



DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSFORMADOR EXPERIMENTAL DIDÁTICO PARA ESTUDOS EM ELETROMAGNETISMO

GABRIEL DE ALMEIDA ARAÚJO
CARLOS A. V. VASCONCELOS JÚNIOR
EDUARD MONTGOMERY MEIRA COSTA

Resumo. No estudo de várias disciplinas em uma graduação nas áreas tecnológicas e de ciências naturais, aulas práticas levam o aluno a um entendimento direcionado à realidade vista na teoria. Alguns simples experimentos mostram claramente como se dá a aplicação prática da física à tecnologia, abrindo caminhos para a criatividade e a realização profissional dos alunos, mostrando como se deve aplicar o conhecimento à sociedade. Este artigo apresenta a estruturação didática do conhecimento de algumas leis do eletromagnetismo na construção de um transformador experimental como forma de compreensão dos fenômenos que regem esse dispositivo tão utilizado no cotidiano.

Palavras-chave: Eletromagnetismo; Transformadores; Energia.

Abstract. In study of several disciplines in a graduation on technological areas and natural sciences, practical lessons take the student to directed comprehension to reality of the theory. Some simple experiments shown clearly as the practical application of physics to technology is translated, opening ways for creativity and professional accomplishment of the students, showing as the knowledge must be applied to society. This paper presents the didactic structure of the knowledge of some laws of the electromagnetism in the experimental transformer development as way of understanding of involved phenomena of this device very used in the daily one.

Key-words. Electromagnetism; Transformers; Energy

1 INTRODUÇÃO

É sabido pelo meio acadêmico que não é simples o estudo de teorias físicas e eletroeletrônicas, devido à difícil visualização de tais fenômenos. Com isso o total entendimento de muitas disciplinas dos cursos de graduação em engenharia, física e ciências afins fica comprometido. Sendo assim, o rendimento do aluno durante a graduação poderá não ser satisfatório. Entretanto, nas disciplinas em que há experimentos e práticas de laboratórios o conteúdo é mais facilmente absorvido. Por isso, é importante a demonstração das teorias relacionadas aos fenômenos que são estudados nos cursos de graduação citados anteriormente, através de aspectos práticos.

Este artigo tem o intuito de mostrar que com experimentos simples o ensino de diversos conteúdos mais bem compreendido pelos alunos, além de estimular a curiosidade por conhecimentos que vão além dos abordados em sala de aula. Um experimento que pode ser facilmente construído e pode ser usado para demonstrar conteúdos de diversas disciplinas, como Eletromagnetismo, Conversão de Energia, Eletrônica Industrial, Circuitos Elétricos, é um transformador com algumas modificações para facilitar a didática nas experiências de laboratório. Antes de ser abordada a construção de tal equipamento e de demonstrar quais as experiências que podem ser executadas com ele, será discutido um pouco sobre as leis que descrevem o funcionamento de um transformador (COSTA, 2005; TORO, 1994).

2 TRANSFORMADOR E LEIS ELETROMAGNÉTICAS

Um transformador (TORO, 1994) é basicamente um circuito eletromagnético composto por dois indutores (solenóides) e geralmente há uma ligação composta de material ferromagnético entre os indutores (COSTA, 2005). A transferência de energia entre os indutores é feita através de uma ligação puramente magnética (COSTA, 2005).

O transformador é um equipamento eletromagnético que envolve muitos conceitos que não são tão simples de ser compreendidos, muito embora sua construção seja simples. Para sua compreensão, inicialmente, será visto um pouco da teoria sobre os indutores e suas relações com os campos magnéticos.

- **Campo magnético em um indutor**

Para obter a intensidade de campo magnético em um indutor pode-se usar a lei

circuito de Ampère devido à simetria que existe em um indutor (COSTA, 2005; HAYT e BUCK, 2003), a qual é:

$$\oint H \cdot dL = I \quad (1)$$

A obtenção dos resultados provém de conceitos básicos de eletromagnetismo. Assim, tem-se que o campo magnético fora do indutor é $H = 0$, enquanto o campo magnético dentro do indutor (no centro da seção transversal do indutor de comprimento infinito) pode ser aproximado satisfatoriamente pela equação:

$$H = \frac{N \cdot I}{d} \quad (2)$$

em que H é a intensidade do campo magnético; N é o número de espiras do indutor; I é a intensidade da corrente elétrica que passa no condutor do indutor e d é o comprimento do indutor (COSTA, 2005).

Como se pode perceber, não há campo magnético fora do indutor. Isso por se considerar que tal indutor possui comprimento infinito. Porém, em indutores reais, o campo magnético fora da espira não é nulo. Quando comparado com o campo magnético interno, pode-se considerar desprezível para a maioria das aplicações. Além de muito menor que o campo interno, o campo externo do indutor não é constante, pois diminui com a distância entre o indutor e um ponto determinado. O campo interno é aproximadamente constante, dependendo apenas do número de espiras, da corrente que circula nelas e do comprimento do indutor. A direção do campo magnético também é constante para todo o comprimento do indutor. Na Figura 1 é mostrado um indutor e o campo magnético resultante de uma corrente I circulando em suas espiras, de acordo com a regra da mão direita (COSTA, 2005; HAYT e BUCK, 2003).

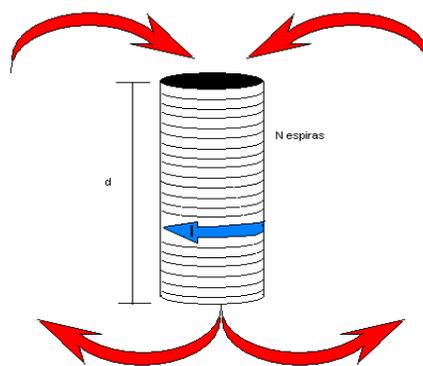


Figura 1. Campo magnético no solenóide

Observa-se pela equação do campo magnético dentro do indutor que a ação que o cria nada mais é do que a passagem da corrente elétrica através das espiras. Quando essa corrente é constante, então, o campo magnético gerado é dito constante ou invariante no tempo.

Não é difícil imaginar que se uma corrente elétrica pode gerar campo magnético, como mostrado anteriormente, o campo magnético também poderia gerar campo elétrico em um circuito, obtendo assim uma corrente elétrica no mesmo. Foi o que Faraday descobriu em 1831, quando fez experimentos com magnetismo. Faraday descobriu que se for colocado um condutor acoplado a um circuito elétrico adequado e este condutor for exposto a um campo magnético variante no tempo, uma tensão é induzida nele (COSTA, 2005; HAYT e BUCK, 2003). Este fenômeno é descrito pela Lei de Faraday, que é dada pela equação:

$$fem = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

em que fem é a tensão induzida no condutor e df/dt é a variação do fluxo magnético no tempo. O sinal negativo da equação vem da Lei de Lenz (COSTA, 2006). A corrente que é gerada na espira por meio do fluxo magnético tem sentido contrário a que a produziu. Isso explica a propriedade do indutor, que impede mudanças rápidas na corrente que circula em suas espiras (JONHSON, HILBURN e JONHSON, 1994).

Se o condutor exposto ao campo variante no tempo for um indutor, deve-se multiplicar o membro direito da igualdade da equação (3) pelo número N de espiras que o indutor apresenta.

Já foi discutido que se pode criar um campo magnético com um indutor, apenas com a passagem de corrente por ele, o que provocaria a geração de um campo magnético no seu interior. Se o indutor não for infinito existe campo no seu exterior. Indutores infinitos não existem, e por isso considera-se o campo externo também. Assim, para criar um campo magnético variante no tempo com um indutor, a corrente circulante deve ser variante no tempo. Por exemplo, uma corrente senoidal. Por outro lado, se esse campo atravessar o núcleo de um segundo indutor, conforme pode ser visto na Figura 2, este apresentará em seus terminais uma fem conforme a equação (3). Com isso, pode-se fazer transferência de energia através da utilização do fluxo magnético gerado pelo primeiro indutor.

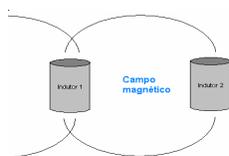


Figura 2. Indutor 1 gerou campo magnético variante no tempo e indutor 2 exposto ao campo.

Embora o campo magnético fora do indutor não seja grande comparado ao campo interno, ele existe (em indutores finitos). E, por conta disso, o segundo indutor está exposto a um campo magnético variante no tempo, transferindo, assim, energia para o circuito conectado a ele. Porém, como o campo magnético externo do conjunto finito de espiras é pequeno comparado com o campo interno, a quantidade de energia transferida para o circuito acoplado é pequena (TORO, 1994). Este princípio é a base do funcionamento de um transformador com baixa eficiência. A eficiência do transformador pode ser melhorada, deslocando o indutor que gera o campo magnético variante no tempo para baixo do indutor que tem o circuito a ser alimentado. Isso proporciona que uma maior quantidade de linhas de campo (densidade de fluxo magnético) passe pelo segundo indutor, que tem o circuito acoplado. Isso aumenta a quantidade de energia transmitida de um indutor para o outro, pois a intensidade do fluxo magnético foi ampliada.

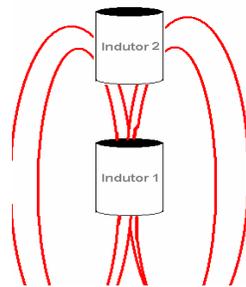


Figura 3. Indutores colocados de forma a melhorar a transferência de energia entre circuitos acoplados, através do ar.

• Transferência de energia através do campo magnético

Foi explicado anteriormente que o campo magnético transfere energia de um indutor para o outro, o que ocorre por meio do fluxo magnético. A relação entre fluxo magnético, campo magnético e potência é mostrada a seguir.

O fluxo magnético é descrito pela equação:

$$\Phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

A relação entre densidade de fluxo e campo magnético é dada por

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (5)$$

em que μ_0 é a permeabilidade do espaço livre. Disto, tem-se que:

$$\Phi = \mu_0 \int_S \vec{H} \cdot d\vec{S} \quad (6)$$

Como se deseja mostrar que existe uma relação entre energia e campo magnético, considera-se a relação entre campo magnético e densidade de fluxo como constante. Assim, o termo μ_0 pode sair da integral e, conseqüentemente,

$$W = \frac{1}{2} \int_{Vol} \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot dv \quad (7)$$

em que W é a energia total armazenada em um campo magnético estacionário. Substituindo a equação (5) na equação (7), tem-se:

$$W = \frac{\mu_0}{2} \int_{Vol} H^2 \cdot dv \quad (8)$$

e se a energia W é a integral de volume do quadrado do campo magnético e o fluxo é a integral de área do campo magnético, resolvendo esta equação em que H e B são constantes em termos do volume, tem-se:

$$W = \frac{\mu_0}{2} H^2 Sd \quad (9)$$

em que S e d são, respectivamente, a área da seção reta do indutor e seu comprimento que multiplicados formam o volume que contém toda a energia do campo magnético (COSTA, 2005). Se for resolvida a equação (3) nas mesmas condições que a anterior, obtém-se então:

$$\phi = \mu_0 HS \quad (10)$$

em que S é a área em que o campo foi integrado. Dessa forma

$$H = \frac{\phi}{\mu_0 S} \quad (11)$$

Se for feita a substituição da equação (11) na equação (9), obtém-se

$$W = \frac{\phi^2}{2S\mu_0} d \quad (12)$$

em que W é a energia do campo magnético interior ao indutor 1, e que se espalha por meio das linhas de fluxo ao redor deste, atravessando o indutor 2.

Considerando-se que nem todo o fluxo que sai do indutor 1 atravessa o indutor 2, então, a energia que vai induzir *fem* no indutor 2, e que foi transferida pelo indutor 1 através do fluxo magnético, é uma fração da energia do indutor 1. Assim, a equação da energia no indutor 2 torna-se:

$$W_2 = \frac{\Delta\phi^2}{2S\mu_0} d \quad (13)$$

Quando a fração do fluxo magnético gerado pelo indutor 1 atravessa o

indutor 2 provoca uma tensão nos seus terminais, é consequência da energia transferida através do fluxo magnético, cuja tensão (fem) é dada pela Lei de Faraday (COSTA, 2006; HAYT e BUCK, 2003).

$$fem = -\frac{d(\Delta\phi)}{dt} \quad (14)$$

A té aqui, os indutores que foram considerados tem números de espiras iguais. Dessa forma, esse equipamento não tem muitas utilidades industriais, sendo usado geralmente para casamento de impedâncias entre dois circuitos, ou apenas para acoplar circuitos elétricos, magneticamente. O equipamento torna-se muito mais interessante quando os números de espiras dos indutores 1 e 2 são diferentes. Com isso, podem-se mudar características do sinal elétrico que é induzido no indutor 2 (secundário). A potência e energia transferidas são as mesmas, e com isso se pode alterar a amplitude da tensão em detrimento da corrente, ou a corrente em detrimento da tensão (TORO, 1994; JONHSON, HILBURN e JONHSON, 1994). Um equipamento que pode alterar tais características de um sinal elétrico se torna muito importante para a tecnologia como um todo.

Se for considerado que não há perdas de fluxo magnético entre os indutores 1 e 2, ou seja, não há perdas no equipamento em questão (transformador), e que seus diâmetros são iguais, obtêm-se as seguintes expressões:

$$\phi = \Delta\phi \quad (15)$$

$$\phi = \mu_0 HS \quad (16)$$

$$H = \frac{NI}{d} \quad (17)$$

Logo, tem-se que:

$$\mu_0 S \frac{N_1 I_1}{d} = \mu_0 S \frac{N_2 I_2}{d} \quad (18)$$

e conseqüentemente,

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (19)$$

Pode parecer incoerente utilizar em um transformador a equação do campo magnético do solenóide infinito, mas se for utilizado como meio de passagem do fluxo magnético um material que tenha alta permeabilidade magnética, essa

aproximação se torna bem razoável, pois a dispersão do campo nas bordas do solenóide se torna bem mais tênue. Com isso, fica muito semelhante à dispersão de campo do solenóide infinito. Os núcleos dos transformadores serão abordados mais adiante.

A partir da equação (19) é possível encontrar as equações que mostram a relação de espiras com a tensão e com as impedâncias vistas no primário e no secundário do transformador. Para isso basta substituir na equação (19) o equivalente de corrente da Lei de Ohm.

O transformador ideal transferiria toda a energia que entra na primeira bobina para a segunda, que por sua vez alimentaria o circuito, sem perdas. Mas nos transformadores reais as perdas existem, podendo ser aceitáveis. O problema do equipamento que foi descrito anteriormente é que ele usa, como meio para o fluxo magnético trafegar, o ar.

Com o campo magnético, assim como no campo elétrico, existem materiais que podem conduzir melhor o fluxo magnético. A esta propriedade do material dá-se o nome de permeabilidade magnética do material, que se apresenta sempre com um valor maior que o valor da permeabilidade do espaço livre. Esta relação é definida por meio da permeabilidade relativa do material, dada por μ_r , em que, em todas as equações descritas anteriormente, esse valor deve substituir a permeabilidade do espaço livre. A utilização de um material magnético garante o direcionamento do fluxo, realizando as condições definidas (COSTA, 2005; HAYT e BUCK, 2003).

3 MATERIAIS MAGNÉTICOS

Antes de se comentar a respeito dos tipos de materiais magnéticos e suas propriedades, é interessante que se saiba da onde vem a boa ou má permeabilidade de cada material magnético.

Sabe-se que uma carga em movimento, ou seja, corrente elétrica, gera campo magnético. Então se um elétron gira em torno do núcleo de um átomo, é como se existisse uma espira com corrente elétrica passando por ela. E isso geraria um campo magnético no centro da espira. É claro que os efeitos quânticos e relativísticos têm que ser considerados quando se fala de elétrons e átomos, mas a física clássica é suficiente para explicar a origem das propriedades magnéticas didaticamente. A maioria dos materiais não é composta de apenas um núcleo com um elétron e, portanto, os campos de cada elétron de um átomo vão influenciar no



campo magnético que ele vai ter como partícula. Se o material for composto basicamente por moléculas que contêm mais de um átomo, essas partículas também vão ter o momento magnético relativo a ela como molécula. Esses momentos magnéticos das partículas que compõem um material podem ou não ser nulos (COSTA, 2005; HAYT e BUCK, 2003).

É a partir da intensidade do momento magnético das moléculas e da organização do cristal do material em questão que aparecem as propriedades magnéticas dos materiais. Entre as existentes, a seguir, são mostrados os principais materiais na utilização de construção de transformadores, que são os materiais ferromagnéticos e os materiais ferrimagnéticos. Existem outros tipos de materiais magnéticos, mas suas aplicações e características não são de muita importância para o desenvolvimento ou o entendimento do trabalho e suas experiências. Os transformadores geralmente usam materiais ferromagnéticos para a construção do seu núcleo (COSTA, 2005; TORO, 1994; HAYT e BUCK, 2003).

• **Materiais ferromagnéticos**

Nesse tipo de material, além de seus átomos terem momentos magnéticos fortes, ocorre também outro fenômeno magnético em seu interior. Existem áreas internas que estão praticamente com o mesmo alinhamento. A esta área com o mesmo alinhamento, denomina-se domínio. Porém, podem existir vários domínios não-alinhados entre si, e com isso o momento magnético médio do material provavelmente é nulo quando o material não apresenta história magnética anterior (aplicação de campo magnético externo anteriormente).

Quando se aplica um campo magnético externo em tal material, os domínios tendem a se alinhar e aumentar muito o campo magnético no interior do material ferromagnético.

Após a retirada do campo externo, o material não voltará ao seu estado anterior, magneticamente falando. Interiormente houve uma reorganização dos domínios, o alinhamento de muitos deles faz com que haja entre tais domínios uma ligação magnética, assim como dois ímãs que se atraem. Por conta disso, o material continua a apresentar efeitos magnéticos por um tempo, mesmo depois de retirado o campo magnético externo.

• **Materiais Ferrimagnéticos**

Os materiais dessa classe são vulgarmente designados por ferrites, encontrando-se entre os mais comuns as ferrites de níquel, cobalto e manganês, magnésio.

Apesar de em geral apresentarem permeabilidades relativas inferiores aos materiais ferromagnéticos, as ferrites distinguem-se pela baixíssima condutividade elétrica, que lhes permite reduzir significativamente as perdas por efeito Joule associadas às correntes parasitas de Foucault. Esses materiais são mais utilizados em transformadores para altas frequências, como radiofrequência, flyback em televisores, etc.

• Núcleo do transformador

O núcleo do transformador é composto de material ferromagnético e leva o campo magnético do indutor primário até o indutor secundário. Como o fluxo magnético dentro de um material ferromagnético sofre pouca perda, o indutor secundário recebe o fluxo magnético ainda com valor alto, e com isso a transferência de energia para o circuito acoplado nele é bastante eficiente. Para que o fluxo magnético trafegue através do material ferromagnético, é necessário que exista entre os dois indutores um circuito magnético fechado, ou seja, um caminho fechado por onde o fluxo possa passar sem encontrar uma área de permeabilidade magnética baixa. Caso isso ocorra, a densidade de fluxo magnético sofre perdas, assim como em um circuito elétrico quando a corrente encontra uma resistência. Pode-se comparar a bateria de um circuito elétrico ao indutor gerador de campo em um circuito magnético (COSTA, 2005).

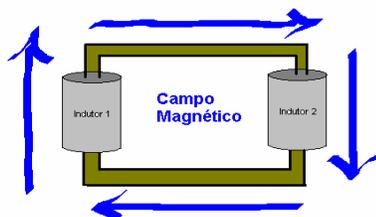


Figura 4. Transferência de energia através do núcleo ferromagnético.

• Circuitos magnéticos

Os circuitos magnéticos são como os circuitos elétricos convencionais, porém têm características próprias, como a não-linearidade dos materiais ferromagnéticos, conforme se pode ver na Figura 5. Cada fenômeno elétrico de um circuito tem uma semelhança com algo de um circuito magnético. Por exemplo, a corrente elétrica pode ser comparada ao fluxo magnético, que são as linhas do campo magnético

que passa em uma dada seção transversal do material usado para transportar o campo magnético. Dentro do material ferromagnético que vai guiar o campo até onde é desejado, o campo magnético pode ser aumentado apenas elevando a corrente que passa pelo indutor gerador de campo. Entretanto a quantidade de linhas de campo ou densidade de fluxo que passa pelo material ferromagnético não tem uma resposta linear como o campo magnético, já que a quantidade de domínios que existem internamente no material é limitada (COSTA, 2005).

Outro elemento elétrico que apresenta uma similaridade nos circuitos magnéticos é a resistência, que nos circuitos elétricos tem a propriedade de impedir a passagem da corrente. No caso do circuito magnético, encontra-se a denominada relutância que impede a passagem do fluxo magnético. Entretanto, percebe-se que a relutância de um material ferromagnético é não-linear que a resistência do circuito **[parece incompleto o sentido]** elétrico. Mas existe um ponto ideal onde se pode variar o valor do campo magnético do indutor gerador de campo, sem estar aumentando o fluxo de linhas de campo dentro do material, da mesma forma que se utilizam as resistências nos circuitos elétricos. A consequência disso é que o circuito que está acoplado a um segundo indutor que está recebendo energia, não irá receber um incremento de energia embora se esteja gastando mais para que a mesma quantidade de potência chegue ao destino escolhido. Isso ocorre quando o material ferromagnético está magneticamente saturado (COSTA, 2005).

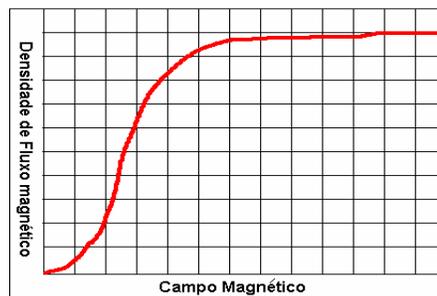


Figura 5. Curva de magnetização de aço, mostrando que, embora o valor do campo magnético suba, o valor da densidade de fluxo se torna aproximadamente constante.

4 CONSTRUÇÃO DO TRANSFORMADOR EXPERIMENTAL

A construção do transformador experimental é bem simples e utiliza materiais com custo baixo, como:

- placa de madeira de 40cm x 40cm;
- dois pedaços de cano de PVC de meia polegada;
- fio de cobre esmaltado;
- fita isolante;
- solda para componentes eletrônicos;
- um transformador pequeno;
- arame;
- quatro pedaços de vergalhão de aço.

Enrola-se aproximadamente 600 espiras de fio de cobre esmaltado em cada um dos pedaços de cano de PVC cobertos com fita isolante. O número de espiras foi de algumas centenas para que o campo magnético dentro do solenóide seja suficientemente grande e com isso o fluxo magnético também seria grande e suficiente para transferir a maior quantidade de energia possível.

O transformador pequeno listado nos materiais deve ser ligado à rede elétrica, e também em um dos indutores anteriormente construídos. Esse transformador pequeno serve apenas para adaptar a tensão senoidal da rede elétrica para 6V ou 12V, para que o transformador experimental não seja danificado com a elevada tensão da rede elétrica (por causa de sua baixa resistência), e por questões de segurança na sua operação.

O transformador pequeno e o indutor ligado a ele devem ser fixados na placa de madeira que foi listada no material utilizado. O outro indutor que foi construído deve ser deixado livre de amarras com a placa, para que tenha movimentação.

Deve-se fixar um pedaço de vergalhão, no interior de cada tubo de PVC que compõe os indutores. Assim, os pedaços de ferro farão o papel de núcleo do transformador quando o circuito magnético for fechado.

No indutor que ficou sem fixação na placa, deve-se fazer uma pequena esfera com solda, para que se possam ligar equipamentos de medida. Lembrando que, como o fio é esmaltado, deve-se raspar o esmalte do fio antes de colocar a solda quente.

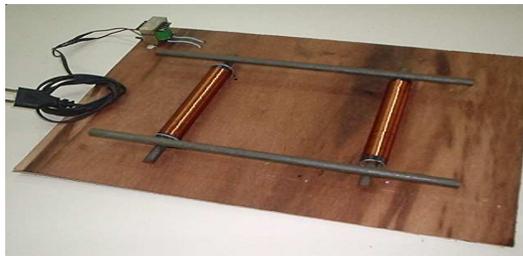


Figura 6. Foto do transformador experimental construído



• Funcionamento e experimentos

O indutor que não está fixado na placa de madeira deve ser ligado a um osciloscópio, e o transformador ligado na rede elétrica.

No osciloscópio deve aparecer uma tensão senoidal de aproximadamente 60 Hz que diminui sua amplitude com o aumento da distância entre os dois indutores. Os dois pedaços de ferro que sobraram da construção do transformador devem ser usados para fechar o circuito magnético, assim como mostrado na Figura 6. Quando o circuito magnético é fechado, pode-se notar um aumento significativo da tensão no osciloscópio, o que comprova a teoria descrita.

Muitos experimentos podem ser feitos com o equipamento que foi construído, e certamente podem ilustrar aulas práticas do conteúdo de eletromagnetismo, como:

- cálculo da indutância do secundário;
- cálculo da indutância do secundário com distâncias diferentes;
- cálculo da energia perdida por magnetização de objetos próximos ao transformador;
- cálculo das perdas relacionadas com o núcleo e com os condutores;
- cálculo da permeabilidade do material usado como núcleo.



5 CONCLUSÕES



O escopo deste trabalho foi tratar o transformador como uma máquina didática para demonstrar algumas leis que regem o eletromagnetismo, e por isso nem todas as leis, teorias e equações que tratam o transformador como dispositivo elétrico foram apresentadas. O transformador é uma máquina de funcionamento complexo e, por conta disso, muitas disciplinas abordam o tema com diferentes óticas. Mas o transformador é essencialmente uma máquina eletromagnética, e seu funcionamento básico foi demonstrado aqui. Com isso pode-se observar a importância da construção de equipamentos didáticos que tornem o conhecimento teórico uma realização prática aos que lidam com a tecnologia no seu dia-a-dia. Muitos outros equipamentos desse tipo podem ser construídos com a mesma facilidade, e também podem vir a servir para ilustrar outros conteúdos de eletromagnetismo que não foram abordados neste trabalho.





REFERÊNCIAS

COSTA, E.M.M., **Eletromagnetismo: Eletrostática e Magnetostática**. Ed. Alta BOOKS, Rio de Janeiro, 2005.

COSTA, E.M.M., **Eletromagnetismo: Campos Dinâmicos**. Ed. Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2006.

TORO, V.D., **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1994.

HAYT, W.H. e BUCK, J.A., **Eletromagnetismo**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2003, 6. Ed.

JONHSON, D.E., HILBURN, J.L. e JONHSON, J.R., **Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos**. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1994, 4. Ed.

