

Conclusão: o fluxo no núcleo ferromagnético é $1,8 \times 10^{-4}$ [Wb], que corresponde a $FMM = 120$ [Aesp].

2.4 EXCITAÇÃO COM CORRENTE ALTERNADA:

Grande parte dos dispositivos eletromecânicos são alimentados com tensão alternante do tipo senoidal, devido a certas facilidades na distribuição de energia. São exemplos desses dispositivos os reatores, os transformadores, as máquinas elétricas síncronas e assíncronas.

Quando se excita um núcleo com tensão periódica alternada, ocorrem alterações no campo magnético, e o estudo do comportamento do núcleo ferromagnético em relação à curva $B=f(H)$ assume importância, principalmente no que se refere às perdas de energia que ocorrem neste caso e à presença de parcelas de corrente de excitação com frequências diferentes (harmônicas).

No caso de excitação contínua, a indutância só está presente no intervalo do transitório, diferentemente da excitação alternada, em que a indutância influi no comportamento do regime permanente, e esta indutância não se mantém constante, caso o núcleo não for linear.

O fluxo magnético é função da $FMM = NI$. Se a corrente for periódica, o fluxo também será periódico.

2.4.1 Lei de Faraday:

Faraday estabeleceu uma importante relação entre a variação de fluxo magnético e a tensão induzida. Segundo a lei de Faraday, se numa bobina de N espiras ocorrer uma variação de fluxo magnético em função do tempo, nos terminais da mesma bobina aparecerá uma força eletromotriz (f.e.m.) induzida.

Considere o fluxo concatenado (λ) numa bobina com N espiras como: $\lambda = N \cdot \phi$

Segundo a Lei de Faraday, a f.e.m. induzida nos terminais desta bobina será:

$e(t) = - d\lambda / dt$; substituindo o fluxo concatenado, temos: $e(t) = - d(N \cdot \phi) / dt$

$e(t) = - (N \cdot d\phi / dt + \phi \cdot dN / dt)$; como $N = \text{constante} \rightarrow$ $e(t) = - N \cdot d\phi / dt$ (24)

Pode-se considerar $e(t)$ como uma reação da bobina contra a variação do fluxo no tempo dt . Assim, se o fluxo $\phi(t)$ for crescente no tempo dt , $e(t)$ pode criar uma fmm cujo fluxo $\phi_1(t)$ age contra o $\phi(t)$, mas, se $\phi(t)$ for decrescente no tempo dt , $e(t)$ pode criar uma fmm cujo fluxo $\phi_1(t)$ age no sentido de $\phi(t)$.

Interprete

- a) Obs...
- apoi...
- velo...
- cont...
- b) A e...
- figu...

Co...

xy...

aur...

tam...

Far...

circ...

ind...

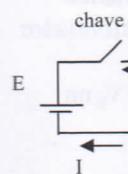
cor...

par...

cre...

se e...

- c) Supor...
- com...



Figura

bobina e
eletromotriz
ligada a

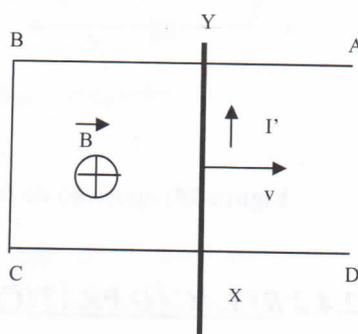
F

Interpretações da Lei de Faraday:

- a) Observe a figura 22, onde temos um condutor com formato ABCD, em que está apoiado um outro condutor XY, que pode deslizar sobre o condutor ABCD, com velocidade v constante, mantendo-se sempre paralelo durante o deslocamento, com contato elétrico eficaz entre os dois condutores.
- b) A existência de um campo magnético B , com sentido entrando no papel, completa a figura em questão.

Conforme ocorre o deslocamento do condutor xy , da esquerda para a direita, a área $bcxy$ aumenta, o fluxo magnético concatenado também é crescente ($\phi = BS$). Segundo a Lei de Faraday, aparece uma f.e.m. induzida no circuito elétrico $bcxy$, cuja corrente elétrica induzida I' , terá um sentido tal que o fluxo correspondente a esta corrente induzida será para fora do papel, tentando evitar o crescimento do fluxo ϕ . Desta análise, conclui-se que a corrente I' deve ter sentido de x para y .

Figura 22 - princípio do gerador



- c) Supondo agora, na figura 23, um núcleo com duas bobinas N_1 e N_2 , em que N_1 é excitada com corrente contínua, proveniente da bateria E .

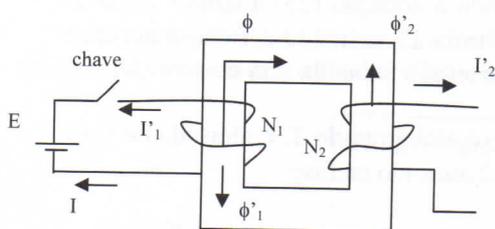


Figura 23 – polaridade da f.em.

Quando, no circuito da figura 23, a chave k é ligada, aparece uma corrente I nas N_1 espiras, criando um fluxo magnético ϕ com sentido horário, que cresce de zero até um valor constante ϕ . Esse fluxo concatenase com as N_1 e N_2 espiras, induz tensões nas N_1 e N_2 espiras. As correntes I'_1 e I'_2 estão indicadas na figura, e a análise mostra que os fluxos produzidos por essas correntes serão tais que tentarão evitar o crescimento do fluxo original.

No caso particular, ilustrado na figura 23, houve uma tensão induzida na própria bobina de excitação N_1 , que se chama tensão auto-induzida. Esse caso é muito comum em eletromecânica, pois a bobina que cria o fluxo magnético no núcleo é na maioria das vezes ligada a uma fonte de tensão alternada.

A tensão induzida estará sempre defasada da tensão de excitação. Veja a seguir:

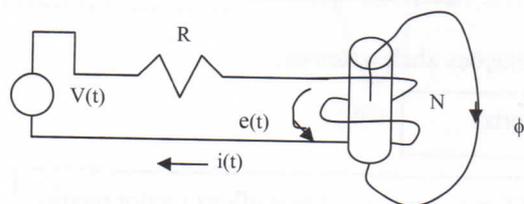


Figura 24 – tensão auto-induzida

No circuito da figura 24, sendo R a resistência da bobina, pode-se escrever:

$$v(t) = R.i(t) - e(t) = R.i(t) + N \frac{d\phi}{dt}$$

Supondo R = 0, temos: $v(t) = N \frac{d\phi}{dt} = v_\phi(t)$ = tensão induzida na bobina.

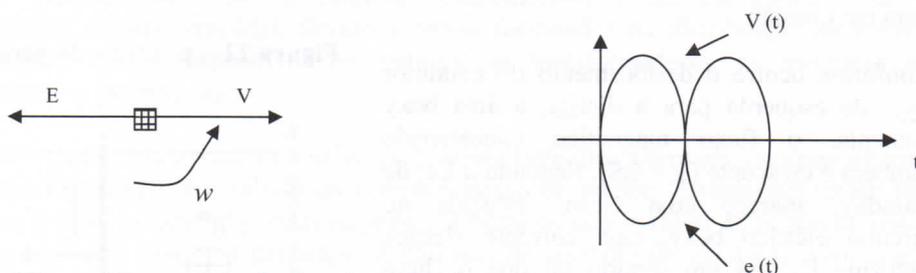


Figura 25: oposição de fase da tensão induzida

2.4.2 RELAÇÃO PRÁTICA DA LEI DE FARADAY:

É importante para a eletromecânica a equação que relaciona o fluxo magnético com a tensão aplicada à bobina. Como vimos no parágrafo anterior:

$$v(t) = N \frac{d\phi}{dt} = v_\phi(t) \quad (25)$$

Segundo a equação (25) a tensão induzida $v_\phi(t)$ é a derivada 1ª; assim se o fluxo magnético for senoidal a tensão induzida será co-senoidal.

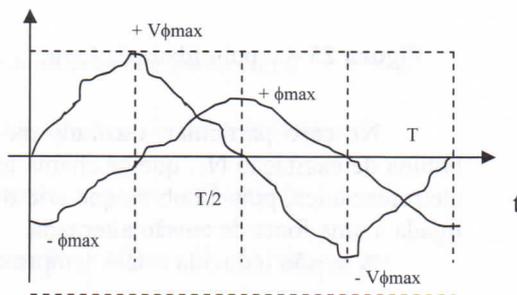
O fluxo está atrasado T/4 atrasado de v_ϕ no tempo ou $\pi/2$ atrasado na fase.

Desenvolvendo a equação acima, temos:

$$N \int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} d\phi = \int_0^{T/2} v_\phi dt$$

o valor médio da tensão v_ϕ é:

$$v_{\phi \text{ médio}} = 1 / (T/2) \int_0^{T/2} v_\phi dt$$



substituindo na equação as relações abaixo, temos:

$$\text{Frequência} = f = 1 / T \text{ (Hertz)} \quad (26)$$

$$\text{Fator de forma da onda} = f.f. = v_\phi / v_{\phi \text{ médio}} = \text{valor eficaz} / \text{valor médio} \quad (27)$$

$$\phi_{\max} = v_{\phi} / 4. (f.f.) N . f \quad (28)$$

em que:

ϕ_{\max} : fluxo magnético máximo [Wb]
 v_{ϕ} : tensão eficaz aplicada igual a tensão induzida [V]
 ff : fator de forma da onda
 N : número de espiras da bobina considerada.
 f : frequência da tensão aplicada [Hz].

No caso particular de uma excitação senoidal ou co-senoidal a expressão fica:

Supondo $\phi(t) = \phi_{\max} \cos (wt)$

$$v_{\phi}(t) = - N d\phi/dt \rightarrow v_{\phi\max} = - N d \phi_{\max} \cos (wt) / dt = N w . \phi_{\max} . \text{sen} (wt)$$

$$v_{\phi\text{eficaz}} . \sqrt{2} = N . 2\pi . f \phi_{\max} . \underbrace{\text{sen} (wt)}_{\approx 1}$$

Assim, tem-se:

$$v_{\phi\text{eficaz}} = 4,44 . f . N . \phi_{\max} \text{ [V]} \quad (29)$$

Quando a tensão é senoidal no tempo, $v_{\phi}(t) = v_{\phi\max} \text{sen } wt$ o fluxo magnético será : $\phi(t) = \phi_{\max} . \cos wt$, ou seja, existe uma defasagem de 90° entre a tensão e o fluxo.

A equação (29) de Faraday relaciona a tensão eficaz com o fluxo magnético máximo, mas quem cria o fluxo é a corrente de magnetização, obedecendo à relação:

$$N . i(t) = \phi(t) . R(t) \quad (30)$$

A análise se processa da seguinte maneira:

se o meio é linear, a relutância é constante, não varia com o tempo. Assim, a corrente de magnetização $i(t)$ e $\phi(t)$ assumem a mesma forma de onda e fase no tempo.

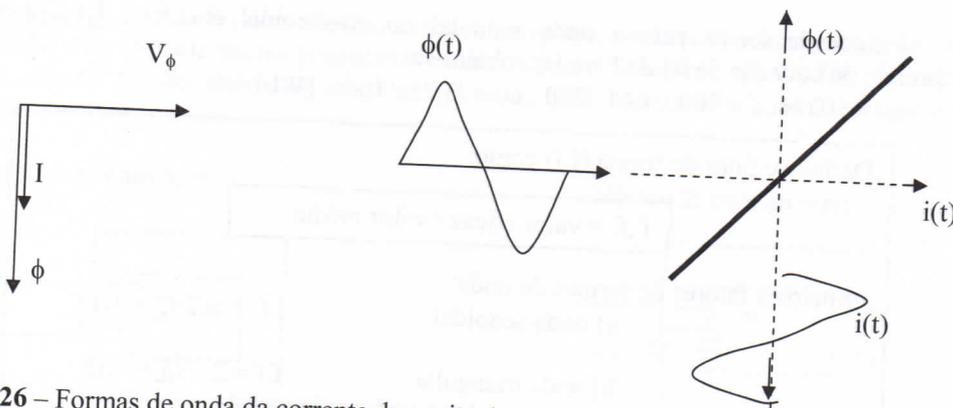


Figura 26 – Formas de onda da corrente de excitação e do fluxo magnético

Quando o meio não é linear, a relutância não é constante, logo, a relação entre o fluxo e a corrente não é constante. As formas de onda e as fases não são as mesmas, aparecendo o fenômeno de histerese que estudamos no capítulo 1 (ver figura 27).

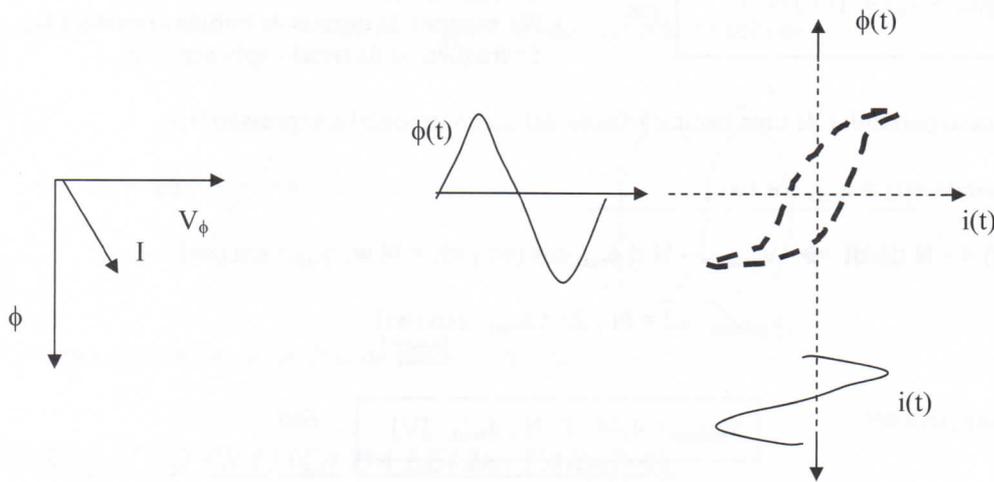


Figura 27 – Formas de onda da corrente de excitação e do fluxo magnético

Em excitação alternada é importante notar que todas as vezes que se quiser modificar a tensão aplicada em uma máquina para um valor maior ou menor do que a tensão original, deve-se tomar o cuidado de manter o mesmo fluxo magnético, pois a alteração deste parâmetro modifica a potência do dispositivo eletromecânico. Deve-se agir na tensão e no número de espiras. Tomar o cuidado de nunca ultrapassar o valor original sob pena de saturar o núcleo, podendo B atingir um valor fora da curva normal de magnetização do material.

Exercício 2.10: Determinar o fator de forma e o fluxo máximo num núcleo que possui 200 espiras, quando uma tensão senoidal $v(t) = 200 \cdot \sqrt{2} \sin 377t$ [V].

$$V_{\text{médio}} = 2 V_{\text{max}}/\pi ; V_{\text{eficaz}} = V_{\text{max}}/\sqrt{2} \rightarrow \text{f.f.} = V_{\text{eficaz}} / V_{\text{médio}} = \pi/2\sqrt{2} = 1,11$$

O fator de forma para a onda senoidal ou co-senoidal é: f.f. = 1,11, assim, substituindo na equação da lei de Faraday, obtém-se:

$$\phi_{\text{max}} = V_{\text{ef}} / 4 (\text{ff}) N \cdot f = 200 / 4,44 \cdot 200 \cdot 60 = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ [Wb]}$$

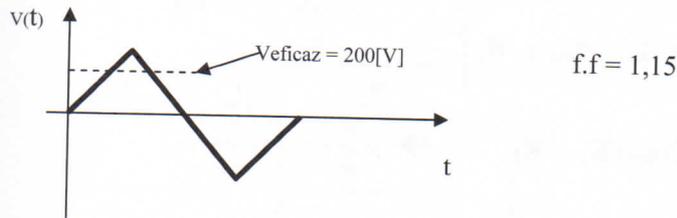
Define-se fator de forma (f.f) como:

$$\text{f.f.} = \text{valor eficaz} / \text{valor médio}$$

Principais fatores de formas de onda:

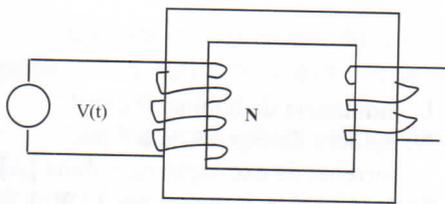
| | |
|---|--------------------------------------|
| a) onda senoidal | $\text{f.f.} = \pi/2\sqrt{2} = 1,11$ |
| b) onda triangular (para uma determinada configuração) | $\text{f.f.} = 2 / \sqrt{3} = 1,15$ |
| c) onda retangular | $\text{f.f.} = 1,00$ |

Exercício 2.11: A forma de onda da tensão de excitação de um determinado núcleo é dada na figura abaixo. Sabendo que a frequência da excitação é de 50 ciclos/s, e que a bobina do núcleo possui 200 espiras, determine o fluxo máximo que circula pelo núcleo ferromagnético.



$$\phi_{\max} = V_{ef} / 4 (f.f) N \cdot f = 200 / 4 \cdot (1,15) \cdot 200 \cdot 50 = 4,34 \text{ m [Wb]}$$

Exercício 2.12: Um sinal senoidal de $V_{\max} = 200 \cdot \sqrt{2}$ e $f = 50$ [Hz] foi aplicado à bobina da figura abaixo. Quando se aplica uma tensão eficaz de 200[V], triangular, com o dobro da frequência, o que acontecerá com o fluxo magnético?



Senoidal:

$$v_{\phi} = 4 \cdot (f.f.) N \cdot f \cdot \phi_{\max}$$

$$200 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{2} = 4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot N \cdot \phi_{\max 1} \quad (\text{A})$$

Triangular:

$$v_{\phi} = 4 \cdot (f.f.) N \cdot f \cdot \phi_{\max}$$

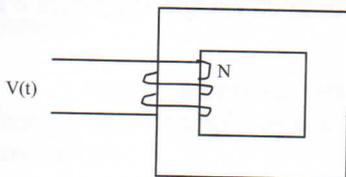
$$200 = 4 \cdot 1,15 \cdot 100 \cdot N \cdot \phi_{\max 2} \quad (\text{B})$$

Igualando as equações (A) e (B):

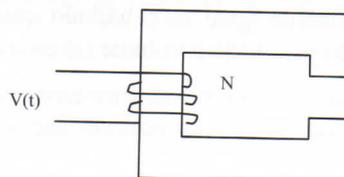
$$4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot N \cdot \phi_{\max 1} = 4 \cdot 1,15 \cdot 100 \cdot N \cdot \phi_{\max 2} \quad \implies \quad \boxed{\phi_{\max 2} = 0,482 \cdot \phi_{\max 1}}$$

Exercício 2.13: São dados dois núcleos exatamente iguais, porém um possui entreferro. As bobinas N_1 e N_2 de cada núcleo possuem o mesmo número de espiras, igual a 500 espiras. Para a mesma tensão alternada senoidal aplicada, qual bobina terá maior corrente de excitação?

Núcleo 1 : sem entreferro



Núcleo 2: com entreferro



Como a excitação é alternada, sendo a tensão idêntica para os dois núcleos, os fluxos magnéticos também serão iguais.

$$\phi_{\text{máx1}} = \phi_{\text{máx2}} \quad \left. \begin{array}{l} N \cdot I_1 = \phi_{\text{máx1}} \cdot R_1 \\ N \cdot I_2 = \phi_{\text{máx2}} \cdot R_2 \end{array} \right\} \quad I_1 / R_1 = I_2 / R_2$$

Como $R_2 \gg R_1 \quad \rightarrow \quad I_2 \gg I_1$

2.5 ENERGIA ARMAZENADA NO CAMPO MAGNÉTICO:

2.5.1 Indutância própria de uma bobina

Trata-se de um parâmetro (L) que relaciona a intensidade de fluxo magnético (ϕ) para uma determinada corrente numa bobina.

$$L = N \cdot d\phi / dI \quad [H] \text{ ou } [Wb \cdot esp/A] \quad (31)$$

onde L: indutância da bobina [henry]
 N: número de espiras da bobina.
 I: corrente de excitação na bobina [A]
 ϕ : fluxo criado pela corrente I [Wb]

Num meio linear: $L = N \cdot \phi / I \quad [H]$

Substituindo pela lei de Faraday tem-se: $e(t) = N \cdot d\phi/dt = L \cdot dI/dt \quad [V]$, que

mostra a tensão induzida nos terminais da bobina.

Analisando a energia na bobina, tem-se: $dW = P dt = e \cdot i \cdot dt \rightarrow W = \int L \cdot i \cdot di \rightarrow$

$$W = \frac{1}{2} \cdot L I^2 \quad [Joules] \quad (32)$$

que representa a energia armazenada no campo magnético do circuito, e que deve ser numericamente igual ao calculado quando se utiliza a densidade de energia magnética e a integração para todo o volume do circuito magnético.

2.5.2 Energia armazenada na bobina:

O cálculo visto no item 2.5.1 da energia armazenada pode ser feito utilizando a densidade magnética. Considere o núcleo da figura, excitado com uma fonte elétrica e que no instante $t=0$, antes de fechar a chave, a densidade de fluxo magnético residual seja nula.

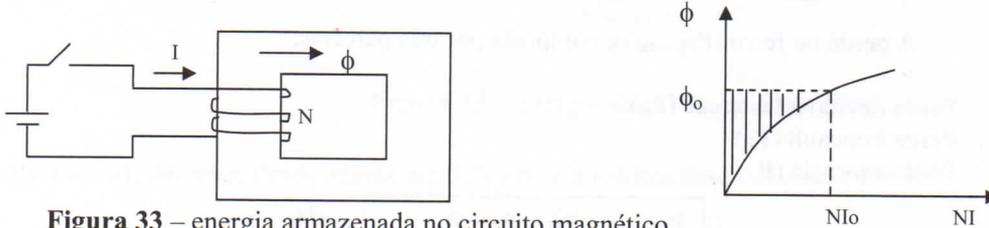


Figura 33 – energia armazenada no circuito magnético

Quando a chave é fechada, uma corrente $i(t)$ cresce desde $i=0$ [A] até certo valor $i = I_0$ [A], o que provoca também o crescimento do fluxo desde $\phi = 0$ até $\phi = \phi_0$, durante o mesmo tempo.

O crescimento do fluxo em função da fmm = NI, segue a curva da figura 33.

Durante o crescimento do fluxo magnético, induz-se uma tensão nos terminais da bobina igual a: $v_\phi(t) = N \cdot d\phi/dt$ (lei de Faraday).

A energia que a fonte elétrica fornece ao campo magnético é: $dW = v(t) \cdot i(t) \cdot dt$

$$dW = N \cdot d\phi/dt \cdot i(t) \cdot dt = N i d\phi \text{ [joules]}$$

Analisando geométrica e magneticamente o núcleo, tem-se:

$$N \cdot I = H \cdot l$$

$$d\phi = S dB$$

$$\text{Vol} = \text{volume do núcleo} = l \cdot S$$

que resulta na equação da energia armazenada na bobina:

$$W = \text{Vol} \cdot \int_0^B H \cdot dB \text{ [joules]} \quad (33)$$

Essa energia é numericamente igual à área hachurada no gráfico $\phi = f(NI)$, que volta à fonte quando se abre a chave ($i = 0$), obedecendo ao princípio de conservação de energia.

Pode-se aproveitar esta energia armazenada e transformá-la em outra modalidade de energia (por exemplo mecânica), utilizando arranjos nos núcleos através da utilização de entreferros.

No entanto, nem toda a energia, num sistema como o da figura, volta para a fonte elétrica integralmente. Uma parte da energia é perdida, e uma parcela que interessa à eletromecânica é a perda no ferro, que acaba se transformando em calor.

2.6 PERDAS NO FERRO

A perda no ferro ($P_{FE \text{ total}}$) é composta por três parcelas:

1. Perda devido à histerese (P_H).
2. Perda Foucault (P_F)
3. Perda anômala (P_A).

$$P_{FE \text{ total}} = P_H + P_F + P_A \quad (34)$$

A perda total no ferro é obtida pelo ensaio em vazio do núcleo ferromagnético em excitação alternada, onde se coloca um wattímetro na entrada do circuito e este mede a potência ativa absorvida da fonte elétrica. Para determinar a perda total no ferro, basta deduzir da leitura do wattímetro a potência dissipada por efeito joule nos enrolamentos das bobinas do núcleo ferromagnético.

Quando checamos o valor da perda total obtida pelo método do wattímetro, este não é o mesmo da soma das perdas Foucault e histerese, obtidas de maneira individualizada. A esta diferença algébrica define-se a perda anômala: $P_A = P_{FE \text{ total}} - (P_H + P_F)$

Pode-se obter os valores das parcelas das perdas histerese e Foucault, por exemplo, por meio através do método de separação de perdas (item 2.6.3), desprezando o valor das perdas anômalas.

Os aços para fins elétricos, usados principalmente em lâminas de motores e transformadores, são especificados pela de sua perda magnética = perda no ferro, dada por [W/kg].

2.6.1 Perdas por histerese:

É a energia dissipada em calor devido à magnetização cíclica do material ferromagnético. Essa perda se deve ao fato de B não assumir os mesmos valores, quando $i(t)$ cresce de $-I_{máx}$ até $+I_{máx}$ e quando decresce de $+I_{máx}$ até $-I_{máx}$. Observe a análise dessas duas situações :

- a) Quando $i(t)$ cresce desde 0 até $+I_{máx}$; B assume valores desde $-B_r$ até $+B_{máx}$.

$$W_1 = Vol \cdot \int_{-B_r}^{+B_{máx}} H \cdot dB \quad [\text{joules}] \quad (35)$$

(parte hachurada – energia absorvida da fonte elétrica)

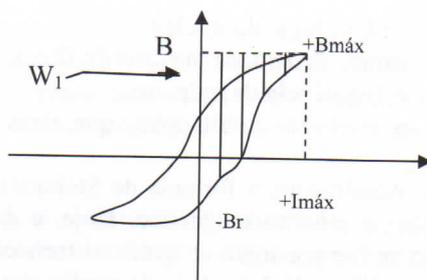


Figura 35 – energia absorvida da fonte elétrica

b) Quando $i(t)$ decresce desde $+Imáx$ até 0; B assume valores desde $+Bmáx$ até $+Br$:

$$W_2 = Vol \cdot \int_{+Bmáx}^{+Br} H \cdot dB \quad [\text{joules}] \quad (36)$$

(parte hachurada: volta à fonte)

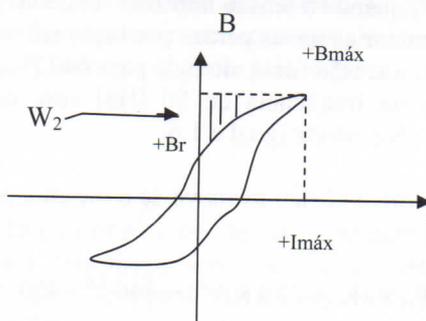


Figura 36 – energia retornada para a fonte elétrica

A subtração de áreas W_1 (figura 35) – W_2 (figura 36) é a parcela de energia que não retorna à fonte e constitui na perda para $\frac{1}{2}$ ciclo da variação da corrente.

Usando o mesmo raciocínio para o meio ciclo seguinte da corrente, conclui-se que a quantidade de energia perdida por histerese é proporcional à área interna do ciclo de histerese.

$$W_h = Vol \cdot \text{área interna de 1 ciclo} \quad (37)$$

Para uma excitação com f ciclos/s \rightarrow $P_H = Vol \cdot \text{área interna de 1 ciclo} \cdot f \quad [\text{watts}] \quad (38)$

A perda devido à histerese pode ser avaliada pela expressão de Steinmetz:

$$P_H = \eta \cdot Vol \cdot (Bmáx)^n \cdot f = k \cdot (Bmáx)^n \cdot f \quad (39)$$

em que: $k = \eta \cdot Vol$

η : coeficiente que depende do material e das unidades.

Vol: volume do núcleo.

B_{máx}: densidade máxima de fluxo.

f: frequência da rede.

n: expoente de Steinmetz que, para a maioria dos materiais existentes, está entre 1,4 e 2,0.

Atualmente, a fórmula de Steinmetz é muito utilizada para comparar grandezas de um mesmo circuito magnético. Hoje, a determinação da perda para fins de análise e de projeto se faz por meio de gráficos fornecidos pelo fabricante do material ferromagnético. São os gráficos de densidade de perdas que serão vistos mais adiante.

Exercício 2.14: Um determinado núcleo ferromagnético apresentou perdas por histerese de 42 [W] quando a tensão induzida foi de $v(t) = \sqrt{2} \cdot 400 \text{ sen}(377t)$ [V]. Determinar as novas perdas por histerese nas seguintes situações:

- a) a tensão fosse alterada para 440 [V_{eficaz}]
- b) na frequência de 50 [Hz] com os demais dados mantidos. Supor expoente de Steinmetz igual a 1,6

Como o núcleo manteve-se o mesmo, pode-se escrever:

item a):

$$P'_H / P_H = (K \cdot V'^n) / (K \cdot V^n) = 440^{1,6} / 400^{1,6} = (1,1)^{1,6}$$

$$P'_H = (1,1)^{1,6} \cdot P_H \text{ (nova perda devido histerese).}$$

item b):

Nesse caso, a tensão manteve-se a mesma, porém B_{máx} varia, pois é inversamente proporcional à frequência:

$$V = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot B_{máx} \cdot S \rightarrow V / (4,44 \cdot N \cdot S) = \text{cte} = f \cdot B_{máx} ;$$

$$\text{Portanto, se } f' = f/1,2 \rightarrow B'_{max} = 1,2 B_{max}$$

$$P'_H / P_H = (K \cdot B'^n \cdot f') / (K \cdot B_{máx} \cdot f) = 1,2^{1,6} \cdot 50 / 60$$

$$P'_H = (1,2)^{1,6} \cdot 0,833 P_H \text{ (nova perda devido à histerese).}$$

É
núcleo
ferro
à corrente

Figura 37

A
resistênci
laminado
de resisti
por uma
mesmas.

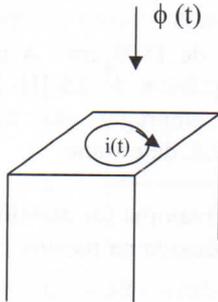
P
por:

onde: P
K
V
f
B
e

⁴ Jean B
Foucault
presença

2.6.2 Perdas Foucault:

É a energia dissipada por circulação de corrente elétrica na seção transversal do núcleo. A energia é do tipo $P = R \cdot I^2$, em que R seria a resistência elétrica oferecida pelo ferro à corrente elétrica.



Como a excitação é alternada, o fluxo magnético produzido também tem mesma forma de onda. Segundo Faraday, um fluxo variando no tempo induz uma tensão no material condutor.

Esta tensão induzida na seção transversal do núcleo encontra um caminho em forma de curto-circuito que faz aparecer as correntes induzidas (parasitas), cujo sentido é dado pela regra da mão direita.

Figura 37 – seção transversal do núcleo

A perda de energia pode ser reduzida se diminuirmos a tensão ou aumentarmos a resistência R. Usa-se, em substituição ao núcleo ferromagnético maciço, um núcleo laminado, constituído por chapas de 0,25mm à 1,00mm de espessuras, com elevado valor de resistividade, o que se consegue pela adição de silício ao ferro. As lâminas são separadas por uma película isolante de modo a não permitir a circulação de correntes entre as mesmas.

Para análises rápidas, a perda Foucault, ou por correntes parasitas, pode ser expressa por:

$$P_F = K \cdot \text{Vol} \cdot (f \cdot B_{\text{max}} \cdot e)^2 \quad [\text{watts}] \quad (40)$$

onde: P_F : perda por correntes parasitas (Foucault).⁴

K : constante que depende das características da chapa.

Vol: volume ativo do núcleo.

f : frequência da rede.

$B_{\text{máx}}$: densidade máxima de fluxo.

e : espessura da chapa.

⁴ **Jean Bernard Léon Foucault** (1819 –1868) físico e astrônomo francês. Deve-se a Foucault, a descoberta das correntes induzidas em um condutor quando em movimento na presença de um campo magnético intenso.

Exercício 2.15: Certo núcleo apresentou perda Foucault de 55 [W] com certa tensão senoidal aplicada na bobina. Qual seria a nova perda Foucault se a única alteração fosse na espessura da chapa alterada para o dobro da espessura anterior? Os demais dados, bem como o volume e a seção útil são mantidos.

$$P'_F/P_F = K \cdot (2e)^2 / K \cdot e^2 = 4 \quad \rightarrow \quad P'_F = 4 \cdot 55 = 220 \text{ [W]}$$

Exercício 2.16: Um núcleo de transformador tem um volume de 1800 cm³. A perda por histerese neste núcleo é de 10 [W], quando funciona na frequência de 25 [Hz] e numa densidade máxima de fluxo de 1,1 [Wb/m²]. Pretende-se empregar este núcleo na frequência de 60 [Hz]. Considerando expoente de Steinmetz = 1,6, determine:

- a) a perda por histerese na nova frequência, se a densidade máxima for mantida.
- b) nova perda por histerese, se a densidade máxima for reduzida na mesma proporção em que é aumentada a frequência.

a) $P_H = k \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f$ $P'_H = k \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f'$
 $10 = k \cdot (1,1)^{1,6} \cdot 25$ $P'_H = k \cdot (1,1)^{1,6} \cdot 2,4 \cdot f = 2,4 \cdot P_H$
 $k = 0,343$ $\underbrace{\hspace{10em}}_{60}$
P'_H = 24 [W]

b) $P_H = k \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f$
 $P''_H = k \cdot 60 \cdot (1,1/2,4)^{1,6} = 0,343 \cdot 60 \cdot (1,1/2,4)^{1,6}$ P''_H = 5,9 [W]

2.6.3 Separação das perdas no ferro - histerese e Foucault:

Excita-se o núcleo ferromagnético em vazio, obtendo as medidas no amperímetro, voltímetro e wattímetro, conforme circuito abaixo:

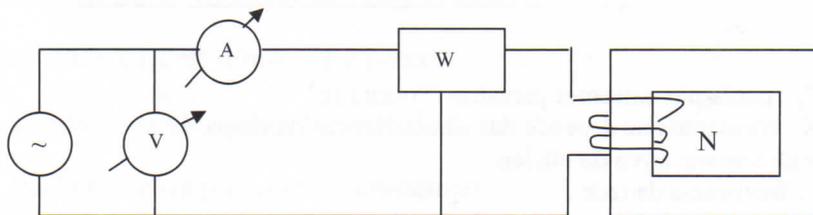


Figura 38 - circuito para obtenção das perdas no ferro

O ensaio dar-se-á com $B_{\text{máx}} = \text{constante}$. Isso se consegue fazendo $V/f = \text{constante}$.

Como $\begin{cases} P_H = k \cdot (B_{\text{máx}})^n \cdot f = K_h \cdot f \text{ (visto que } B_{\text{máx}} = \text{cte).} \\ P_F = K \cdot \text{Vol} \cdot (f \cdot B_{\text{máx}} \cdot e)^2 = K_f \cdot f^2 \text{ (visto que } B_{\text{máx}} = \text{cte).} \end{cases}$

$P_{FE} = P_H + P_F = K_h \cdot f + K_f \cdot f^2$, dividindo ambos os lados pela frequência, tem-se:

$$P_{FE}/f = K_h + K_f \cdot f$$

(41)

Equação 41 é de uma reta : $y = ax + b$

Varia-se a frequência da tensão de excitação, sempre deixando $V/f = \text{constante}$, e determina-se para cada valor de frequência f o correspondente valor de P_{FE}/f . De posse desses pares de valores, constrói-se o gráfico $P_{FE}/f = f(f)$.

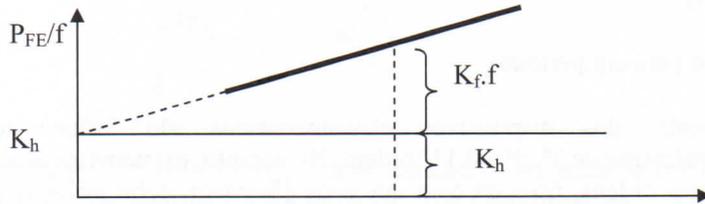


Figura 39 – gráfico utilizado para separação das perdas (Foucault e histerese)

Onde o gráfico cortar o eixo y tem-se o valor de K_h . Para uma frequência qualquer, basta traçar uma vertical e medir K_h e $K_f \cdot f$.

Multiplicando esses valores pela frequência desejada, temos as respectivas perdas:

$$P_H = K_h \cdot f$$

(42)

$$P_F = K_f \cdot f \cdot f$$

(43)

2.7 ANÁLISE DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO:

Quando um núcleo de material ferromagnético é excitado com tensão alternada senoidal, tal que a força magnetomotriz (NI) gere uma densidade de fluxo no material com característica não-linear, a forma de onda da corrente não é senoidal, mas apresenta uma característica na qual o valor da corrente $i(t) = -i(t + T/2)$, onde T é o período da corrente conhecida como alternante.

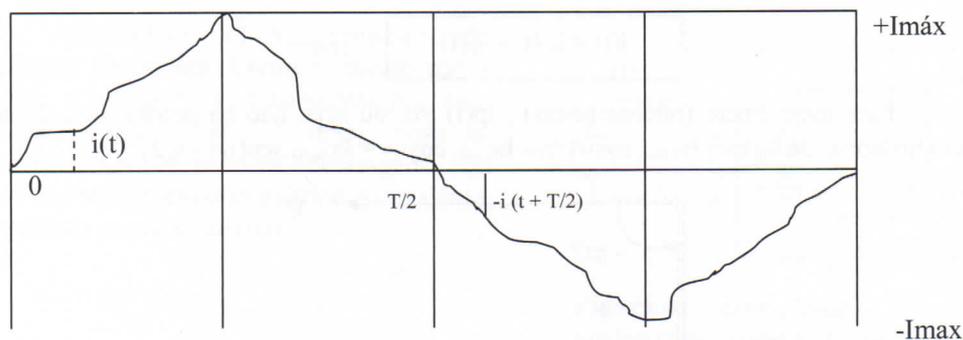


Figura 40 – distorção da corrente de magnetização