

CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Generalidades

Voltando ao estudo do eletromagnetismo, trataremos neste capítulo dos circuitos magnéticos e fenômenos relacionados com os mesmos.

Sabemos que para produzir um campo magnético é necessária uma força magnetomotriz, e esta é obtida fazendo-se passar uma corrente elétrica por um condutor, de preferência uma bobina, porque quanto maior o produto “NI” mais forte o campo produzido.

Também é necessário lembrar que o campo magnético produzido depende da relutância. Esta grandeza, como vimos, varia de acordo com o comprimento, a seção transversal e a permeabilidade, e sua determinação nem sempre é possível, pela dificuldade de estabelecer os limites do campo magnético.

Quando uma bobina está enrolada em um núcleo magnético (uma peça feita de material magnético), o campo magnético produzido por uma corrente fica praticamente limitado ao núcleo, dada a grande diferença entre as permeabilidades do núcleo e do ar que o cerca; a permeabilidade de um material magnético pode ser centenas de vezes maior que a do ar. A permeabilidade relativa dos materiais não- magnéticos

em geral é considerada igual a 1, ou seja, têm permeabilidades iguais à do vácuo.

Chamamos de CIRCUITO MAGNÉTICO a uma região em que existe fluxo magnético. Pelo exposto no parágrafo anterior, o circuito magnético pode ser melhor observado e dimensionado, quando se trabalha com materiais magnéticos. O cálculo da relutância é, então, facilitado quanto às dimensões, mas a grandeza em questão depende da permeabilidade e, como sabemos, um mesmo material magnético apresenta permeabilidades diferentes, de acordo com a imantação adquirida.

Por este motivo, os cálculos de circuitos magnéticos não são feitos geralmente a partir da relutância. Mesmo em partes de material não-magnético que costumam existir em circuitos magnéticos de máquinas elétricas, instrumentos, etc., chamadas ENTREFERROS, não é comum considerar a relutância. A referência que estamos fazendo a esta grandeza é útil para a compreensão de outros fatores concernentes aos circuitos magnéticos.

Desde que a imantação das partes de um circuito magnético seja mantida constante, podemos afirmar o seguinte:

- a) a relutância total de várias partes em série é a soma das relutâncias parciais:

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Dizemos que as partes do circuito estão em série quando formam um único caminho, sem derivações;

- b) quando as partes estão em paralelo, temos que o inverso da relutância total é a soma dos inversos das relutâncias parciais:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Consideremos o circuito magnético representado na Fig. XIX-1, constituído por um núcleo retangular, de seção uniforme e feito de um único tipo de material magnético.

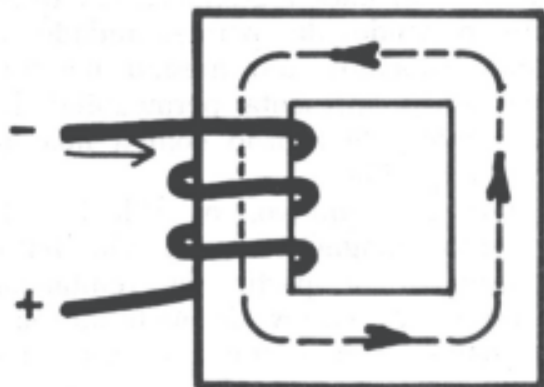


FIG. XIX-1

Nele está enrolada uma bobina percorrida por uma corrente elétrica, produtora do fluxo magnético no núcleo.

Para produzir fluxo neste circuito magnético é necessária uma força magnetomotriz. Se for mantida constante a seção do núcleo e variado o seu comprimento, verificar-se-á que será menor a força magnetomotriz necessária para

produzir o mesmo fluxo, à medida que o comprimento for diminuindo.

A força magnetomotriz necessária para produzir o referido fluxo num circuito magnético de comprimento unitário (no nosso caso, UM METRO), é chamada FORÇA MAGNETIZANTE (H). É evidente que a força magnetizante num circuito magnético depende da natureza do material que o constitui e da sua seção.

Quase sempre um circuito magnético é constituído por materiais diferentes, sendo necessário o conhecimento do valor de "H" para cada parte do circuito. Conhecida esta grandeza, é fácil calcular a força magnetomotriz necessária para vencer a relutância de cada parte e produzir o fluxo desejado. Isto se consegue com a expressão Hl , correspondente ao produto da força magnetizante (H) pelo comprimento (l) da parte considerada, cujo resultado é dado em AMPÈRES.

Os produtos Hl , em um circuito magnético, são comparáveis aos produtos IR num circuito elétrico.

Os circuitos magnéticos podem ser de dois tipos:

- CIRCUITOS EM SÉRIE
- CIRCUITOS MISTOS

Nos circuitos em série, isto é, naqueles em que as diversas partes formam um único caminho, o fluxo magnético tem o mesmo valor em qualquer parte considerada.

Quando há várias partes em paralelo, a diferença de potencial magnético (Hl) entre seus extremos é a mesma, e o fluxo em cada parte é inversamente proporcional à sua relutância. O fluxo total é a soma dos fluxos parciais.

Leis de Kirchhoff para Circuitos Magnéticos

1ª lei: “Em um nó de um circuito magnético, a soma algébrica dos fluxos magnéticos que se dirigem para o mesmo e dos que dele se afastam é igual a zero”.

$$\sum \phi = 0$$

O conceito de nó é, aqui, semelhante ao que foi visto para os circuitos elétricos.

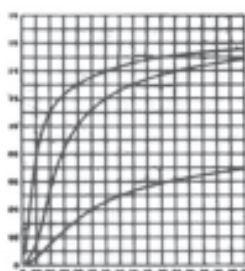
2ª lei: “Em um circuito magnético formado por partes em série, a soma algébrica dos produtos Hl é igual à força magnetomotriz total”.

$$\sum F = S Hl$$

Curvas de Magnetização

Estas curvas, também conhecidas como curvas β - H , mostram de que modo varia a densidade de fluxo num material magnético, à medida que varia a força magnetizante aplicada ao mesmo. Estas curvas, evidentemente, exprimem também a variação do fluxo magnético em função da força magnetomotriz.

A seguir são apresentadas algumas curvas de materiais magnéticos comumente utilizados (ver Apêndice 10):



CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO

FIG. XIX-2

Estas curvas facilitam muito o cálculo dos circuitos magnéticos, tornando desnecessárias determinadas operações.

Como sabemos, a imantação do material magnético é o resultado da orientação dos seus domínios magnéticos. Não é fácil, porém, observar na curva de magnetização de um material o ponto exato correspondente à orientação total dos seus domínios, o que seria a SATURAÇÃO MAGNÉTICA TEÓRICA do mesmo. Entretanto, desde que não seja possível a observação de qualquer aumento na imantação de um material magnético, dizemos que foi atingida sua SATURAÇÃO PRÁTICA. A parte de uma curva β - H mais ou menos paralela ao eixo correspondente à força magnetizante, exprime a saturação magnética da substância considerada.

Cálculo dos Circuitos Magnéticos

Geralmente, o cálculo de um circuito magnético tem sua origem no desejo de ser obtido um determinado fluxo. As dimensões do circuito, bem como os materiais que o constituem, são, de ordinário, conhecidos.

Há, porém, casos em que são feitas várias tentativas para a obtenção dos resultados almejados.

Além disso é conveniente lembrar que a perda de fluxo é um fato, porque apesar da permeabilidade muito maior do núcleo sempre há fluxo no ar (ou qualquer material em torno do núcleo). Em certas máquinas, essas perdas podem variar de 10% a 20%.

Para facilidade de cálculo, sempre com uma visão ampla do problema adota-se o quadro abaixo:

PARTES DO CIRC.	MATE-RIAS	Φ (wb)	S (m ²)	β (T)	H (A/m)	l (m)	Hl (A)	F (A)

FIG. XIX-3

Todo o trabalho consiste em completar o quadro em apreço, aplicando o conhecimento adquirido.

Conhecida a densidade de fluxo num material magnético, basta consultar sua curva de magnetização para determinar a força magnetizante, e vice-versa. Se o material não for magnético (ENTREFERRO), uma dessas grandezas pode ser determinada a partir da outra, com auxílio da expressão

$$\beta = \mu H$$

em que a permeabilidade é igual a $4 \pi \times 10^{-7}$ H/m.

Um detalhe importante no cálculo referente aos entreferros é o da sua seção transversal. Aparentemente esta grandeza deveria ser a mesma da parte magnética do circuito, pois o entreferro fica situado entre duas partes de material magnético, mas tal não ocorre, e o campo no entreferro tende a se dispersar, o que diminui a densidade de fluxo no mesmo. Quanto maior o comprimento do entreferro maior a dispersão e menor a densidade de fluxo.

Por este motivo, a seção transversal efetiva de um entreferro é normalmente calculada adicionando-se às dimensões da seção da parte magnética uma quantidade igual ao comprimento do entreferro.

Por exemplo, se a seção transversal de um núcleo de ferro fosse um retângulo de 3 x 3,5 cm, e no mesmo houvesse um entreferro de 5 mm, faríamos o seguinte cálculo para determinar a seção efetiva do entreferro:

$$3 + 0,5 = 3,5 \text{ cm}$$

$$3,5 + 0,5 = 4 \text{ cm}$$

$$S = 3,5 \times 4 = 14 \text{ cm}^2$$

Força Magnética entre Duas Superfícies que Limitam um Entreferro

As superfícies que limitam um entreferro exercem atrações mútuas. A força entre as duas partes, que se exerce no sentido de fechar o entreferro, é calculada com a expressão

$$F = \frac{\beta^2 S}{2 \mu}$$

F = força entre as superfícies, em NEWTONS (N)

S = seção transversal efetiva do entreferro, em METROS QUADRADOS (m²)

β = densidade de fluxo magnético, em TESLAS (T)

μ = permeabilidade do entreferro, em HÉNRYS/METRO (H/m)

Materiais Diamagnéticos, Paramagnéticos e Ferromagnéticos

Esta classificação é feita em função da permeabilidade dos diversos materiais.

Dá-se a denominação de DIAMAGNÉTICA a qualquer substância que apresente uma permeabilidade ligeiramente menor que a do vácuo. Cobre, prata, hidrogênio, antimônio, vidro, mercúrio, bismuto, chumbo e água são substâncias diamagnéticas que, colocadas em um campo magnético, parecem experimentar uma diminuta força da repulsão.

Alguns materiais, chamados PARAMAGNÉTICOS, apresentam permeabilidades pouco maiores que a do vácuo, sendo ligeiramente magnéticos. Deste grupo fazem parte o ar, o oxigênio, a platina e o alumínio.

Os materiais FERROMAGNÉTICOS são os que apresentam, verda-

deiramente, propriedades magnéticas. Suas permeabilidades são centenas e até centenas de milhares de vezes maiores que a do vácuo. Estas são as substâncias que temos chamado de **MAGNÉTICAS** desde que iniciamos o nosso estudo do magnetismo.

Para fins práticos, os materiais paramagnéticos e diamagnéticos são considerados como tendo permeabilidades iguais à do vácuo, e são denominados **MATERIAIS NÃO-MAGNÉTICOS**.

Histerese

As relações entre a densidade de fluxo magnético e a força magnetizante para certos materiais, expressas pelas suas curvas de magnetização, dependem não só da força magnetomotriz utilizada como também do histórico magnético desses materiais. Isto significa que essas substâncias não voltam a sua situação magnética primitiva, após serem submetidas a um processo de magnetização.

Se uma amostra de um material ferromagnético sem qualquer imantação inicial fosse submetida a uma força magnetizante crescente, sua curva de magnetização seria semelhante à da figura abaixo (de "O" para "A"):

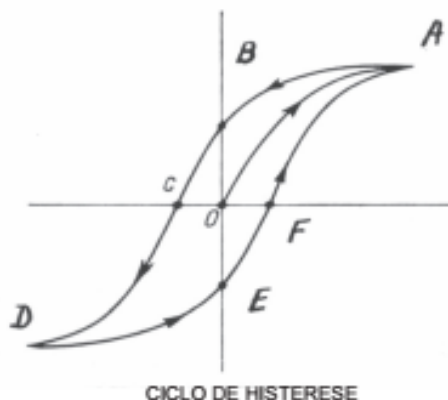


FIG. XIX-4

A redução da força magnetizante a zero deveria fazer cair também a zero o valor da densidade de fluxo. Entretanto, isto não ocorre, e o material permanece com alguma imantação (**OB**, na figura); este resíduo é chamado **DENSIDADE DE FLUXO REMANENTE (REMANESCENTE ou RESIDUAL)**. O maior valor da densidade de fluxo residual, que é conseguido com a imantação da amostra até a saturação, é conhecido como **REMANÊNCIA** do material.

Para fazer desaparecer o magnetismo residual é necessário imantar o material em sentido contrário. A força magnetizante necessária para anular a densidade de fluxo remanente é chamada **FORÇA COERCIVA**, e o maior valor desta força, justamente o correspondente ao maior valor da densidade de fluxo remanente, é chamado **COERCIVIDADE** do material.

O aumento progressivo da força magnetizante, sua redução posterior, e novo aumento no sentido inicial da experiência provocam a variação da densidade de fluxo do modo observado na figura (traçado CDEFA).

O retardamento observado na variação da densidade de fluxo justifica o nome de **HISTERESE** adotado para designar o fenômeno em apreço, pois esta palavra significa atraso, retardamento.

A curva completa (ABCDEFA) obtida é denominada **CICLO ou CURVA DE HISTERESE**. É também conhecida como **LAÇO DE HISTERESE**.

O fluxo remanente é causa de perda de energia, quando um material é submetido a uma força magnetizante alternada. Naturalmente, esta perda é maior quando o material tem grande remanência.

O cálculo das perdas de histerese é feito com a fórmula empírica de **STEINMETZ**:

$$P = k V f \beta_{\max}^x$$

P = potência perdida por histerese, em WATTS (W)
 V = volume da massa magnetizada em METROS CÚBICOS (m³)
 f = frequência, em HERTZ (Hz)
 β_{\max} = densidade de fluxo máxima, em TESLAS (T)
 k = coeficiente de histerese, que depende da composição química do material, do seu tratamento térmico e mecânico e, até certo ponto, da densidade de fluxo magnético.
 x = expoente que depende do material e da densidade de fluxo. Normalmente é considerado igual a 1,6, mas seu valor pode ser maior.

Correntes de Foucault

Os núcleos de transformadores e outras máquinas ficam sujeitos a campos magnéticos variáveis e, portanto, aparecem neles correntes induzidas. Essas correntes parasitas são chamadas **CORRENTES DE FOUCAULT** e, como é evidente, representam um consumo de energia desnecessário.

Para diminuir o efeito das correntes em questão, os núcleos de transformadores e de outros dispositivos que trabalham com campos magnéticos variáveis são feitos geralmente de materiais ferromagnéticos de grande resistividade e constituídos por lâminas ou fios. A laminação é feita no sentido do fluxo, porque as correntes produzidas são perpendiculares ao fluxo. As lâminas ou os fios são isolados uns dos outros com verniz isolante.

As perdas em consequência das correntes parasitas são determinadas com a equação

$$P = k V f^2 \beta_{\max}^2 e^2$$

P = potência perdida por correntes de Foucault, em WATTS (W)
 f = frequência, em HERTZ (Hz)
 V = volume da massa magnética, em METROS CÚBICOS (m³)
 β_{\max} = densidade de fluxo máxima, em TESLAS (T)
 e = espessura das lâminas, em METROS (m)
 k = coeficiente que depende da resistividade do material.

Ímãs Permanentes

Embora os campos magnéticos mais intensos sejam obtidos com auxílio da corrente elétrica, os ímãs permanentes têm seu lugar de destaque no campo da tecnologia elétrica ou eletrônica. O fato de não necessitarem de uma corrente magnetizante é, em alguns casos, uma vantagem importantíssima.

Mas, para que um material possa ser utilizado na produção de ímãs permanentes é indispensável que preencha vários requisitos; alta remanência, grande coercividade e facilidade para ser trabalhado são algumas das características desejadas, sem esquecer sua capacidade de conservar o magnetismo quando sujeito a vibrações e temperaturas relativamente elevadas, bem como o custo e o peso.

Os ímãs permanentes são utilizados em instrumentos, alto-falantes, fones, etc.

EXEMPLO:

Um eletroímã tem um circuito magnético que pode ser considerado como formado por três partes em série, com as seguintes dimensões:

Parte **a**: comprimento = 8 cm
 seção transversal = 0,5 cm²

Parte **b**: comprimento = 6 cm
 seção transversal = 0,9 cm²

Parte **c**: entreferro de 0,5 mm de comprimento e 1,5 cm² de seção transversal

As partes **a** e **b** são de material cujas características são dadas na tabela seguinte:

H (A/m)	100	210	340	500	800	1.500
β (T)	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2

Façamos o quadro a que nos referimos:

PARTES do CIRCUITO	MATERIAS	φ	S	β	H	ℓ	Hℓ	F
a	MAT. MAG.		5x10 ⁻⁵			8x10 ⁻²		
b	MAT. MAG.		9x10 ⁻⁵			6x10 ⁻²		
c	ENTRE-FERRO		15x10 ⁻⁵	3x10 ⁻¹		5x10 ⁻⁴		

Completemos o quadro:

$$\phi_c = \beta_c S_c = 3 \times 10^{-1} \times 15 \times 10^{-5} = 45 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

$$\phi_c = \phi_a = \phi_b \text{ (porque as partes estão em série)}$$

$$\beta_a = \frac{\phi_a}{S_a} = \frac{45 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-5}} = 0,9 \text{ tesla}$$

$$\beta_b = \frac{\phi_b}{S_b} = \frac{45 \times 10^{-6}}{9 \times 10^{-5}} = 0,5 \text{ tesla}$$

Os valores de H para as partes **a** e **b** são obtidos da tabela dada, admitindo uma variação linear entre os valores oferecidos:

$$H_a = 650 \text{ A/m}$$

$$H_b = 275 \text{ A/m}$$

Determinar a corrente que deve passar por uma bobina de 4.000 espiras enrolada na parte **b**, para produzir uma densidade de fluxo de 0,3 tesla no entreferro. Desprezar a perda de fluxo magnético.

SOLUÇÃO:

O valor de H para o entreferro é calculado com a expressão

$$H = \frac{\beta}{\mu} \quad \begin{aligned} \mu &= \mu_0 \mu_r \\ \mu_0 &= 4 \pi \times 10^{-7} \\ \mu_r &= 1 \end{aligned}$$

$$H_c = \frac{3 \times 10^{-1}}{4 \pi \times 10^{-7}} = 24 \times 10^4 \text{ A/m}$$

É interessante observar o grande valor de H para esta parte, em virtude da sua grande relutância.

Os produtos Hℓ são iguais a:

$$H_a \ell = 65 \times 10 \times 8 \times 10^{-2} = 52 \text{ ampères-espiras}$$

$$H_b \ell = 275 \times 6 \times 10^{-2} = 16,5 \text{ ampères-espiras}$$

$$Hl_c = 24 \times 10^4 \times 5 \times 10^{-4} = 120 \text{ ampères-espiras}$$

A força magnetomotriz necessária é:

$$F = Hl_a + Hl_b + Hl_c = 52 + 16,5 + 120 = 188,5 \text{ ampères-espiras}$$

A corrente magnetizante é

$$I = \frac{F}{N} = \frac{188,5}{4000} = 0,047 \text{ A}$$

PROBLEMAS

CIRCUITOS MAGNÉTICOS

1 – Um circuito magnético é constituído de lâminas de aço de 4 cm de largura. O núcleo tem 5 cm de espessura, dos quais 8% correspondem a material isolante entre as lâminas. O entreferro é de 2 mm e sua seção efetiva é de 25 cm². A bobina tem 800 espiras. Desprezando as perdas de fluxo, calcular a corrente magnetizante necessária para produzir um fluxo de 0,002 5 Wb no entreferro.

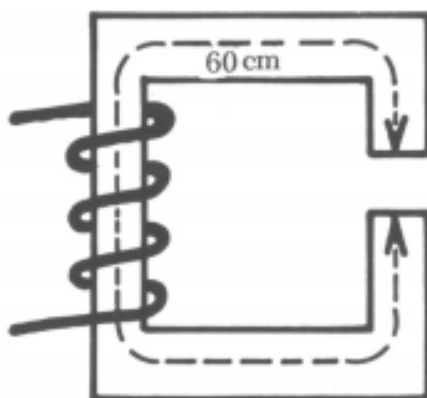


FIG. XIX-5

R.: 2,5 A

2 – Completar o quadro referente ao circuito magnético da Fig. XIX-6. (Desprezar as perdas de fluxo).

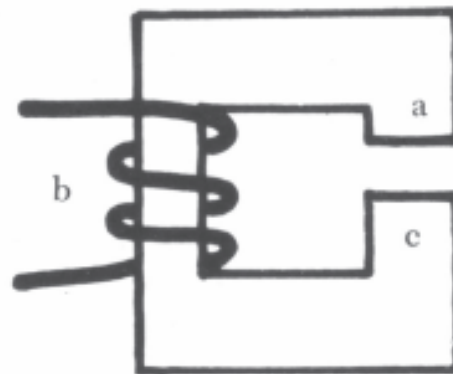


FIG. XIX-6

PARTES	MATERIAL	w (Wb)	S (cm ²)	β (T)	H A/m	L (m)	Hl (A)	F (A)
abc	aço		25			0,6		
ac	ar		25			0,002		

QUADRO

3 – Um circuito magnético é de aço laminado. Na haste central, cuja seção transversal é de 8 cm², estão enroladas 500 espiras. Cada um dos outros dois ramos do circuito tem seção transversal igual a 5 cm². O entreferro tem um milímetro de comprimento. Calcular a corrente necessária para estabelecer um fluxo de 1,3 mWb na haste central, desprezando qualquer perda de fluxo (Ver Fig. XIX-7).

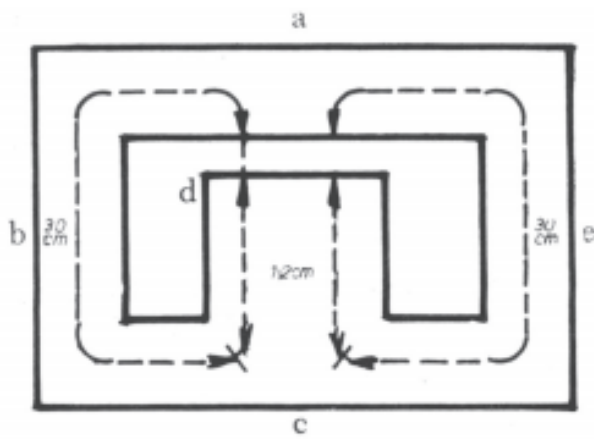


FIG. XIX-7

R.: 3,2 A

4 – Um núcleo magnético de Stalloy tem as dimensões indicadas na Fig. XIX-8. Há um entreferro de 0,12 cm em um dos ramos laterais e uma bobina de 400 espiras na haste central; a seção

transversal desta é de 16 cm^2 , e a de cada ramo lateral é de 10 cm^2 . Determinar a corrente de excitação necessária para produzir um fluxo de 1.000 microwebers no entreferro. Desprezar quaisquer perdas de fluxo.

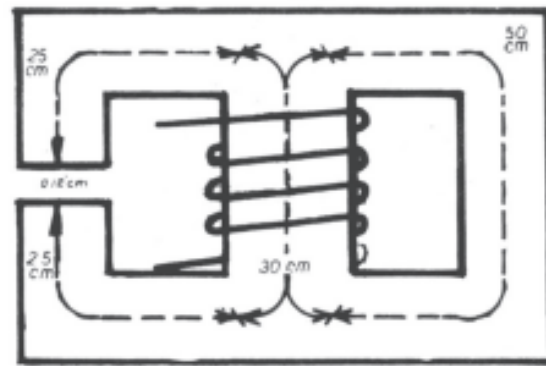


FIG. XIX-8

R.: 5,65 A