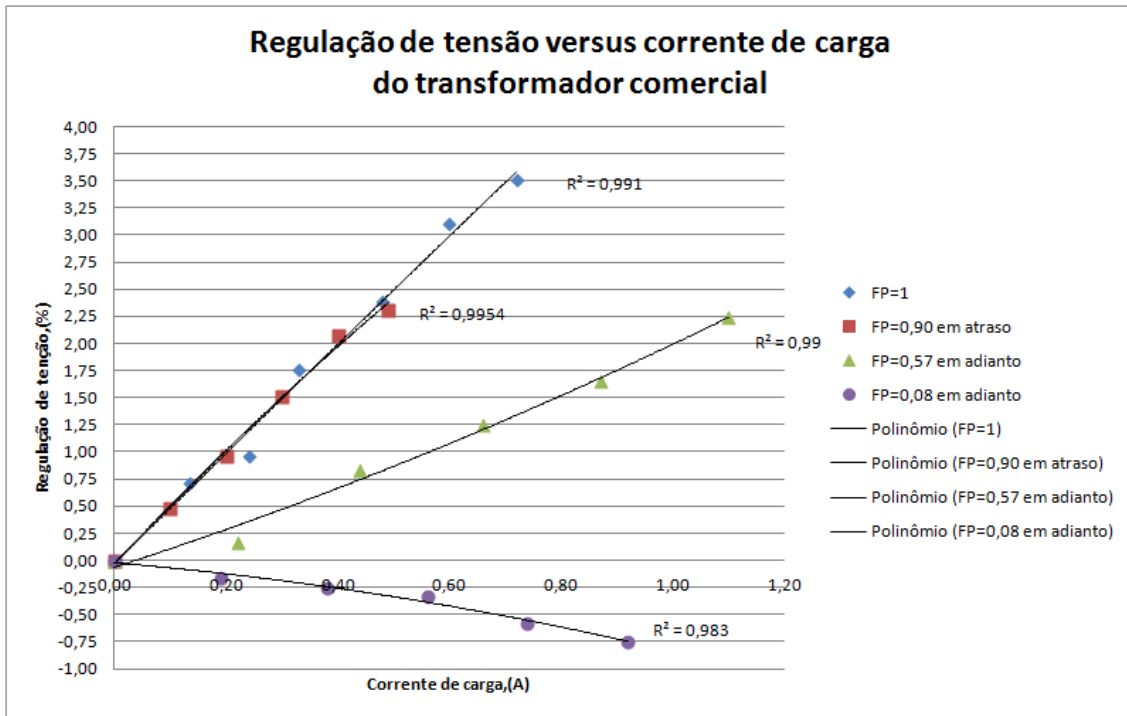


Figura 29 - Gráfico de regulação de tensão de um transformador comercial.

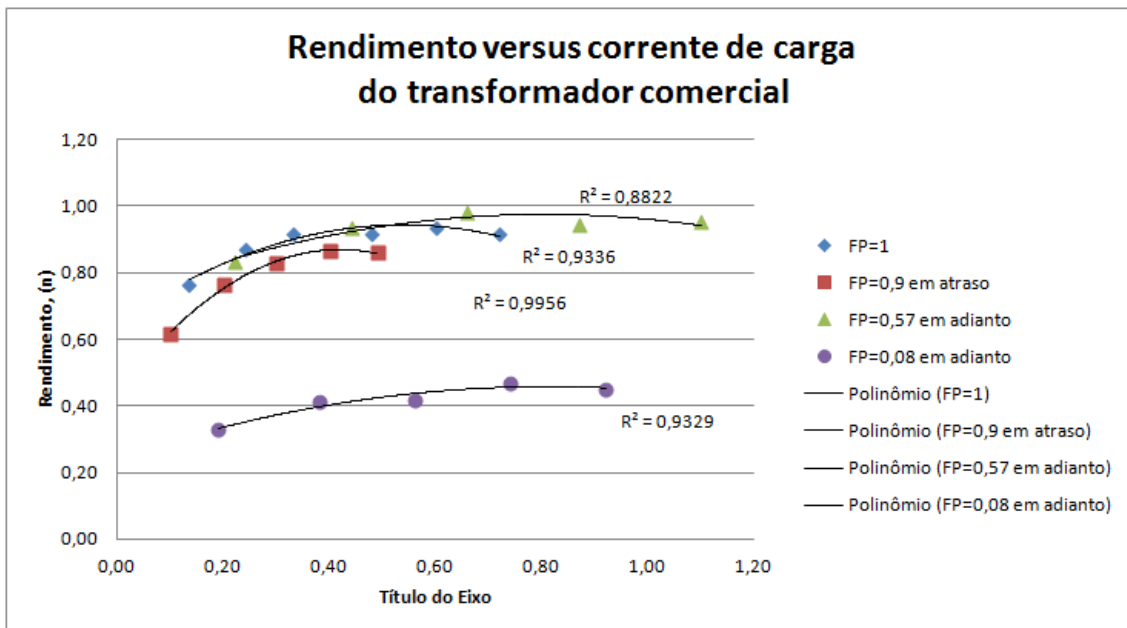


Figura 30 - Gráfico de rendimento de um transformador comercial

Tabela 8 - Ensaio com carga resistiva com o transformador didático.

Carga	Entrada			Saída			S	η	Reg.Tensão	FP
	A	V	P1 (W)	A	V	P2 (W)				
0	0,63	127	10	0	103,7	0	0	0	0	0,00
1	0,69	127,1	21	0,11	103	11	11,33	0,52	0,67	0,97
2	0,72	127	31	0,22	102,1	21,5	22,462	0,69	1,54	0,95
3	0,78	127,2	43	0,32	100,8	31,5	32,256	0,73	2,79	0,97
4	0,84	126,9	53	0,42	98,8	41	41,496	0,77	4,72	0,98
5	0,91	127,1	62	0,52	97,3	50	50,596	0,80	6,17	0,98
6	0,97	127,2	73	0,62	96	60	59,52	0,82	7,42	1,00

Tabela 9 - Ensaio com carga indutiva com um transformador didático.

Carga	Entrada			Saída			S	η	Reg.tensão	FP
	A	V	P1 (W)	A	V	P2 (W)				
0	0,63	127	10,0	0,00	115	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,7	127	21,0	0,11	113,4	10,0	12,02	0,47	1,41	0,83
2	0,74	127,2	31,0	0,20	111,7	20,0	22,34	0,64	2,95	0,89
3	0,79	127,1	41,0	0,28	110,1	30,0	30,82	0,73	4,45	0,97
4	0,85	127,0	51,0	0,39	108,0	39,0	42,12	0,76	6,48	0,92
5	0,91	126,9	60,0	0,49	106,2	48,0	52,03	0,80	8,28	0,92

Tabela 10 - Ensaio com carga rc com um transformador didático.

Carga	Entrada			Saída			S	H	Reg.Tensão	FP
	A	V	P1 (W)	A	V	P2 (W)				
0	0,63	127	10,0	0	115	0	0	0	0	0
1	0,54	127	25,0	0,22	118,3	15,5	26,02	0,62	-2,78	0,59
2	0,49	127,1	44,0	0,46	123,6	35,0	56,85	0,79	-6,95	0,61
3	0,52	127,2	61,0	0,7	128,5	50,0	89,95	0,81	-10,50	0,55
4	0,69	127,2	83,0	0,96	133	70,0	127,68	0,84	-13,53	0,54
5	0,91	127,4	106,0	1,2	136,6	92,5	163,92	0,87	-15,81	0,56

Tabela 11 - Ensaio com carga capacitiva com um transformador didático.

Carga	Entrada			Saída			S	H	Reg.tensão	FP
	A	V	P1 (W)	A	V	P2 (W)	VA	P2/P1	%	P2/S
FP=0,08 em adianto										
0	0,63	127	10	0	115	0	0	0	0	0,00
1	0,49	126,9	11	0,2	119,9	1,5	23,98	0,13	-4,08	0,06
2	0,31	127,2	12	0,4	128,4	4,5	51,36	0,37	-10,43	0,08
3	0,17	127,1	16	0,64	135,1	8	86,46	0,5	-14,87	0,09
4	0,2	127	17	0,87	142,6	10	124,06	0,58	-19,35	0,08
5	0,4	127,2	21	1,15	151	15	173,65	0,71	-23,84	0,08

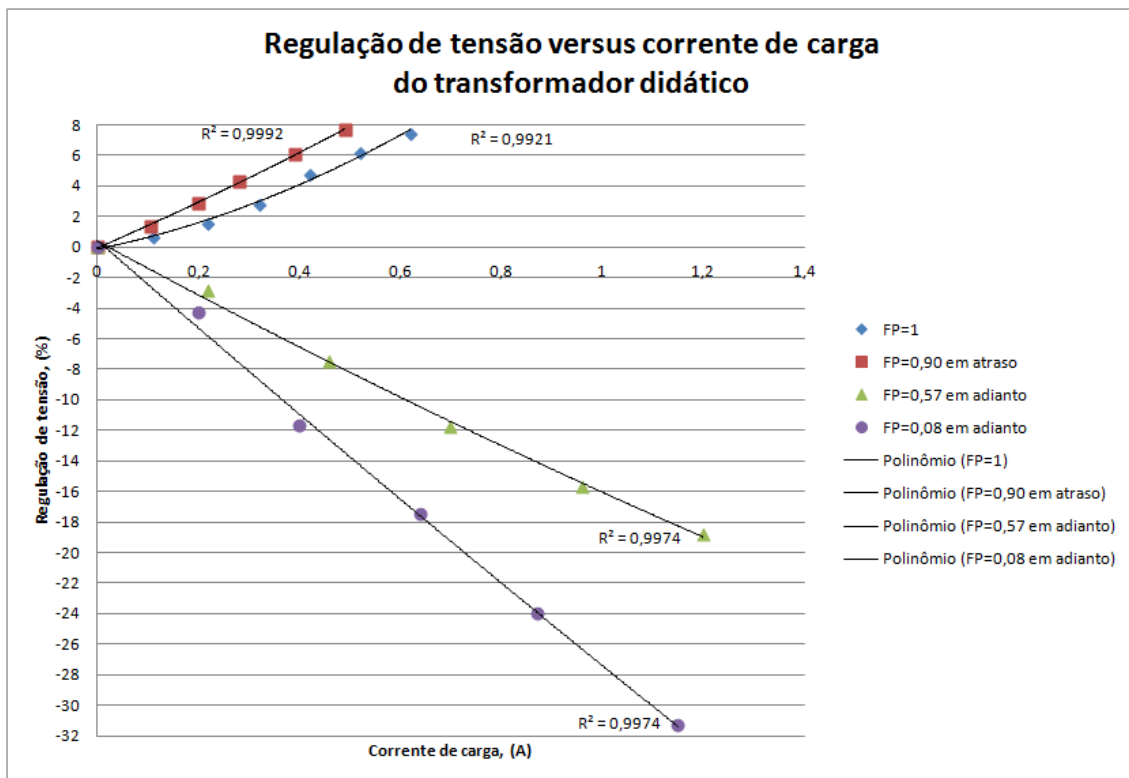


Figura 31 - Gráfico de regulação de tensão de um transformador comercial.

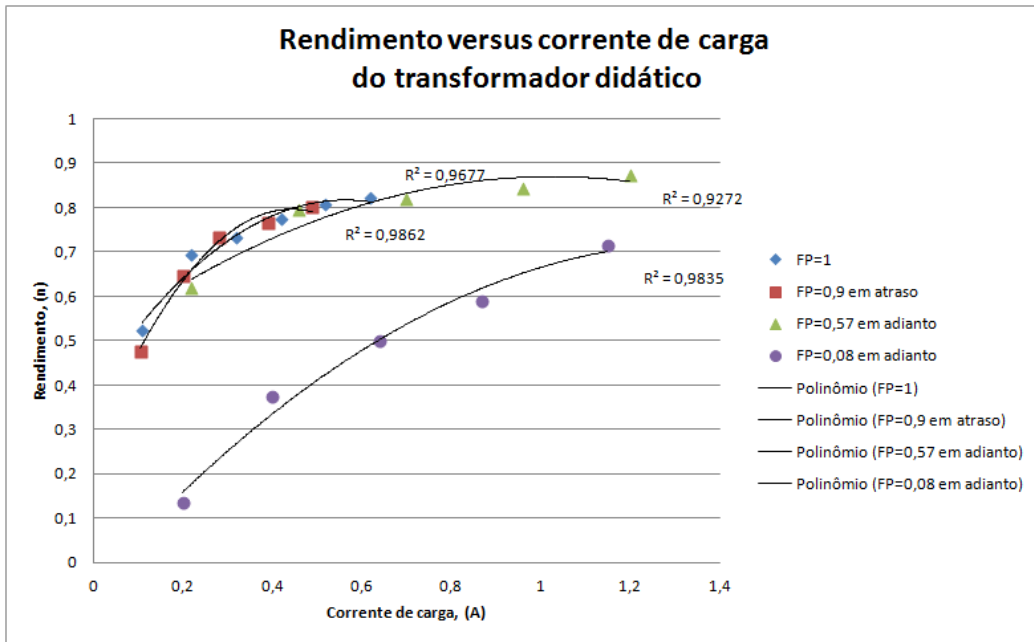


Figura 32 - Gráfico de rendimento de um transformador didático.

Determinação da regulação de tensão por meio de análise do circuito equivalente. Por meio do circuito equivalente foi calculado o valor da regulação de tensão para cada condição de carga de fator de potência unitário, e estes valores foram representados na Figura 33, junto com os valores de regulação de tensão obtidos experimentalmente.

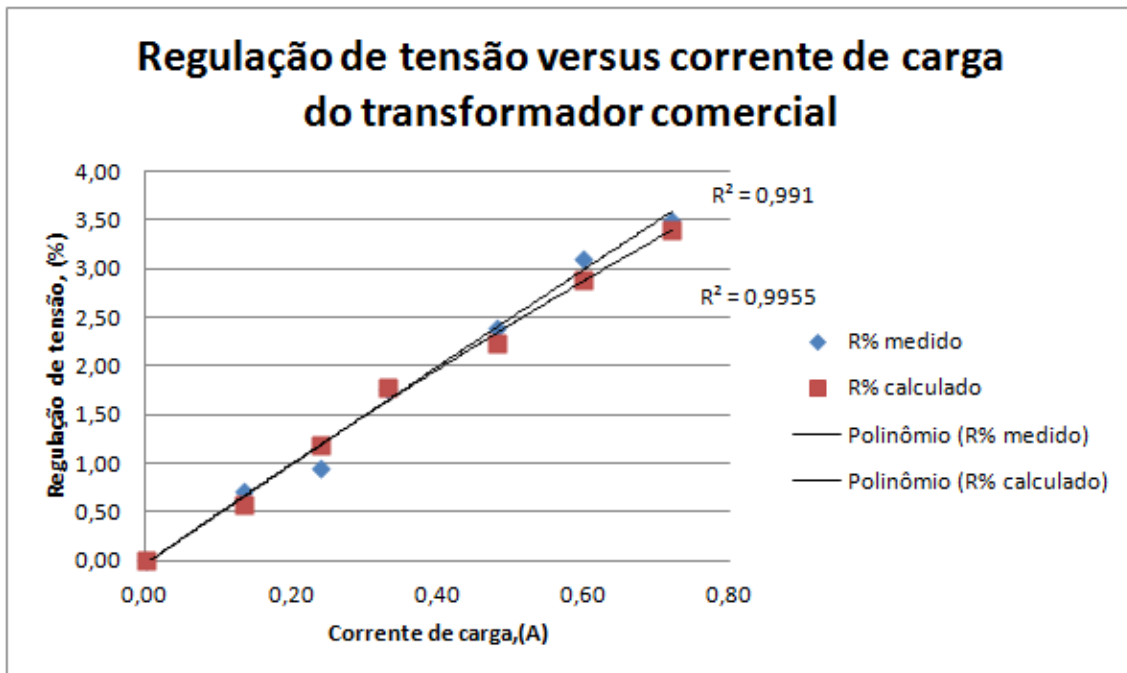


Figura 33 - Gráfico de comparação da regulação de tensão em um transformador comercial.

5 - Discussão e conclusões

A seguir serão discutidos os resultados obtidos nos ensaios dos transformadores comercial e didático.

Regulação de tensão no transformador comercial

O transformador comercial foi carregado com cargas com fator de potência unitário, fator de potência de 0,9 em atraso, fator de potência de 0,57 em adiantado e fator de potência 0,08 em adiantado. Para as duas primeiras cargas a regulação de tensão foi positiva e de igual valor. Para a carga com fator de potência de 0,57 em adiantado, a regulação de tensão ainda se manteve positiva, embora esta tenha sido significativamente menor. Por exemplo, para uma corrente de carga de 0,6 A, a regulação de tensão para carga resistiva pura e para carga de fator de potência 0,9 em atraso, a regulação de tensão foi de aproximadamente 3%, ao passo que a regulação de tensão para fator de potência para 0,57 em adiantado foi pouco maior de 1%. Já para carga praticamente capacitiva pura, observaram-se valores negativos de regulação de tensão para toda faixa de corrente de carga. Por exemplo, para o mesmo valor de corrente de 0,6 A, a regulação de tensão foi de aproximadamente -0,4%.

Regulação de tensão obtida através de análise de circuito equivalente

A determinação da regulação de tensão por meio da análise do circuito equivalente foi realizada apenas para a carga de fator de potência unitário. Da comparação dos destes resultados com aqueles obtidos experimentalmente, conclui-se que o modelo do transformador representa de maneira bastante exata as suas características.

Rendimento do transformador comercial

Para uma referência de corrente no gráfico de 0,4 A, observa-se que o rendimento para a carga de fator de potência unitário, para a carga de fator de potência 0,9 em atraso e para a carga de fator de potência 0,57 em adiantado, o rendimento aproximadamente 90%,

Já para a carga de fator de potência 0,08 em adiantado o rendimento é aproximadamente 40%.

Regulação de tensão no transformador didático

Os ensaios realizados no transformador comercial foram repetidos no transformador didático repetindo cargas com fator de potência unitário, em atraso e em adianto. Para as cargas de fator de potência unitário e fator de potência em atraso a regulação de tensão continuou a apresentar valores positivos, mas superiores em relação àqueles registrados no transformador comercial. Este fato era esperado em virtude reatância de dispersão do transformador didático. Para as cargas em adianto também houve valores negativos de regulação de tensão presentes já para a carga com fator de potência 0,57 em adianto.

Rendimento do transformador didático

Para uma mesma referência de corrente no gráfico de 0,4 A, observa-se que o rendimento para a carga com fator de potência unitário e fator de potência 0,9 em atraso, é aproximadamente dos 80%, e é ligeiramente maior que a carga de fator de potência de 0,57 em adianto, e bem maior que a carga de fator de potência de 0,08 em adianto, o qual é próximo de 38%.

Referências

Kosow, Irving L. 2005, **Máquinas Elétricas e Transformadores**, 15ª Ed. Editora Globo, São Paulo – SP.

Nascimento Junior, Geraldo Carvalho do. 2006, **Máquinas Elétricas: teoria e ensaios**, 1ª Ed. Editora Érica, São Paulo – SP.