

UF *m* G

Parte III: Circuitos Magnéticos



Revisão de Circuitos Magnéticos

- Leis do Eletromagnetismo

$v(t) \xrightarrow{\text{Lei de Faraday}} \Phi(t), B(t)$
 $\downarrow \text{Características do núcleo}$
 $\mathcal{F}(t), H(t) \xleftarrow{\text{Lei de Ampère}} i(t)$

Elementos
elétricos

Elementos
magnéticos

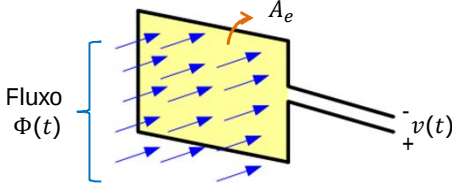
OBS: As leis de kirchhoff são simplificações das leis de gauss!

2



Revisão de Circuitos Magnéticos

- Lei de Faraday-Lenz**



- Assumindo uma distribuição de fluxo uniforme:

$$\Phi(t) = B(t)A_e$$

- Logo:

$$v(t) = NA_e \frac{dB(t)}{dt}$$

- Uma bobina exposta a um fluxo magnético variável apresenta uma tensão induzida em seus terminais dada por

$$v(t) = N \frac{d\Phi}{dt}$$

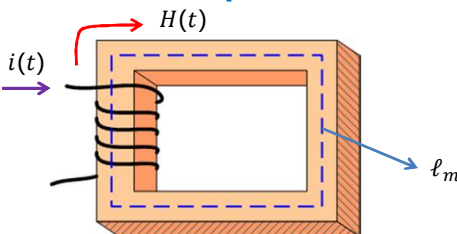
- A polaridade da tensão será aquela que se opõe à variação do fluxo;

3



Revisão de Circuitos Magnéticos

- Lei de Ampère**



- Assumindo uma distribuição uniforme do campo magnético ao longo de um caminho médio:

$$\mathcal{F}(t) = H(t)\ell_m = Ni(t)$$

- O campo magnético ao longo de um caminho fechado no interior do núcleo ferromagnético pode ser definido como:

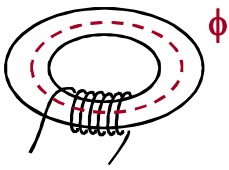
$$\oint H(t)d\ell = \sum_h i_h(t)$$

4



Revisão de Circuitos Magnéticos

- Relações fundamentais**
 - $B(t)$ – densidade de fluxo magnético [Tesla];
 - $H(t)$ – intensidade de campo magnético [A/m];
 - $\Phi(t)$ – Fluxo magnético [Weber];
 - W – energia armazenada no campo magnético;
 - μ – Permeabilidade magnética do meio;



$$B(t) = \frac{\Phi(t)}{A_e}$$

$$B(t) = \mu H(t)$$

$$W = \frac{1}{2} \mu H(t)^2$$

→

$$H(t) = \frac{B(t)}{\mu} = \frac{\Phi(t)}{\mu A_e}$$

$$\mathcal{F}(t) = Ni = \oint H(t) d\ell = \Phi(t) \oint \frac{d\ell}{\mu A_e}$$

$\mathcal{F}(t) = Ni = \Phi(t) \mathcal{R}$

Relutância

$\mathcal{R} = \oint \frac{d\ell}{\mu A_e} = \frac{\ell_m}{\mu A_e}$

5



Revisão de Circuitos Magnéticos

- Circuito magnético**
 - A relutância se assemelha ao conceito de resistência existente em circuitos elétricos, de modo que se pode fazer uma analogia entre os conceitos:

C. elétrico		C. magnético
e : f.e.m.	→	$\mathcal{F}$: f.m.m.
r : resistencia	→	$\mathcal{R}$: relutância
i : corrente	→	ϕ : fluxo magnético
$e = r \cdot i$	→	$\mathcal{F} = \mathcal{R} \phi$
ρ : resistividade	→	μ : permeabilidade

Obs: $P = \frac{1}{\mathcal{R}}$ [Permeância]

6

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Circuito magnético - Analogia**

N : número de espiras

7

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Curva BH – núcleos ferromagnéticos**

$B = \mu_0 H$

μ_0 = permeabilidade do vácuo

Não linear com histerese e saturação

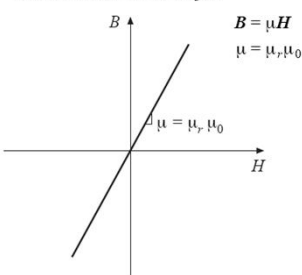
8

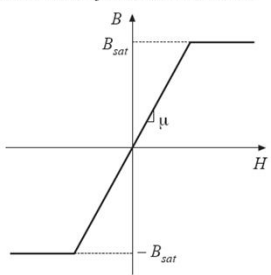
gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Modelagem da curva BH:**
 - sem histerese e saturação*

$$B = \mu H$$

$$\mu = \mu_r \mu_0$$


Typical $\mu_r = 10^3$ to 10^5
 - com saturação e sem histerese*


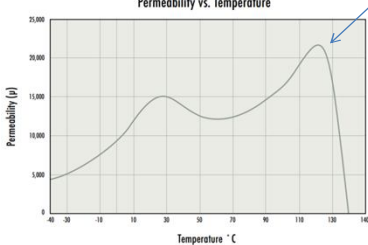
Typical $B_{sat} = 0.3$ to 0.5 T, ferrite
 0.5 to 1 T, powdered iron
 1 to 2 T, iron laminations

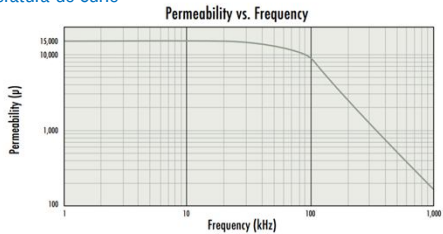
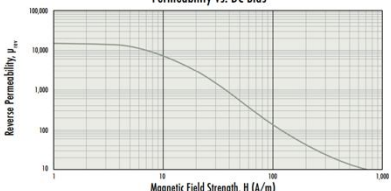
- Necessário buscar a variação de μ com:
 - Temperatura;
 - Frequência;
 - Polarização;
- Além disso:
 - Conhecer as perdas no núcleo;

9

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Dados de datasheet importantes**
 - Permeability vs. Temperature
 

Temperatura de Curie
 - Permeability vs. Frequency
 
 - Permeability vs. DC Bias
 

Efeito da saturação

10

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Dados de datasheet importantes – perdas no núcleo**
 - As perdas em um elemento magnético dependem:
 - Perdas no núcleo (histerese e foucault);
 - Perdas nos enrolamentos (efeito joule, skin effect, proximidade);
 - As perdas fazem com que a temperatura do núcleo se eleve;
 - Estimativa de elevação de temperatura em um núcleo (sem ventilação forçada):

$$\Delta T \approx (P_{core} + P_{copper})^{0.833}$$

11

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Estimativa de perdas no núcleo – Eq. de Steinmetz:**
 - Charles P. Steinmetz deduziu uma função empírica que explicita as perdas nesta condição:

$$P_v = k f^\alpha B^\beta$$
 - P_v – perdas no núcleo por volume;
 - f – frequência da excitação;
 - B – pico da densidade de fluxo;
 - k, α, β – coeficientes de Steinmetz;

Os dados fornecidos nos datasheets são medidos com formas de onda senoidais;

Core Loss Density
19μ

P = σ(B) ^β (W) (B in Tesla, f in kHz)			
freq	a	b	c
≥25kHz	149.797	2.141	1.381
<25kHz	468.978	2.141	1.067

12



Revisão de Circuitos Magnéticos

- **Problemas com a eq. de Steinmetz:**
 - Os coeficientes variam com a frequência e não de uma forma linear;
 - Não leva em consideração o efeito da polarização sobre as perdas;
 - Não leva em consideração formas de onda não senoidais;
 - **Não é precisa para eletrônica de potência!**
- Uma série de modificações da equação de Steinmetz foram propostas ao longo dos anos para atacar os problemas acima:
 - Modified Steinmetz Equation (MSE);
 - Generalized Steinmetz Equation (GSE);
 - Improved GSE (iGSE);
 - Improved iGSE (i2GSE);
- A implementação destas funções é bastante complexa e foge aos objetivos desta disciplina. -> Utilizaremos a equação de Steinmetz quando necessário;

13



Revisão de Circuitos Magnéticos

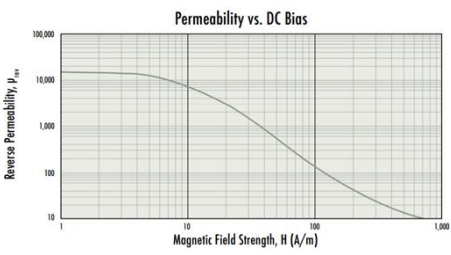
- **Efeito da saturação no comportamento do indutor**

$$v(t) = NA_e \frac{dB(t)}{dt}$$

$$v(t) = \mu NA_e \frac{dH(t)}{dt}$$

$$v(t) = \frac{\mu N^2 A_e}{\ell_m} \frac{di(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$L = \frac{\mu N^2 A_e}{\ell_m}$$



- À medida que H se eleva, μ é reduzido e consequentemente, L;
- Em Hsat, L = 0!

14

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Efeito do entreferro**

$$\mathcal{F}_c + \mathcal{F}_g = ni$$

$$ni = \Phi (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g)$$

$$\mathcal{R}_c = \frac{\ell_c}{\mu A_c}$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_0 A_c}$$

5

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Efeito do entreferro**

$$ni = \Phi (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g)$$

$$L = \frac{n^2}{\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g}$$

$$\Phi_{sat} = B_{sat} A_c$$

$$I_{sat} = \frac{B_{sat} A_c}{n} (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g)$$

Efeito do entreferro:

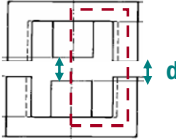
- * Diminuição da indutância.
- * Aumento da corrente de saturação.
- * Indutância menos dependente da permeabilidade do núcleo.

16

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Toroide equivalente – Entreferro**
 - A introdução do entreferro reduz a dependência de μ



$$g = 2 \cdot d \longrightarrow L = \frac{\mu_0 A_e N^2}{g + \frac{l_e}{\mu_r}}$$

Como, $g \gg l_e / \mu_r$

$$L \approx \frac{\mu_0 A_e N^2}{g}$$

- Ele também afeta a energia armazenada no núcleo

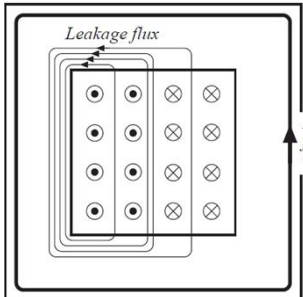
$$W = \frac{1}{2} \int_V B H dV = \frac{B^2 V}{2\mu} \rightarrow \frac{B^2 V_g}{2\mu_0} + \frac{B^2 V_{core}}{2\mu_0 \mu_r} \longrightarrow W \approx \frac{B^2 V_g}{2\mu_0}$$

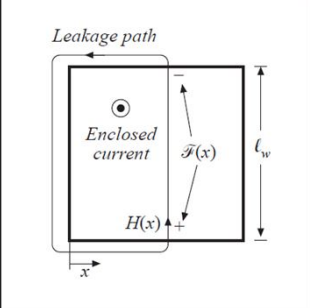
19

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Fluxos de dispersão**
 - São fluxos magnéticos que não enlaçam o primário e o secundário de um transformador ou indutor acoplado;



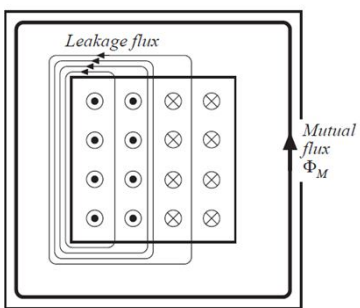
$$\mathcal{F}(x) = H(x) \ell_w$$


20

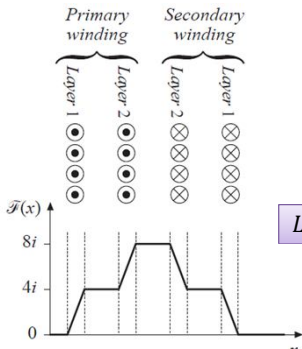
gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Fluxos de dispersão



- No primeiro enlace, $\mathcal{F}(x) = 4i$;
- No segundo, $\mathcal{F}(x) = 8i$;
- No terceiro, $\mathcal{F}(x) = 8i - 4i$, e assim por diante



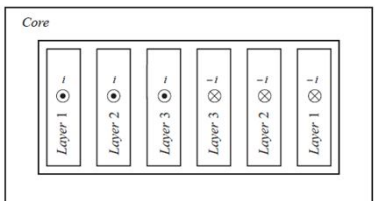
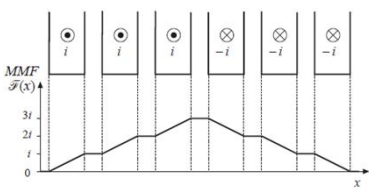
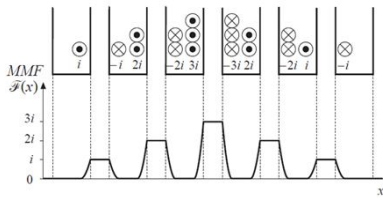
$L_{ds} \propto \mathcal{F}_{max}$

21

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Fluxos de dispersão
 - Fluxos com efeito proximidade (a ser detalhado)

22

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Fluxos de dispersão - Entrelaçamento**
 - Reduz o fluxo de dispersão

Diagram illustrating the reduction of dispersion flux in a magnetic circuit using interleaving. The left graph shows MMF vs x for a non-interleaved winding, with peaks for primary (pri) and secondary (sec) windings. The right graph shows MMF vs x for an interleaved winding, where the MMF is more uniform, reducing dispersion flux.

23

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- Os enrolamentos – mecanismos de perda**
 - Além das perdas provocadas no núcleo ferromagnético, oriundas do ciclo de histerese e correntes de Foucault, existem perdas significativas nos enrolamentos do magnético;
 - As perdas podem ser divididas em perdas c.c. e c.a.
- Perdas c.c. – Efeito Joule**

$$R = \frac{\rho l}{A} \rightarrow R_{fio} = \frac{l_m}{\sigma_{cu} A_{fio}} \quad l_m - \text{comprimento médio de uma espira}$$

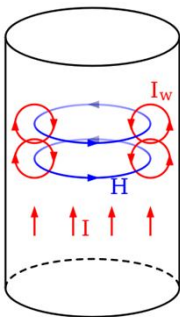
$$R_{CC} = N R_{fio}$$

24



Revisão de Circuitos Magnéticos

- **Perdas c.a. – Efeito pelicular**



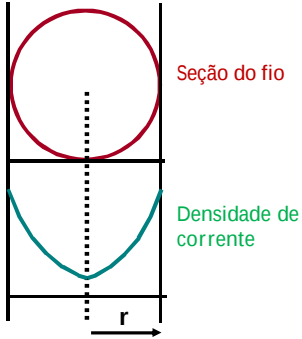
- Em baixa frequência, a corrente no condutor circula por toda a seção uniformemente.
- Em frequências elevadas isto não ocorre devido ao efeito Pelicular (Skin effect)
- A corrente alternada gera um campo magnético. Este campo, ao atravessar uma área de condutor induz correntes que tendem a anular o campo.

25



Revisão de Circuitos Magnéticos

- **Perdas c.a. – Efeito pelicular**



- A densidade de corrente cai exponencialmente da superfície para o interior do fio;
- A profundidade de penetração (δ) indica o comprimento a partir da superfície onde a densidade de corrente decai abaixo de 37%:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu_0 \omega}}$$

$\sigma = 5,7 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ a $T=25C$
 $\sigma = 4,34 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ a $T=100C$
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$
 $\omega = 2\pi f$

$f = 20 \text{ kHz}$
➔
 $\delta = 0.47 \text{ mm}$

26



Revisão de Circuitos Magnéticos

- **Perdas c.a. – Efeito pelicular**
 - Considerando que a resistência do condutor em baixa frequência é igual a R_{cc} e que a resistência do mesmo em alta frequência é igual a R_{ca} , a relação entre as duas é dada pela expressão abaixo:
$$\frac{R_{ca}}{R_{cc}} = \frac{\left(\frac{d}{2\delta}\right)^2}{\left(\frac{d}{2\delta}\right)^2 - \left(\frac{d}{2\delta} - 1\right)^2}$$
 - Onde d – diâmetro do condutor;

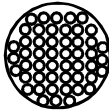
OBS: Quando a forma de onda da corrente for não senoidal, considerar a profundidade de penetração como sendo a média da profundidade de penetração dos três primeiros harmônicos

27



Revisão de Circuitos Magnéticos

- **Perdas c.a. – Efeito pelicular**
 - Escolhendo-se um fio cujo raio seja menor ou igual a profundidade de penetração do efeito pelicular, pode-se admitir de que a corrente se distribui uniformemente por toda a seção do condutor;
 - Pode-se trabalhar com fios “finos” em paralelo para reduzir o efeito pelicular e ainda assim atingir uma densidade de corrente desejada;
 - Um tipo de fio especial chamado de fio de Litz foi desenvolvido para trabalhar em alta frequência. Ele é construído a partir de fios muito finos esmaltados e trançados de modo a garantir que todos apresentam a mesma resistência.



- Outra solução é utilizar laminas de cobre com espessura igual a duas vezes a profundidade de penetração;

28

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- **Perdas c.a. – Efeito proximidade**
 - Um fio conduzindo uma corrente irá induzir correntes no interior de fios vizinhos, produzindo um efeito similar ao efeito pelicular

29

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Revisão de Circuitos Magnéticos

- **Perdas c.a. – Efeito proximidade (Análise simplificada)**
 - Imagine dois condutores retangulares de espessura h próximos, sendo que o primeiro conduz uma corrente senoidal i e o outro se encontra aberto. Assuma $h \gg \delta$;

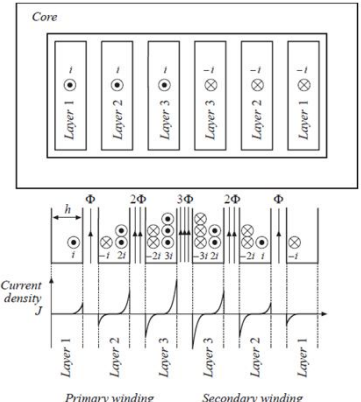
- A corrente no condutor 1 irá circular na sua superfície, segundo efeito pelicular;
- A condução de i irá induzir um fluxo magnético entre os condutores e consequentemente uma corrente i com polaridade trocada será induzida na superfície próxima do condutor 2;
- Como o condutor 2 está aberto ($i=0$), uma outra corrente i é induzida na face oposta do condutor, de modo que a corrente líquida no condutor seja nula;
- Essas duas correntes peliculares no condutor 2 irão provocar perdas ôhmicas;

30



Revisão de Circuitos Magnéticos

- **Perdas c.a. – Efeito proximidade (Análise simplificada)**
 - Agora vamos expandir o exemplo para um transformador com três camadas de primário e três camadas de secundário. A corrente em cada enrolamento é i ;



- Note que há um aumento das correntes peliculares à medida que o número de camadas aumenta;
- A implementação de enrolamentos com múltiplas camadas leva a um aumento de perdas significativo.

31



Revisão de Circuitos Magnéticos

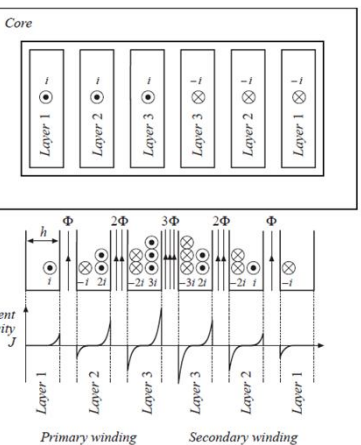
- **Perdas c.a. – Efeito proximidade (Análise simplificada)**
 - Na primeira camada conduz uma corrente RMS I , de modo que a resistência ca equivalente pode ser definida como:

$$R_{ca} = R_{cc} \frac{h}{\delta} \longrightarrow P_1 = R_{ca} I^2$$
 - Na próxima camada

$$P_2 = R_{ca} I^2 + (2I)^2 R_{ca} = 5P_1$$
 - Na próxima camada

$$P_3 = R_{ca} (2I)^2 + (3I)^2 R_{ca} = 13P_1$$
 - De forma genérica

$$P_m = I^2 [(m-1)^2 + m^2] R_{cc} \frac{h}{\delta}$$



32




Revisão de Circuitos Magnéticos

- Perdas c.a. – Efeito proximidade (Análise simplificada)**

$$P_{ca,prox} = I^2 \left(R_{CC} \frac{h}{\delta} \right) \sum_{\{m=1\}}^M [(m-1)^2 + m^2]$$

$$P_{ca,prox} = I^2 \left(R_{CC} \frac{h}{\delta} \right) \frac{M}{3} (2M^2 + 1)$$
 - Logo, em comparação com as perdas cc, o efeito proximidade causa um aumento das perdas de
$$F_R = \frac{P_{ca,prox}}{P_{dc}} = \frac{1}{3} I^2 \left(R_{CC} \frac{h}{\delta} \right) (2M^2 + 1)$$

33




Revisão de Circuitos Magnéticos

- Perdas c.a. – Efeito proximidade (Análise simplificada)**
 - Método de Dowell** – Aproxima-se cada camada por uma folha retangular de cobre com altura ℓ_w e largura h ;
 - Os fios retangulares mantêm a mesma área dos redondos

$$h = \frac{\sqrt{\pi}}{4} d$$
 - A folha esticada deve ter a mesma resistência cc da camada original

$$\eta = \frac{h^2 n_\ell}{h \ell_w} = \frac{\sqrt{\pi}}{4} d \frac{n_\ell}{\ell_w} \quad \text{porosidade}$$

$\delta' = \frac{\delta}{\sqrt{\eta}}$

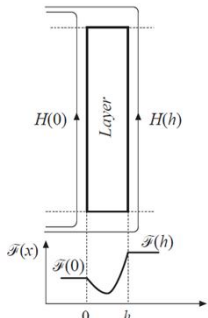
$\varphi = \frac{h}{\delta'} = \sqrt{\eta} \sqrt{\frac{\pi d}{4 \delta}}$

34



Revisão de Circuitos Magnéticos

- Perdas c.a. – Efeito proximidade (Análise simplificada)**
 - Método de Dowell** – Cálculo aproximado das perdas em uma camada;
- Assume campos magnéticos uniformes e perpendiculares às faces da camada;
- Assume-se excitação senoidal
- Resolve as equações de Maxwell para encontrar a distribuição de corrente no interior da camada e integra o resultado para encontrar a



$$P = R_{dc} \frac{\Phi}{n^2} \left[\left(\mathcal{F}^2(h) + \mathcal{F}^2(0) \right) G_1(\varphi) - 4 \mathcal{F}(h) \mathcal{F}(0) G_2(\varphi) \right]$$

where

$$R_{dc} = \rho \frac{\ell_b}{A_w} = \rho \frac{(MLT)n_t^2}{\eta \ell_w^2}$$

$$G_1(\varphi) = \frac{\sinh(2\varphi) + \sin(2\varphi)}{\cosh(2\varphi) - \cos(2\varphi)}$$

$$G_2(\varphi) = \frac{\sinh(\varphi) \cos(\varphi) + \cosh(\varphi) \sin(\varphi)}{\cosh(2\varphi) - \cos(2\varphi)}$$

$$\varphi = \frac{h}{\delta} = \sqrt{\eta} \sqrt{\frac{\pi}{4}} \frac{d}{\delta} \quad \eta = \sqrt{\frac{\pi}{4}} d \frac{n_t}{\ell_w}$$

n_t = number of turns in layer,
 R_{dc} = dc resistance of layer,
 (MLT) = mean-length-per-turn, or circumference, of layer.

35



Revisão de Circuitos Magnéticos

- Perdas c.a. – Efeito proximidade (Análise simplificada)**
 - Método de Dowell** – Cálculo aproximado das perdas em uma camada;

If winding carries current of rms magnitude I , then

$$\mathcal{F}(h) - \mathcal{F}(0) = n_t I$$

Express $\mathcal{F}(h)$ in terms of the winding current I , as

$$\mathcal{F}(h) = m n_t I$$

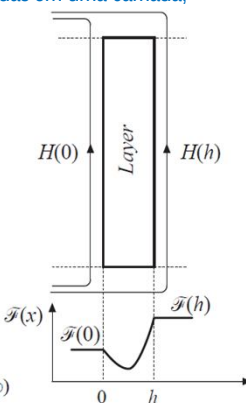
The quantity m is the ratio of the MMF $\mathcal{F}(h)$ to the layer ampere-turns $n_t I$. Then,

$$\frac{\mathcal{F}(0)}{\mathcal{F}(h)} = \frac{m-1}{m}$$

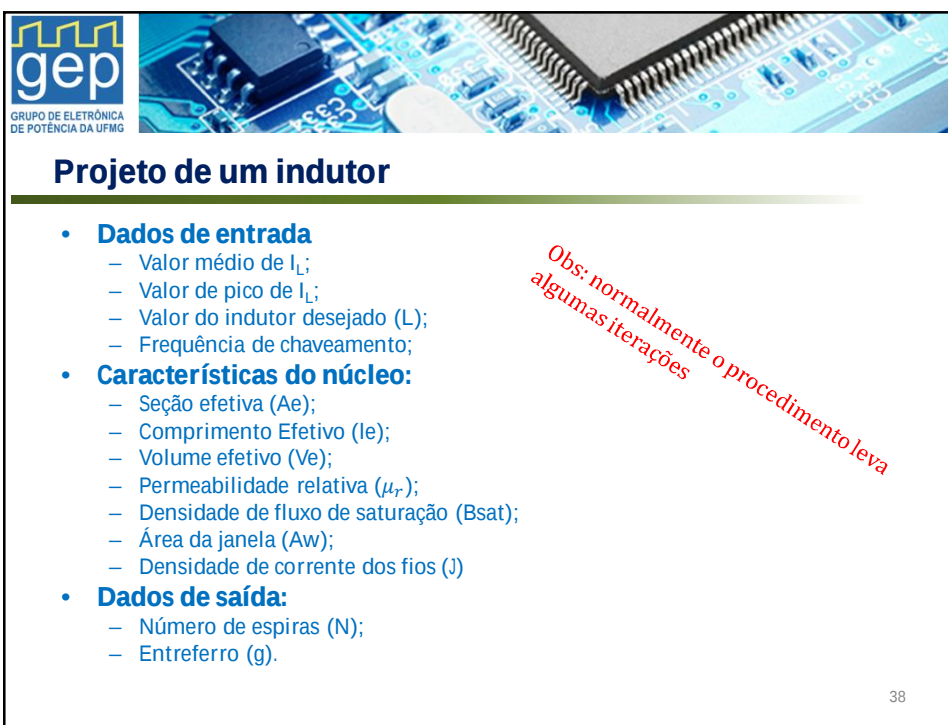
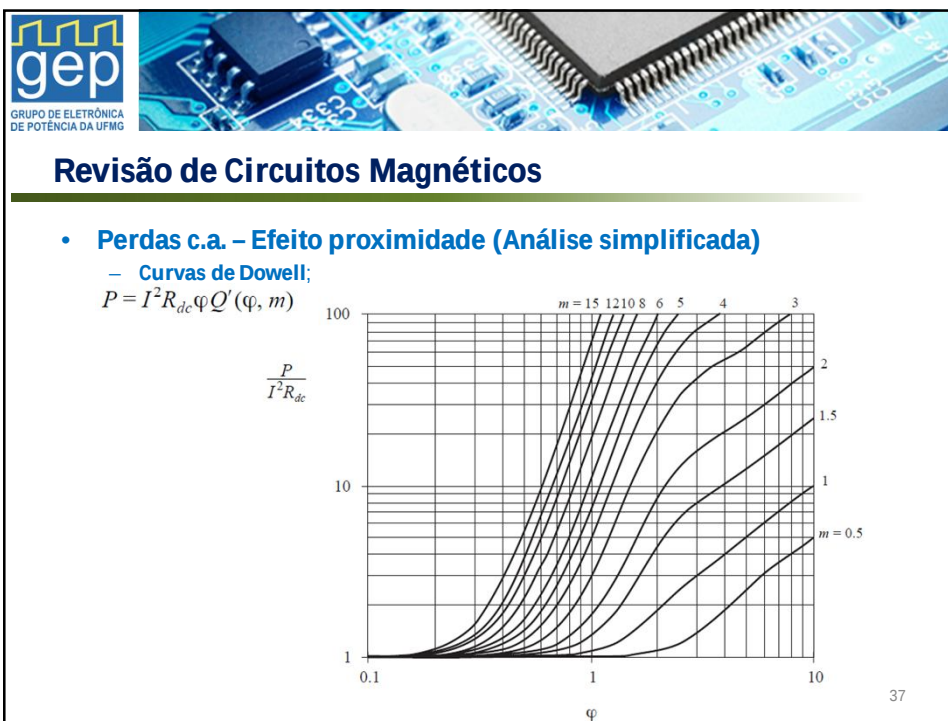
Power dissipated in the layer can now be written

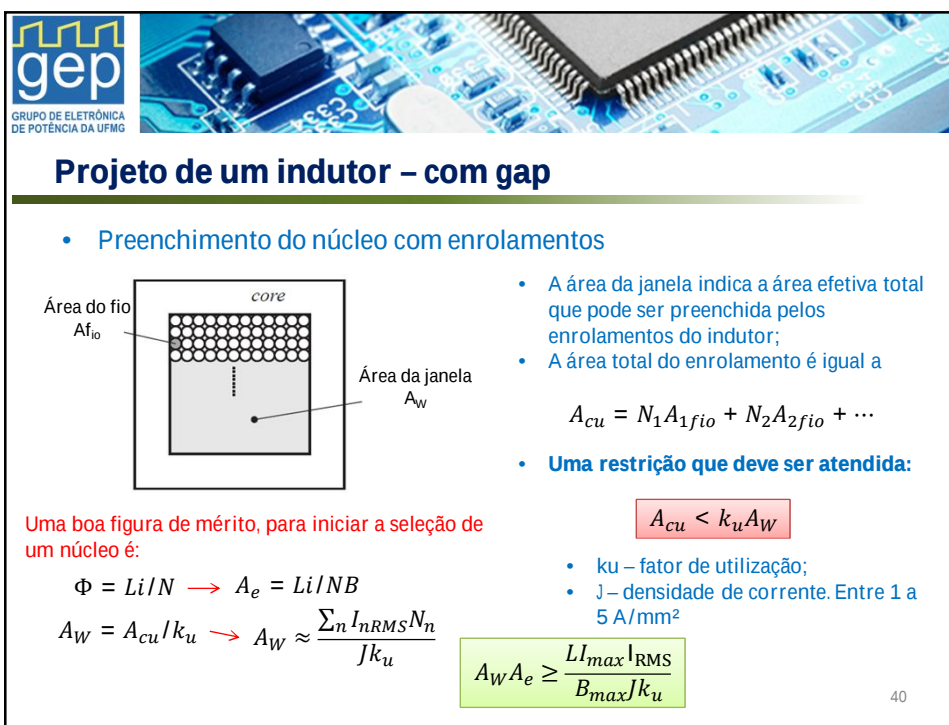
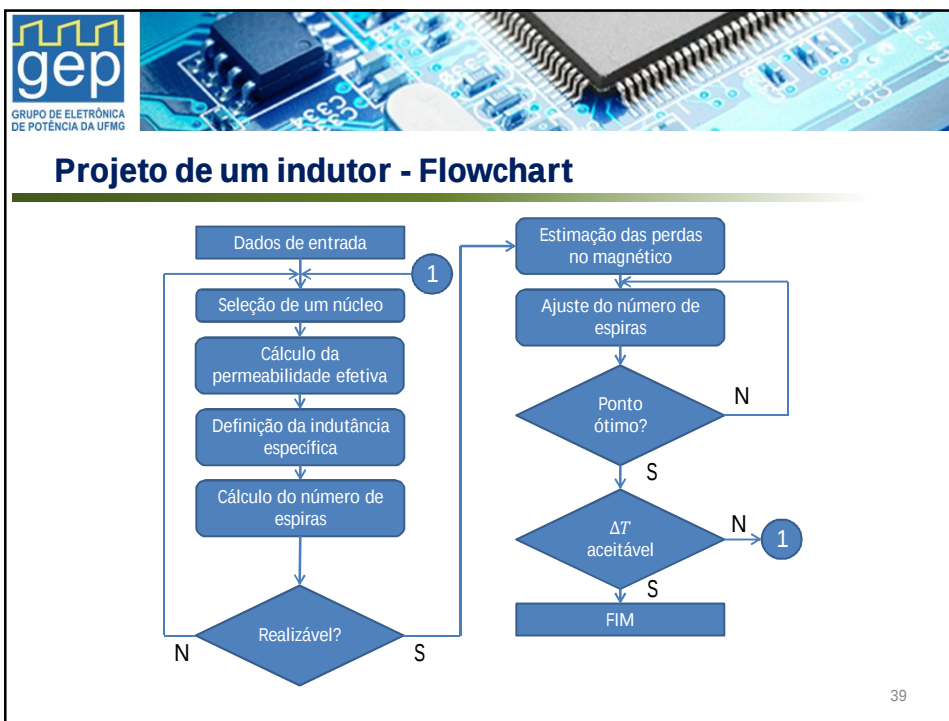
$$P = I^2 R_{dc} \varphi Q'(\varphi, m)$$

$$Q'(\varphi, m) = (2m^2 - 2m + 1) G_1(\varphi) - 4m(m-1) G_2(\varphi)$$



36

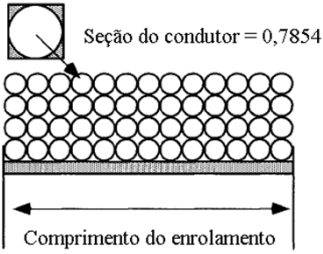




gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Projeto de um indutor – com gap

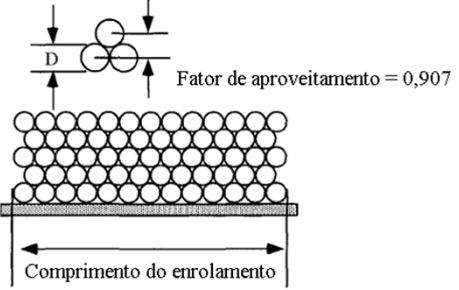
- Preenchimento do núcleo com enrolamentos



Seção do condutor = 0,7854

Comprimento do enrolamento

Padrão de pre-enchimento quadrado



Fator de aproveitamento = 0,907

Comprimento do enrolamento

Padrão de pre-enchimento hexagonal

41

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Projeto de um indutor – com gap

- Preenchimento do núcleo com enrolamentos – Fator de utilização
 - Mecanismos que reduzem o fator de utilização:
 - Fios redondos não se encaixam bem;
 - O esmalte e materiais isolantes elevam a área dos fios e consequentemente reduzem k_u ;
 - A técnica de enrolamento pode elevar a área de cobre;
 - O carretel reduz o tamanho da área da janela;
 - Valores típicos de k_u :
 - 0.5 para indutores de baixa tensão;**
 - 0.25 a 0.3 para transformadores off-line;
 - 0.05 a 0.2 para transformadores de alta tensão;
 - 0.65 para indutores de baixa tensão bobinados com folhas de cobre;

42

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG



Projeto de um indutor

- Escolher $B_{max} < B_{sat}$;
- Calcular $A_e A_w$ e selecionar um núcleo
- Calcular a permeabilidade efetiva desejada: $W = \frac{1}{2} L I_{max}^2 = \frac{B_{max}^2 V_e}{2 \mu_0 \mu_e}$
- Calcular o A_L necessário $A_L = \frac{\mu_0 \mu_e A_e}{l_e}$
- Calcular o número de espiras $N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$
- Calcular o entreferro: $g = l_e \left(\frac{1}{\mu_e} - \frac{1}{\mu_r} \right)$

$\mu_e = \frac{B_{max}^2 V_e}{\mu_0 L I_{max}^2}$

43

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

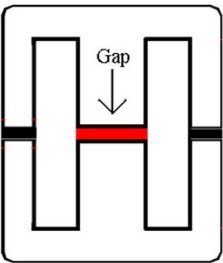


Projeto de um indutor

- Implementação do entreferro

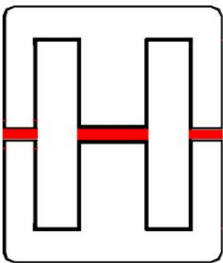
Montagem dos núcleos

Versão produto final



A_L já definido pelo fabricante

Versão protótipo

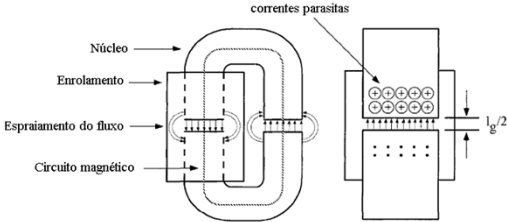


44

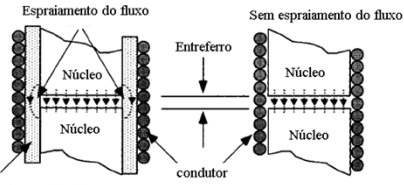
gép
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Projeto de um indutor

7. Ajustar o número de espiras para compensar o espraioamento de fluxo



- O espraioamento é provocado por distribuição não uniforme do fluxo no entreferro;
- O uso de carretel contribui para este efeito;
- O espraioamento tende a elevar o valor do indutor



45

gép
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Projeto de um indutor

7. Ajustar o número de espiras para compensar o espraioamento de fluxo

- Pode-se compensar o efeito do espraioamento reduzindo o número de espiras na implementação do indutor por um fator F_e :

$$F_e = 1 + \frac{g}{\sqrt{A_e}} \ln \left(\frac{2H_w}{g} \right)$$

- H_w – altura da janela;
- N_{comp} – número de espiras corrigido

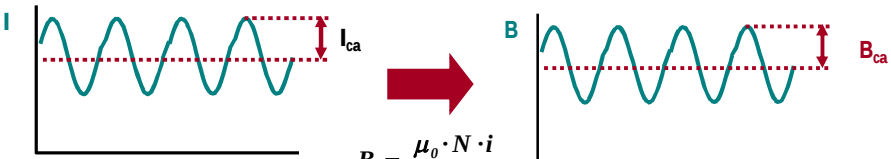
$$N_{comp} = \frac{N}{\sqrt{F_e}}$$

46

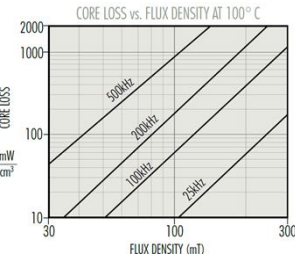
gép
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Projeto de um indutor

8. Estimar as perdas no núcleo



$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot i}{g + \frac{l_e}{\mu_r}}$$

$$P_v = k f^\alpha B^\beta$$


47

gép
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Projeto de um indutor

8. Estimar as perdas no núcleo

MATERIAL	x	y	c
3C80 (100°C)	1,30	2,50	16,70
3C81 (100°C)	1,40	2,50	7,00
3C85 (100°C) 20-100KHz	1,30	2,50	11,00
3C85 (100°C) 100-200KHz	1,50	2,60	1,50
SIFERRIT N27 (não especificado)	1,39	2,19	6,55
3F3 (100°C) (20-300KHz)	1,60	2,50	0,25
3F3 (100°C) (>300KHz)	1,80	2,50	0,02
3F4 (100°C) (500-1000KHz)	1,75	2,90	12x10 ⁻²
4F1 (100°C) (3000-10000KHz)	1,35	2,25	9,00
IP10 (23°C)	1,21	2,24	19,39
IP6 (23°C)	1,18	2,34	69,63

$$P_{FE} = c V_e f^x B_{ca}^y$$

48

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Projeto de um indutor

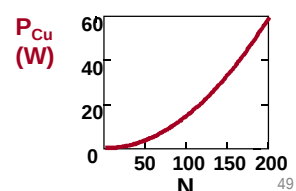
9. Estimar as perdas no cobre

- Resistência cc e efeito joule

$$R = \frac{\rho l}{A} \rightarrow R_{fio} = \frac{\rho_{cu} l_m}{A_{fio}} \quad l_m - \text{comprimento médio de uma espira}$$

$$P'_{cu} = N R_{fio} I_{RMS}^2 \approx \frac{N^2 l_m I_{RMS}^2}{A_W k_u \sigma_{cu}} \quad \sigma_{cu} = 5.7 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$$

- Deve-se também levar em consideração os efeitos ca
 - Pelicular;
 - Proximidade;



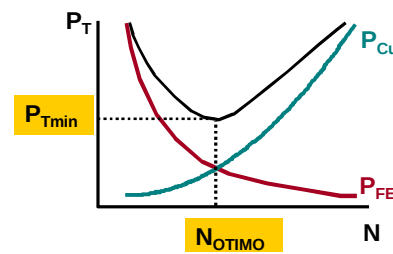
49

gep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Projeto de um indutor

10. Verificar ponto ótimo de perdas

- Normalmente as perdas em um elemento magnético (Núcleo+cobre) possuem um ponto ótimo:



- Pode-se ajustar o número de espiras para atingir o ponto ótimo;
- Contudo é importante revisar o projeto, para verificar se o aumento do número de espiras não excederá o k_u ou o B_{max}

50

