

# Magnetizadores para ímãs permanentes

Moisés de Mattos Dias<sup>1</sup>, Lirio Schaeffer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dr. Eng. Prof. Depto. Eng. Elétrica, PUC/RS; <sup>2</sup>Dr.ing. Prof. Depto. Metalurgia, UFRGS.

## Resumo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de dispositivos para magnetização de ímãs permanentes. Estes equipamentos são construídos a partir de circuitos magnéticos compostos por núcleo de ferro, entreferro, onde são colocados os ímãs a serem magnetizados, e bobinas, nas quais circula uma corrente, geralmente elevada, corrente esta necessária para a geração de campo e fluxo magnéticos nos entreferros do circuito magnético. Foram desenvolvidas equações para cálculo de campo magnetizante no entreferro, número de espiras das bobinas, dimensões do núcleo e do entreferro e corrente elétrica nas bobinas. Também foram realizadas medidas de campo magnetizante no entreferro a partir de sensores de campo magnético como o sensor de efeito Hall, estabelecendo relações entre o campo magnético calculado e o campo medido.

## Palavras-chave

Ímã; magnetizadores; circuito magnético; materiais ferromagnéticos.

## Abstract

The aim of this work is the development of a magnetization device for permanent magnets. These devices are built starting from magnetic circuits with a magnetic core, where the magnets are arranged to be magnetized, and a magnetizing coil, where current circulates, providing magnetic field and flux through the core of the magnetic circuit. Equations were developed to calculate magnetizing field through the magnetic core, coil size, core measures and electric current through the coil. Magnetizing field measurements were also carried out in the magnetic core using Hall sensor, establishing relations between calculated magnetic field and measured magnetic field.

## Key words

Magnets; magnetization device; magnetic circuit; ferromagnetic materials.

# Introdução

Para a fabricação de ímãs permanentes, uma etapa é a magnetização, onde as peças a serem magnetizadas são colocadas em circuitos magnéticos compostos por núcleos de ferro e bobinas onde circula corrente elétrica. Esta corrente é fornecida por fontes de tensão contínua, sendo a mais conhecida a descarga capacitiva. Neste tipo de fonte, a tensão alternada obtida a partir da rede elétrica, é retificada para um nível de tensão contínua, e um dispositivo eletrônico de potência carrega um banco com vários capacitores, geralmente ligados em paralelo. Em geral as bobinas utilizadas possuem poucas espiras e baixa impedância. Por este motivo, quando são conectadas aos capacitores, circula uma corrente elétrica que pode atingir até milhares de Amperes. Outros magnetizadores possuem número de espiras elevadas, na ordem de milhares de espiras, reduzindo consideravelmente a corrente para a geração do mesmo campo. Salienta-se que o campo magnético gerado é proporcional, a uma relação entre a corrente e o número de espiras ou relação Ampère.Espiras. Na magnetização, a magnitude do campo magnético aplicado pode atingir até milhões de A/m (sistema de unidades MKS) ou dezenas de kOe (sistema de unidades CGS), sendo por este motivo, necessário fontes de corrente elétrica elevadas com baixa tensão (poucas espiras), ou fontes de tensão elétrica elevada com baixa corrente (grande número de espiras).

## Propriedades magnéticas

A análise das propriedades físicas dos ímãs, dá-se a partir da avaliação de três propriedades magnéticas, que são: retentividade, coercitividade e produto energético. Todas estas propriedades são obtidas a partir da curva de histerese. Esta curva, relaciona campo magnético  $H$  aplicado, a um material com indução magnética  $B$  resultante. Para os materiais magnéticos duros ou ímãs permanentes, a relação  $B \times H$  tem as características mostradas na Figura 1 (KRAUS, 1978; CULLITY, 1967; JILES, 1991).

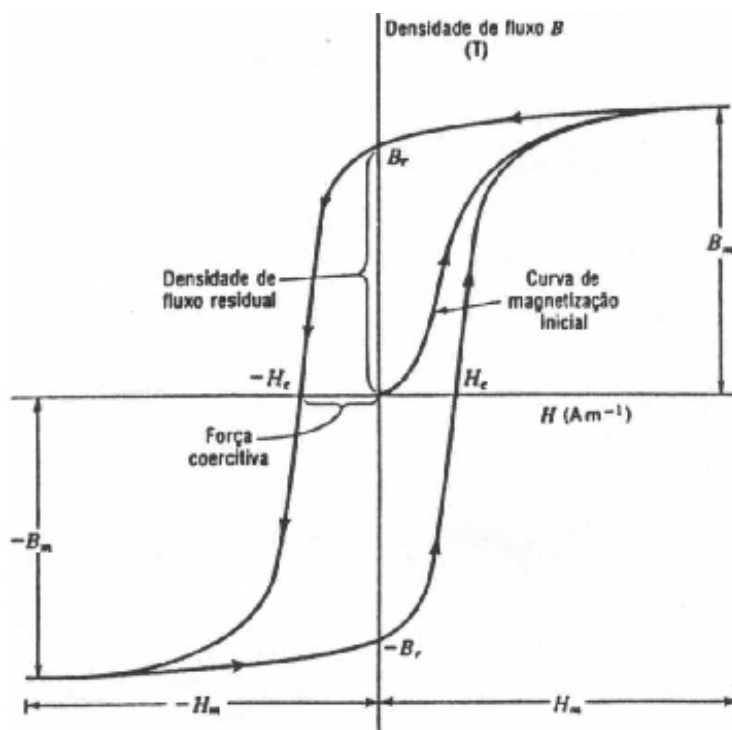


Figura 1 – Ciclo de histerese para um material magnético.

O ponto em que a curva corta o eixo de **B**, no quadrante superior esquerdo, é denominado de *magnetismo remanente* ou *retentividade* (magnetismo remanente máximo)  $B_r$  e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ( $H = 0$ ). No sistema CGS de unidades, muito utilizado para caracterização de materiais magnéticos, B é dado em Gauss [**G**]. O ponto em que a curva corta o eixo de **H** no mesmo quadrante é denominado de *campo desmagnetizante*, *força coercitiva* ou *coercitividade* (campo desmagnetizante máximo)  $H_c$  e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ( $B = 0$ ). No sistema CGS H tem como unidade o Oersted [**Oe**]. Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético  $BH_{max}$ , cuja unidade no sistema CGS é Mega Gauss Oersted [**MG.Oe**] e está associado com a densidade de energia armazenada num ímã permanente. O produto energético também pode ser obtido a partir da curva de histerese, e representa um ponto de coordenadas da curva no quadrante superior esquerdo, no qual o produto de campo por indução possui o valor máximo (KRAUS, 1978; CULLITY, 1967; JILES, 1991).

## Magnetização

Uma curva típica de uma material magnético é mostrado pela curva sólida da Figura 2-a. Para fins de comparação, a figura mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes  $\mu$  de 1, 10, 100 e 1000. A Figura 2-b mostra uma gráfico de permeabilidade relativa como função do campo **H** aplicado. A permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização onde a relação **B** e **H** é máxima, e é designada por  $\mu_{max}$  (KRAUS, 1978; CULLITY, 1967; JILES, 1991).

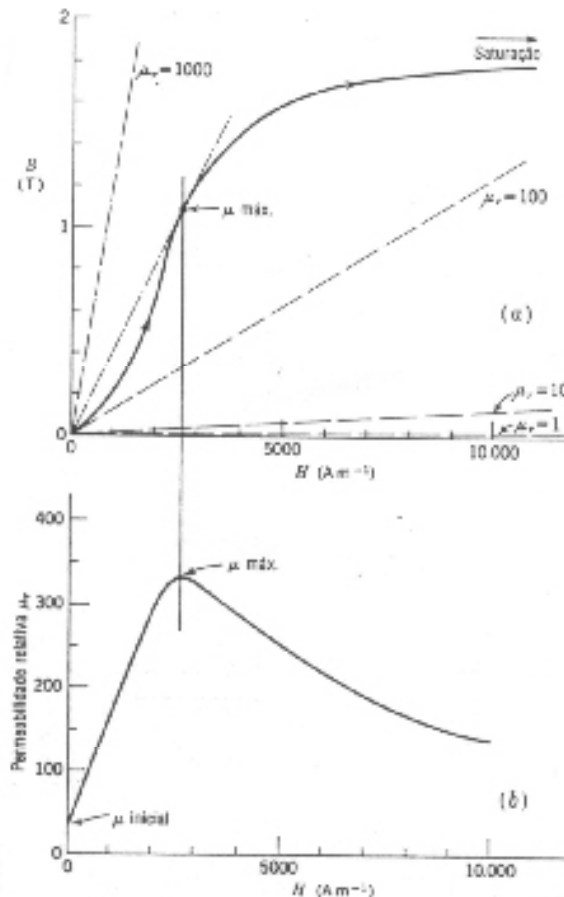


Figura 2 - (a) Curva de magnetização típica - (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H (KRAUS, 1978).

Quando  $H$  é aumentado, o valor de  $B$  aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Nos valores suficientemente altos de  $H$  a curva tende a ficar assintótica. Esta condição é chamada de *saturação magnética*. Assim, a curva de magnetização inicial pode ser dividida em duas seções: (1) a seção íngreme e (2) a seção plana, estando o ponto  $P$  no lugar superior da parte íngreme conforme mostra a Figura 3. A seção íngreme corresponde à condição de *fácil magnetização*, enquanto a seção plana, corresponde à condição de *difícil magnetização* (KRAUS, 1978; CULLITY, 1967; JILES, 1991).

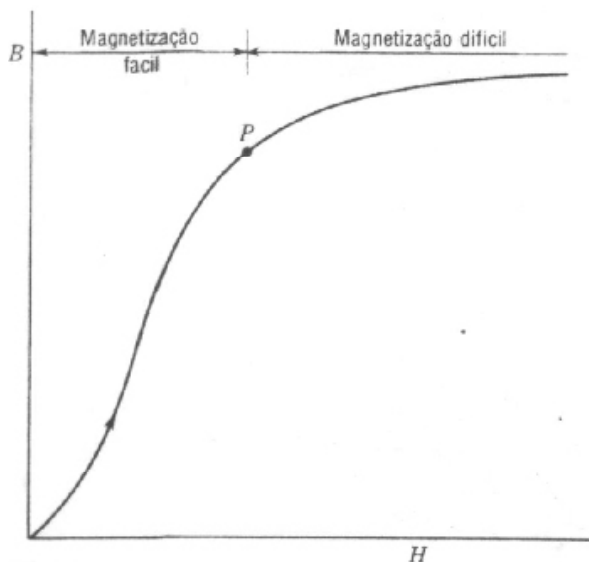


Figura 3 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial (KRAUS, 1978).

Para entender o fenômeno da magnetização, pode-se considerar um fragmento de um material magnético. Este fragmento, geralmente, não consiste de um único cristal ou grão, mas de agregados de grãos que por sua vez se dividem nos domínios magnéticos, de acordo com a Figura 4-a. Os domínios orientam-se de tal forma que a energia seja mínima, ou seja, os domínios adjacentes estão com polaridade contrária, diminuindo a energia no campo magnético, e a magnetização total é nula. Com a aplicação de um campo magnético  $H$  (Figura 4-b), alguns domínios com polaridade opostas ou perpendiculares ao campo aplicado, tornam-se instáveis e giram rapidamente para outro sentido de fácil magnetização, na mesma direção do campo ou bem próximo a este. Aumentando-se mais o campo aplicado (Figura 4-c), todos os domínios alinham-se na direção do campo. Entretanto, este aumento de magnetização é mais difícil e podem ser necessários campos muito fortes para a saturação (KRAUS, 1978; CULLITY, 1967; JILES, 1991).



Figura 4 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo (KRAUS, 1978).

# Magnetizador experimental

Geralmente os ímãs são em forma de anel, cilindro ou retangular, conforme mostra a Figura 5-a, e sua magnetização é no sentido axial com um pólo norte numa superfície e um pólo sul na outra, de acordo com o esquema das linhas de fluxo e polarização de um ímã cilíndrico mostrado na Figura 5-b.

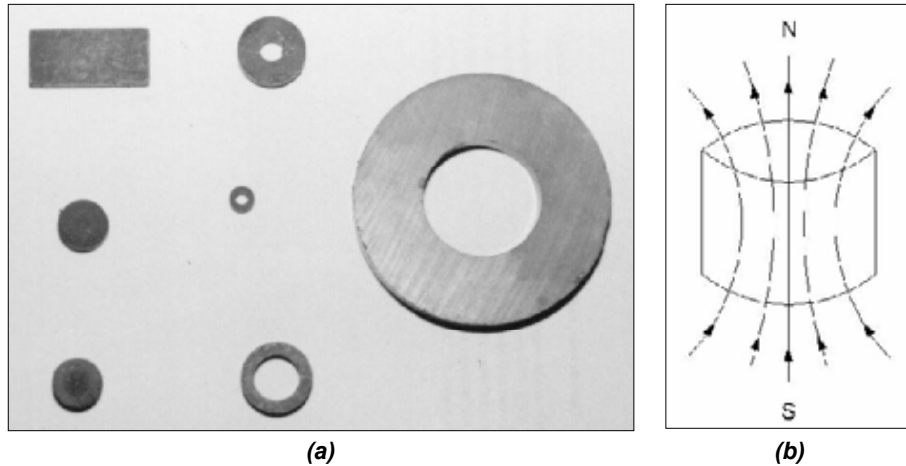


Figura 5 - (a) Fotografia de tipos de ímãs fabricados: cilíndrico, em forma de anel e retangular; (b) esquema da polarização do ímã cilíndrico.

Para a magnetização de um ímã é utilizado um dispositivo que consiste basicamente de um núcleo de ferro com entreferro com a disposição de bobinas sobre este núcleo, conforme mostra a Figura 6-a. O núcleo deste magnetizador foi construído de aço magnético (aço 1045 - material ferromagnético). As bobinas foram enroladas com fio maciço de cobre esmaltado escala AWG 19 e cada bobina possui 500 espiras. Nas bobinas circula uma corrente elétrica que gera o campo magnético  $H$  necessário, que se concentra principalmente no entreferro, onde é colocado o ímã a ser magnetizado. Este campo magnético aplicado é o campo magnetizante. A corrente elétrica que alimenta as bobinas, é gerada por fontes de energia elétrica, capaz de fornecer tensão ou corrente elevadas, conforme as características das bobinas. Se as bobinas possuem um grande número de espiras, a sua impedância será elevada e a fonte de energia elétrica deve gerar baixa corrente com tensão elétrica elevada. Contudo, se as bobinas possuem poucas espiras, a sua impedância será baixa, e a fonte de energia elétrica deverá gerar alta corrente, porém com baixa tensão.

O campo necessário à magnetização de um ímã é um valor estimado em aproximadamente duas vezes a coercitividade. Nestas condições, é provável que haja uma saturação do ímã e este adquire com seu magnetismo remanente máximo (retentividade característica). Para testar o magnetizador, (Figura 6-b) este foi conectado a uma fonte de tensão elétrica contínua ajustável à direita, e um gaussímetro, à esquerda, com o sensor de campo colocado no local onde o ímã é magnetizado, ou seja no entreferro do núcleo.

A fonte mostrada é uma fonte de tensão elétrica contínua ajustável com retificação a partir de uma ponte semicontrolada, com tensão ajustada através do disparo de tiristores tipo SCR. A tensão máxima é de aproximadamente 200 V e a corrente está limitada em 30 A. A função dos capacitores é filtrar o sinal de corrente. O gaussímetro mostrado é um medidor de densidade de fluxo magnético construído a partir de um sensor de efeito Hall linear. A partir de alguns pontos de tensão ou correntes elétricas obtidas e sua relação com o campo gerado, é possível estabelecer uma equação para o campo magnético no entreferro em função da tensão ou corrente elétrica da fonte.

Como exemplo, cita-se que, para a magnetização de ímãs de ferrita de estrôncio, que apresentam  $H_c$  de 4 kOe, o campo para magnetização deve ser o dobro ou seja 8 kOe. Assim, através das medições do gaussímetro, ajusta-se uma corrente elétrica da fonte capaz de gerar

este campo. Como a permeabilidade magnética relativa dos ímãs tem a mesma ordem de grandeza que o ar, para a magnetização do ímã, simplesmente, retira-se o sensor do entreferro e coloca-se o ímã, ajustando a mesma corrente, o que irá gerar o mesmo campo magnetizante no entreferro sobre o ímã. A Figura 6-c mostra um ímã sendo magnetizado. Deve-se salientar que o gaussímetro mede tanto campo magnético H como densidade de fluxo magnético B, uma vez que, no vácuo, no sistema CGS de unidades, a relação entre B [kGauss] e H [kOe] é unitária.

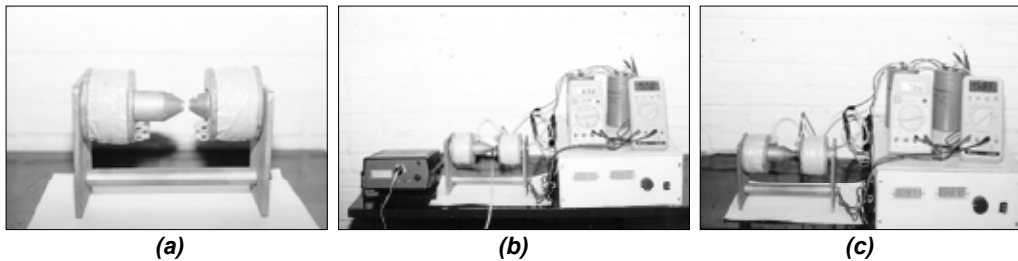


Figura 6 - (a) Fotografia do núcleo de um magnetizador acoplado às bobinas; (b) fotografia do magnetizador conectado a fonte de tensão e um gaussímetro; (c) fotografia do magnetizador com um ímã sendo magnetizado.

## Equacionamento das grandezas magnéticas

A Figura 7-a mostra o diagrama esquemático do magnetizador proposto na Figura 6, com a indicação do caminho do fluxo magnético. A analogia de circuitos elétrico-magnéticos mostra que um circuito magnético pode ser equacionado como um circuito elétrico, de tal forma que (FITZGERALD et al, 1990; NASAR, 1987):

<b>I (corrente elétrica)</b>	$\rightarrow$	$\varphi$ (fluxo magnético)
<b>R (resistência elétrica)</b>	$\rightarrow$	$\mathfrak{R}$ (relutância magnética)
<b>V (tensão elétrica)</b>	$\rightarrow$	$\mathfrak{S}$ (força magnetomotriz)

A partir desta analogia é possível então calcular as grandezas envolvidas no circuito magnético a partir das leis de Ohms e Kirchhoff, equacionamentos utilizados para resolução de circuitos elétricos (FITZGERALD et al, 1990; NASAR, 1987). Assim, é possível esquematizar o magnetizador da Figura 6 como um circuito elétrico, mostrado na Figura 7-b.

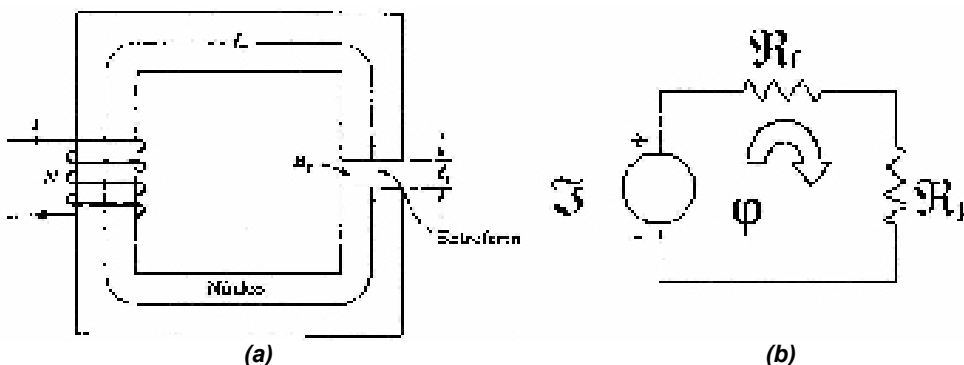


Figura 7 - (a) Diagrama esquemático do magnetizador associado a bobinas; (b) circuito elétrico equivalente.

As grandezas envolvidas são definidas como (FITZGERALD et al, 1990; NASAR, 1987):

$\mathfrak{R}_f$  = relutância do núcleo de ferro [ $H^{-1}$ ]

$\mathfrak{R}_g$  = relutância do entreferro (gap) [ $H^{-1}$ ]

$\mathfrak{S}$  = força magnetomotriz [A.esp.]

$\varphi$  = fluxo magnético total [Wb]

Uma análise da Figura 7-a permite concluir que, quando circula corrente pelas bobinas,

é gerado um campo magnético que se concentra no entreferro do circuito magnético. Existindo campo magnético, existe uma indução magnética e um fluxo magnético total. Em circuitos magnéticos, o caminho preferencial do fluxo se dá através dos caminhos de menor relutância ou maior permeabilidade relativa (FITZGERALD et al, 1990; NASAR, 1987). Assim, conclui-se que o caminho do fluxo magnético se dá através do núcleo de ferro e entreferro.

A partir de uma analogia de circuitos elétrico-magnéticos e da lei de Kirchhoff das tensões, resulta (FITZGERALD et al, 1990; NASAR, 1987):

$$\varphi = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}_T} = \frac{N \cdot I}{\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_f} \quad (1)$$

onde  $\mathfrak{R}_T$  = relutância total do circuito magnético [ $H^{-1}$ ]

$NI = \mathfrak{F}$  = relação [Ampère.espiras]

Uma vez que, no núcleo, a permeabilidade relativa é elevada, praticamente todo o campo magnético gerado pela bobina se concentra no entreferro. Portanto, é possível considerar somente a relutância do entreferro  $\mathfrak{R}_g$  dada por (FITZGERALD et al, 1990; NASAR, 1987):

$$\mathfrak{R}_T = \mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_o A_g} \quad [2]$$

onde  $l_g$  = comprimento do entreferro [m]

$A_g$  = área da seção transversal do entreferro [ $m^2$ ]

$\mu_o$  = permeabilidade do vácuo (aproximadamente a mesma do ar) [ $H/m$ ]

Substituindo a equação 2 na equação 1 resulta

$$N \cdot I = \varphi \mathfrak{R}_T = \varphi \frac{l_g}{\mu_o A_g} \quad [3]$$

Como (FITZGERALD et al, 1990; NASAR, 1987):

$$B = \mu H = \frac{\varphi}{A} \quad [4]$$

onde B = densidade de fluxo (ou indução) magnético [T]

$\mu$  = permeabilidade magnética do meio [ $H/m$ ]

Resulta

$$NI = H l_g \quad [5]$$

A equação 5 é a equação básica de circuitos eletromagnéticos e também pode ser obtida a partir da lei de Ampère. Conclui-se desta equação que a relação *Ampère.espira* é idêntica ao campo magnético **H** em todo o caminho **l** (FITZGERALD et al, 1990; NASAR, 1987).

## Dimensionamento das bobinas

Para o dimensionamento da bobina a ser acoplada no núcleo para magnetização (Figura 8), inicialmente estima-se, um campo magnético a ser aplicado, e, em função disso, defini-se a geometria do núcleo, a bobina associada e a fonte de tensão elétrica para a alimentação da bobina, uma vez que estão intrinsecamente relacionados, conforme se pode observar a partir do desenvolvimento das equações posteriores.

Para o cálculo da relação Ampère-espira da bobina, parte-se de uma estimativa de campo **H** aplicado na magnetização que dependerá da espécie de ímã a ser magnetizado. Geralmente esta estimativa é dada em kOe (unidade CGS para campo magnético), sendo portanto necessário uma transformação de unidades para o sistema MKS. A relação Ampère-espira **NI** em função do campo magnético é dado pela equação 5.

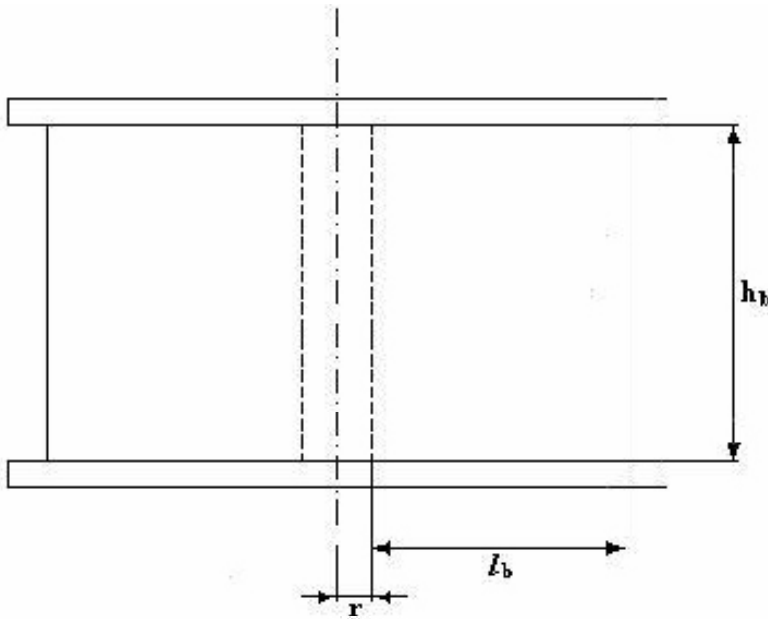


Figura 8 - Diagrama esquemático da bobina.

A fonte de tensão  $V$  para alimentação fornece uma corrente  $I$ . Portanto, a resistência interna da bobina  $R_b$  fica

$$R_b = \frac{V}{I} = N p_m \frac{K_2}{1000} \quad [6]$$

onde  $N$  = número de espiras

$p_m$  = perímetro médio das espiras [m]

$K_2$  = resistência por comprimento do fio [ $\Omega$ /km]

O raio médio  $r_m$  [m] é dado por

$$r_m = \left( \frac{l_b}{2} + r \right) \quad [7]$$

onde  $r$  = raio do núcleo [m]

$l_b$  = largura da área ocupada pela bobina [m]

Combinando as equações 6 e 7 resulta

$$V = NI(l_b + 2r) \frac{K_2}{1000} \pi \quad [8]$$

A área  $A_b$  ocupada pela bobina é calculada como

$$A_b = h_b l_b = \frac{K_1}{10^6} N \quad [9]$$

onde  $K_1$  = área da seção transversal do fio [ $\text{mm}^2$ ]

$h_b$  = altura da área ocupada pela bobina [m]

Combinando as equações 8 e 9 resulta

$$V = NI \left( \frac{K_1 N}{10^6 h_b} + 2r \right) \frac{K_2}{10^3} \pi = \frac{NI}{10^9 h_b} K_2 \pi (K_1 N + 2rh_b \cdot 10^6) \quad [10]$$



Através das equações 1 a 10, é possível dimensionar a bobina considerando:

- O campo magnético  $H$  necessário à magnetização; este é um valor estipulado que depende do tipo de ímã.
- A tensão  $V$  e a corrente elétrica  $I$  da fonte de alimentação; ambas tem um limite máximo e podem ser previamente fixadas de acordo com a máxima potência gerada pelo equipamento. Deve-se ter cuidado para que o valor máximo de corrente  $I$ , não ultrapasse o limite suportado pelo tipo de fio escolhido.
- A escolha do tipo de fio, a partir da escala AWG; assim as variáveis  $K_1$  e  $K_2$  e a corrente máxima  $I$  já ficam definidas.
- O comprimento do entreferro  $l_g$ , a altura da bobina  $h_b$  e raio do núcleo  $r$ . Restará portanto a variável  $N$  (número de espiras) a ser calculada, como:

$$N = \frac{10^9 h_b (10^3 V - 2\pi H h_b K_2 r)}{H I_g K_1 K_2 \pi} \quad [11]$$

Uma vez que o campo magnético  $H$  aplicado na magnetização é um valor estimado, as expressões para o dimensionamento da bobina não levam em consideração perdas como fluxo magnético disperso, e campo magnético no núcleo.

Entretanto, conforme experimentos realizados, a diferença entre o campo calculado e aquele medido diferem grandemente, e esta diferença depende, além dos fatores citados anteriormente, de muitos outros como forma e dimensões do magnetizador, posição das bobinas no núcleo, forma do sinal de corrente que alimenta as bobinas e outros.

Por este motivo, o único método seguro para o dimensionamento da bobina e cálculo da relação Ampère.espira para geração do campo magnético no entreferro, será montando a mesma e medindo o campo no entreferro com um sensor de campo magnético como o sensor Hall.

## Geração das correntes elétricas para alimentação da bobina

A indutância  $L$ , desta bobina, pode ser calculada como (FITZGERALD et al, 1990; NASAR, 1987)

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{NBA_g}{I} = \frac{\mu_o N^2 A_g}{l_g} \quad [ \quad 1 \quad 2 \quad ]$$

A partir do valor da indutância  $L$  e da resistência interna da bobina  $R_b$ , é possível obter uma expressão  $I(t)$  para a corrente (HAYT, 1975):

$$I(t) = \frac{V}{R_b} \left(1 - e^{-\frac{R_b}{L}t}\right) \quad [ \quad 1 \quad 3 \quad ]$$

Como um indutor (bobina) real é representado por uma resistência interna e uma indutância, de acordo com a teoria clássica de análise de circuitos elétricos, este pode ser representado por um circuito RL (HAYT, 1975).

Se este circuito RL for ligado a uma fonte de tensão contínua através de uma chave liga/desliga, após a chave ser ligada, um tempo depois denominado uma *constante de tempo*  $\tau$ , a corrente atinge 63% de seu valor em regime permanente conforme Figura 9, onde regime permanente é a corrente em um tempo tendendo a infinito. Para um circuito RL a constante de tempo é calculada como  $\tau = L/R$  (HAYT, 1975).

Fazendo  $t = 4\tau$ , a corrente atinge 98% de seu valor em regime permanente. Por este motivo, para efeito de cálculo em análise de circuitos elétricos, considera-se o tempo decorrido até  $5\tau$  como o regime transitório, e após este tempo, como regime permanente quando então, a corrente estabiliza e a indutância passa a não influenciar mais, restando tão somente a influência da resistência interna (HAYT, 1975).

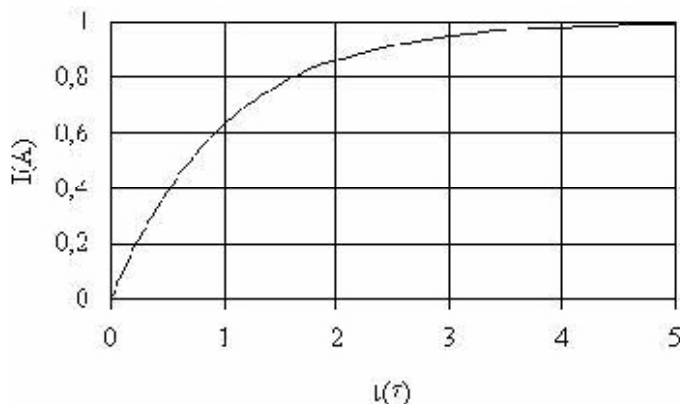


Figura 9 - Corrente  $I$  em função do tempo para um circuito RL.

Entretanto, se as compactações são realizadas lentamente, a constante de tempo e o conseqüente tempo de estabilização da corrente não precisam ser avaliadas com precisão mas somente estimadas. Apesar disto, não haverá erros na estimativa do campo magnético, se o valor da corrente através do fio da bobina for medido com um *amperímetro* colocado em série entre a fonte e a bobina.

Se o tempo de utilização das bobinas for pequeno, no máximo alguns segundos com intervalos de alguns minutos, não ocorrerá aquecimento considerável nas bobinas em virtude da inércia térmica, desde que a corrente que circula pela bobina não ultrapasse em 10 vezes o valor nominal da corrente especificada para o tipo de fio escolhido.

Evidentemente, para magnetizações rápidas e repetitivas, a indutância e a impedância interna da bobina, o tempo de estabilização da corrente, a corrente máxima do fio e a potência dissipada, devem ser levadas em consideração, inclusive para o dimensionamento do núcleo e da bobina.

Para o cálculo da relação Ampère-espira, o projetista deve levar em consideração a fonte de alimentação (tensão contínua) para a bobina, pois o campo magnético gerado é proporcional à corrente elétrica e o número de espiras da bobina (relação  $NI$ ), sendo que a corrente é fornecida pela fonte. Portanto, para campos magnéticos elevados, a corrente ou o número de espiras deve ser grande.

Correntes elevadas, acima de 100 A, são difíceis de controlar, pois a fonte deve ser de tensão contínua, o que implica em retificação e controle da tensão da rede elétrica e, em alguns casos, armazenamento desta energia elétrica em acumuladores.

Número elevado de espiras, aumenta a impedância interna da bobina (tanto a resistência como a reatância indutiva), e isto implicará numa fonte de tensão elevada, aumentando a potência dissipada internamente nas bobinas, além do risco de se trabalhar com equipamentos alimentados com alta tensão. Deve-se salientar que em muitos casos a corrente não é constante e a reatância indutiva pode influenciar.

Quando for necessário uma corrente muito grande à uma tensão fixa, mesmo por um período curto de tempo, é desaconselhável utilizar um equipamento ligado diretamente à rede elétrica. Neste caso utiliza-se dispositivos armazenadores de energia como capacitores e baterias, que podem ser carregados durante um período maior que o tempo de descarga. Portanto, a corrente de carga do dispositivo armazenador será menor que a corrente de descarga.

A seguir estão relacionados os principais dispositivos que podem ser utilizados como fontes de tensão contínua:

- Bateria ou banco de baterias
- Capacitores ou banco de capacitores
- Fonte chaveada
- Retificação em ponte controlada ou semicontrolada por tiristores
- Transformador e retificação com diodos

## Medida experimental

O magnetizador da figura 6 foi submetido a testes experimentais de campo magnético, sem ímãs no entreferro, onde o campo magnético no entreferro foi medido a partir de um sensor Hall. Constatou-se que, para um campo de aproximadamente 8 kOe, numa altura de cavidade de 0,6 cm, mediu-se uma corrente elétrica de aproximadamente 15 A, o que dá uma relação Ampère. espira (produto  $N.I$ ) de:

$$N.I = 15A.(500esp + 500esp) = 15.000 A.esp.$$

Assim, uma relação entre campo magnético e produto Ampère.espira pode ser estabelecido, e campos diferentes podem ser obtidos bastando que se altere a corrente elétrica nas bobinas do magnetizador. No caso do magnetizador mostrado na Figura 6, esta relação pode ser considerada aproximadamente linear até a saturação do núcleo.

## Magnetizadores multipolar

A polarização de ímãs toroidais multipolar, pode ser axial (Figura 10-a) ou radial (Figura 10-b). A Figura 11-a mostra um dispositivo para magnetização radial de ímãs toroidais com 4 pólos. O sentido das linhas de campo alternam-se em cada bobina para produzir pólos Norte e Sul. As bobinas são alimentadas com corrente contínua, sendo que duas bobinas são alimentadas com corrente num sentido, para produzir os pólos Norte, e as outras duas alimentadas com corrente em outro sentido, para produzir os pólos Sul. A Figura 11-b mostra a polarização, e a direção das linhas de fluxo em cada bobina em função do sentido da corrente elétrica nas espiras.

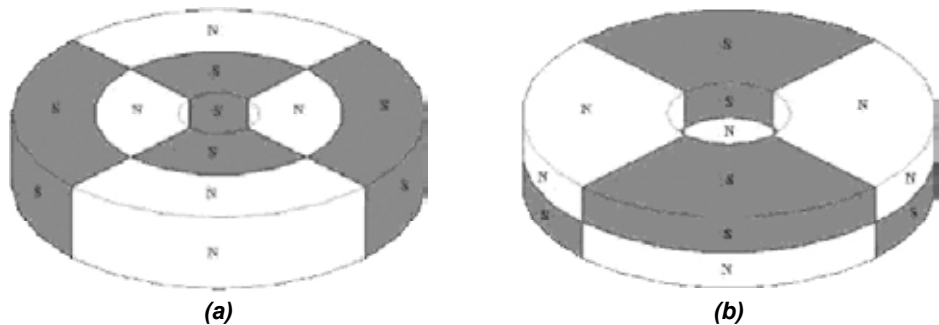


Figura 10 - Polarização de ímãs toroidais multipolar com magnetização (a) axial; (b) radial

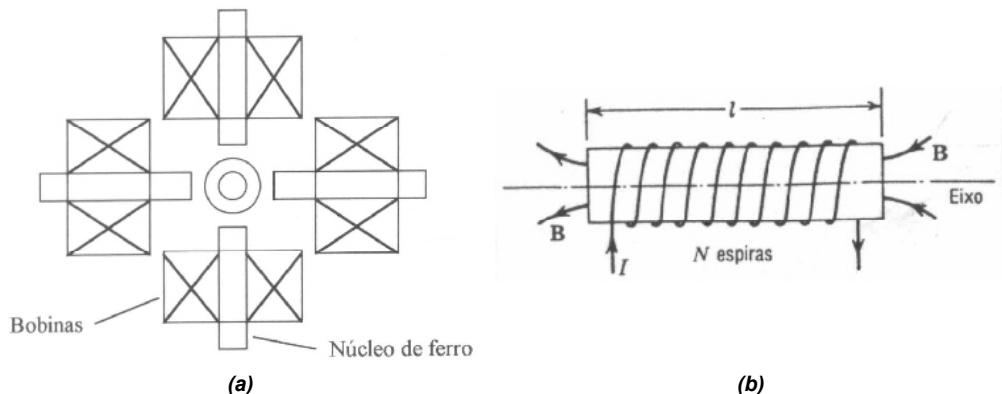


Figura 11 - (a) Dispositivo para magnetização radial de ímãs toroidais com 4 pólos; (b) direção das linhas de fluxo em cada bobina em função do sentido da corrente elétrica nas espiras.

## Conclusão

Geralmente, para magnetização de ímãs permanentes, é necessário um campo magnético  $H$  elevado (dezenas de kOe), e isto implica em corrente ou número de espiras elevado.

Correntes elevadas, acima de 100 A, são difíceis de controlar, pois a fonte deve ser de tensão contínua, o que implica em retificação e controle da tensão da rede, para alimentar as bobinas. Número elevado de espiras, aumenta a impedância (principalmente a resistência) da bobina, e isto implica numa fonte de tensão contínua de alimentação de valor elevado, o que aumenta a potência dissipada internamente nas bobinas, além do risco em trabalhar com equipamentos alimentados com alta tensão.

O projetista do equipamento deve encontrar um equilíbrio entre estes diversos fatores, levando em consideração o número de espiras, características do fio, corrente e tensão elétrica da fonte de alimentação, potência dissipada e indutância da bobina, caminho médio do fluxo magnético, disposição geométrica da bobina e forma do núcleo.

Como as características magnéticas dos materiais para a construção dos núcleos, geralmente não são conhecidas, o ideal para desenvolver um magnetizador é estipular uma determinada relação Ampère.espira, montar o magnetizador e posteriormente medir o campo no entreferro com um gaussímetro. Se o campo magnetizante não for o suficiente, aumenta-se o número de espiras das bobinas e/ou a corrente da fonte, uma vez que o campo magnético é proporcional a relação Ampère.espiras.

## Referências Bibliográficas

CULLITY, B.D. **Introduction to magnetic materials**. Adison. Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967. 514p.

FITZGERALD, A.E, KINGSLEY, Jr. C.; UMANS, S.D. **Electric Machinery**. New York, McGraw-

HAYT Jr., W.H.; KEMERLY, J.E. **Análise de Circuitos em Engenharia**. S. Paulo, Mcgraw Hill do Brasil, 1975. 623p.

JILES, D. **Introduction to magnetism and magnetic materials**. London, Chapman and Hall, 1991. 440p.

KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. **Eletromagnetismo**. R.Janeiro, Guanabara, 1978. 780p  
Hill Inc, 1990. 599p.

NASAR, S.A. **Handbook of Electric Machines**. New York, McGraw-Hill, 1987.