

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ELETROMECÂNICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA

DISCIPLINA: TRANSFORMADORES

# **Fundamentos sobre Transformadores**

*Autor:* Renan Birck Pinheiro <renan.ee.ufsm@gmail.com>.

Santa Maria, 28 de Outubro de 2012.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Lei de Faraday</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Lei de Lenz</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Lei de Ampère</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Força eletro-motriz e força contra-eletro-motriz (FEM, FCEM)</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Circuitos Magnéticos</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Indutância Mútua e Auto-Indutância</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>10</b>

# Introdução

Transformadores são dispositivos constituídos por dois ou mais enrolamentos acoplados por um núcleo comum. São dispositivos empregados em fontes de alimentação e outros dispositivos nos quais se faça necessário reduzir ou elevar correntes alternadas; no sistema de potência, são usados tanto para elevação quanto redução de tensões, e em diversos fins na eletrônica: isolamento, casamento de impedâncias e remoção de componentes contínuas.

Para o entendimento do seu funcionamento são necessários conceitos fundamentais de eletromagnetismo, a serem revisados no presente trabalho.

# Capítulo 1

## Lei de Faraday

O físico Michael Faraday constatou que a variação temporal do fluxo magnético  $\Phi$  sobre um condutor induz o aparecimento de uma força eletromotriz entre os extremos desse condutor. Isso levou ao enunciado da lei de indução de Faraday:

Campos magnéticos podem produzir corrente elétrica em um laço fechado, porém apenas se o fluxo magnético na superfície deste for variante no tempo. [2]

o que matematicamente resulta na expressão

$$V_{fem} = -N \frac{d\Phi}{dt} = \oint_C \vec{E} dl \quad (1.1)$$

Equação 1.1: Formulação matemática da lei de Faraday.

Onde  $\vec{E}$  corresponde ao campo elétrico. A unidade de medida da  $V_{fem}$  é o volt. A mesma expressão 1.1 pode ser expressa na forma diferencial:

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.2)$$

Equação 1.2: A lei de Faraday expressa na forma diferencial.

na qual  $\vec{B}$  representa o vetor densidade de fluxo magnético, expresso em tesla ( $T$ ). Esta lei pode ser considerada a base do funcionamento dos transformadores e geradores, por quantificar a indução eletromagnética.

## Capítulo 2

# Lei de Lenz

*Em todos os casos de indução eletromagnética, uma FEM induzida fará com que a corrente circule em um circuito fechado, num sentido tal que seu efeito magnético se oponha à variação que a produziu. [3]*

Descoberta pelo físico *Heinrich Friedrich Emil Lenz*, esta lei define que a corrente induzida  $i$  em um circuito ocorre numa direção oposta à variação do fluxo magnético  $\Phi(t)$  que a produziu. [2] Esta justifica o sinal negativo encontrado nas 1.1 e 1.2. Esta conclusão não é mais do que um efeito da *ação e reação*, e dela resulta a indutância [3].

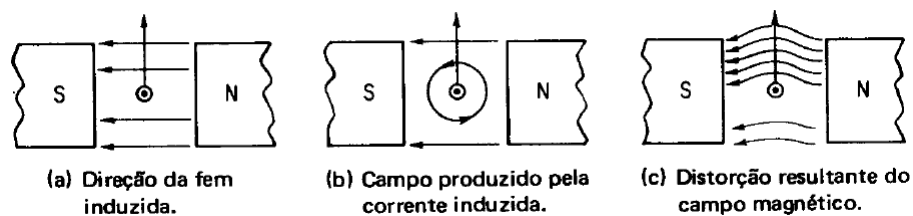


Figura 2.1: Ilustração da lei de Lenz. [3]

## Capítulo 3

# Lei de Ampère

André Marie Ampère estabeleceu uma relação matemática entre corrente elétrica e campo magnético, por meio de uma lei que leva seu nome. Tal pode ser expressada por

$$\oint_C \vec{B} dl = \mu_0 i \quad (3.1)$$

Equação 3.1: A lei de Ampère.

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do espaço livre  $= 4\pi \times 10^{-7} H/M$ . Ela equivale a dizer que a integral de linha em um caminho fechado da densidade de fluxo, é proporcional à corrente que atravessa a superfície limitada pelo caminho de integração.

## Capítulo 4

# Força eletro-motriz e força contra-eletro-motriz (FEM, FCEM)

Seja um transformador com o secundário em aberto sendo alimentado por uma  $v_1$  no primário:

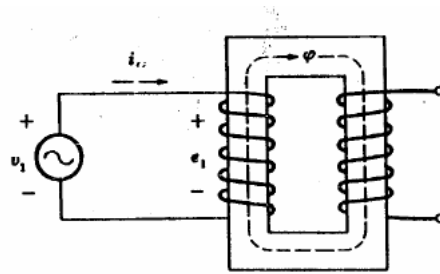


Figura 4.1: Transformador em aberto. [1]

Em regime permanente, fluirá a corrente de excitação, a qual provoca um fluxo magnético alternado  $\phi_1$  no núcleo. Por consequência da lei de Faraday expressa em 1.1, será induzida uma força magnetomotriz nos terminais do secundário, igual a

$$FEM_2 = N_2 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (4.1)$$

Mas o primário estará sujeito ao fluxo magnético gerado por ele mesmo, e por consequência a uma FEM. Como pela lei de Lenz a polaridade desta FEM será oposta à da sua causa, convencionou chamá-la de **força contra-eletro-motriz** (FCEM). A soma da FCEM com a queda de tensão no primário deverá ser igual à tensão  $v_1$  aplicada, ou seja,  $v_1 = R_1 i_\phi + FCEM$ .

## Capítulo 5

# Circuitos Magnéticos

Circuitos magnéticos são dispositivos utilizados para concentrar o efeito magnético de uma corrente em uma região particular do espaço. Fazendo uma analogia com os circuitos elétricos, temos que [6]:

	Circuito Elétrico	Circuito Magnético.
Uma fonte de ...	FEM (V)	FMM (ampère-espira)
... produz ...	corrente (A)	fluxo (Wb)
... que é limitada pela	resistência ( $\Omega$ )	relutância ( $\frac{1}{H}$ )

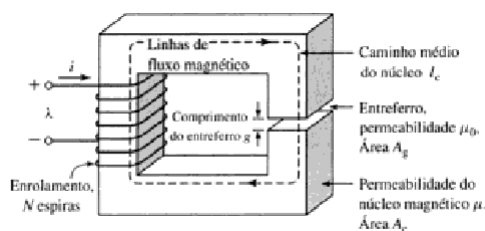


Figura 5.1: Circuito magnético simples com um entreferro (*gap*). [1]

e em um circuito magnético o fluxo total é calculável por

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_{total}} \quad (5.1)$$

Equação 5.1: Relação entre fluxo, FMM (dada por  $Ni$ ) e relutância.

Define-se relutância em termos da expressão 5.1, como a oposição do material à passagem do fluxo, isto é,  $\mathcal{R} = \frac{FMM}{\Phi}$ . Para um material qualquer, esta também pode ser escrita como



$$\mathcal{R} = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (5.2)$$

Equação 5.2: Definição de relutância para um material de comprimento  $l_c$ , área  $A_c$  e permeabilidade  $\mu$ .

Em muitas situações práticas a relutância do núcleo é desprezível devido ao seu baixíssimo valor perante a relutância do entreferro. No caso do circuito da figura anterior, o cálculo do fluxo ficaria

$$\Phi = \frac{Ni\mu A_g}{g} \quad (5.3)$$

Equação 5.3: Fluxo para o circuito magnético mais simples possível.

## Capítulo 6

# Indutância Mútua e Auto-Indutância

Em um circuito magnético, a relação entre o fluxo  $\phi$  e a corrente elétrica  $i$  geradora será linear, dada pela expressão

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (6.1)$$

Equação 6.1: Relação entre o fluxo e corrente elétrica no circuito magnético

na qual  $\lambda$  é o fluxo concatenado por um conjunto de  $N$  espiras ( $\lambda = N\phi$ ). A essa relação dá-se o nome de **indutância**, expressa em Henries (H).

Presumindo que os materiais magnéticos sejam lineares, pode-se demonstrar (omitido aqui devido à extensão), como feito em [1], que a mesma relação da expressão 6.1 pode ser expressa em função do número de espiras e da relutância ( $\mathcal{R}$ ), ou seja:

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (6.2)$$

Equação 6.2: 6.1 em termos da relutância e do número de espiras.

Um caso especial é quando há duas ou mais bobinas no mesmo circuito: temos a auto-indutância (provocada pela variação do campo da própria bobina) de cada bobina e a indutância mútua (provocada na outra bobina pelo campo de uma bobina). Pode-se demonstrar que a indutância entre um par de bobinas  $X$  e  $Y$ , enroladas em um núcleo de relutância desprezível, será dada por

$$L_{xy} = N_x N_y \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (6.3)$$

Equação 6.3: Expressão da indutância entre duas bobinas. Se  $X = Y$ , ela se refere à autoindutância

## **Capítulo 7**

## **Conclusão**

No presente trabalho foi possível revisar alguns dos conceitos do eletromagnetismo, como as leis de Faraday, Lenz e Ampère, a indutância mútua e os circuitos magnéticos, necessários para o estudo dos transformadores e verificar como eles se aplicam nestes dispositivos.

# Bibliografia

- [1] FITZGERALD, A.E. KINGSLEY, C. Jr. UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [2] ULABY, F. T. **Eletromagnetismo para Engenheiros**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [3] KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 10ª Edição. São Paulo: Globo, 1994.
- [4] ASSUNÇÃO, J. T. **Circuitos Magnéticos**. Disponível em <http://www.ppgel.net.br/nepomuceno/ensino/eletromagnetismo/CirMag.pdf>. Acessado em 21/10/2012.
- [5] MACEDO, M. MACEDO. C. **Indutância**. Disponível em [http://www.fisica.ufs.br/apostilas/Fisica\\_B\\_Aula\\_10.PDF](http://www.fisica.ufs.br/apostilas/Fisica_B_Aula_10.PDF). Acessado em 22/10/2012.
- [6] WENTWORTH, S. M. **Eletromagnetismo Aplicado**. Porto Alegre: Bookman, 2007.