

Faculdade Pitagoras
Unidade Divinópolis – Minas Gerais.

Engenharia Elétrica

Disciplina: Materiais Elétricos
Prof. Eng. Alexandre Dezem Bertozzi, Esp.
www.bertozi.com

Tema 03: Efeitos de Campo Magnético

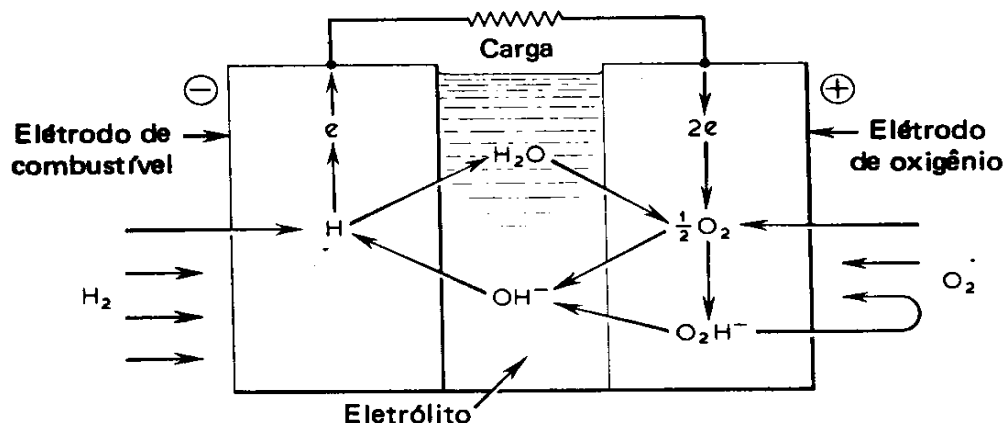


Figura 2.8 Célula de combustível

Numa reação completa combinam quimicamente (não explosivamente) 2 kg de hidrogênio e 16 kg de oxigênio, para formar 18 kg de água com uma liberação de 400 MJ de energia elétrica. Para cada kWh a célula produz 0,33 litros de água, a qual não deve ser permitida em excesso para enfraquecer o eletrólito. A f.e.m. do circuito aberto é 1,1 V, enquanto que a voltagem terminal é cerca de 0,9 V com uma distribuição de 1 kA/m² de área plana.

EFEITOS DE CAMPO MAGNÉTICO

Fluxo magnético

O espaço rodeando os ímãs permanentes e circuitos elétricos transportando correntes atinge um estado peculiar no qual ocorrem vários fenômenos. O estado é descrito dizendo que o espaço é percorrido por um *campo magnético de fluxo*. O campo é cartografado por uma disposição de *linhas de indução* dando a força e direção do fluxo. A Figura 2.9 dá uma indi-

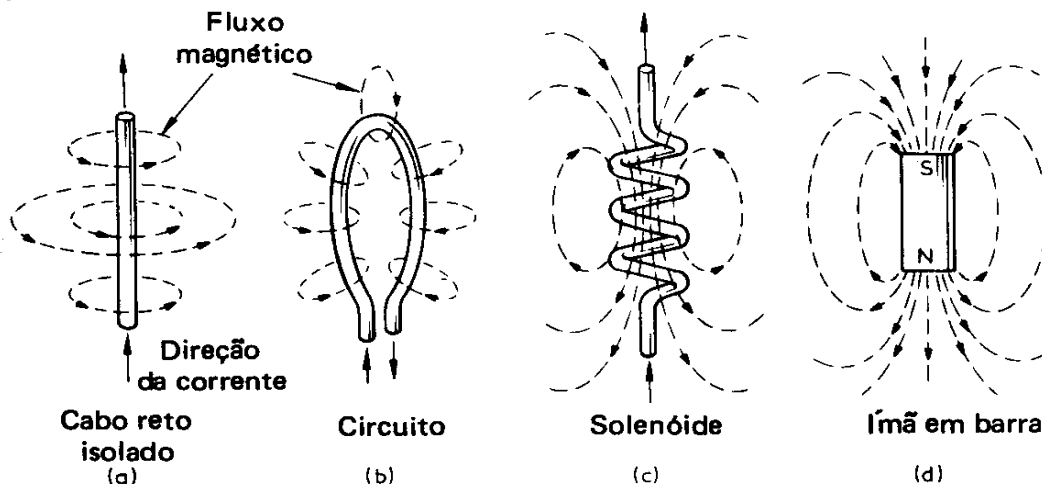


Figura 2.9 Campos magnéticos simples

cação grosseira do padrão do fluxo para os três casos simples de campo magnético devido a uma corrente, e para o caso de um ímã em barra. A semelhança essencial dos casos (c) e (d) é evidente. Os diagramas indicam as convenções de polaridade, direção de fluxo e direção da corrente adotada. As linhas magnéticas de indução formam pequenas voltas num *circuito magnético* ligado completamente ou em parte pela corrente do circuito.

Para a estimativa da quantidade de fluxo magnético produzido por um determinado circuito, os engenheiros usam um conceito associado à f.e.m. de um circuito elétrico. O fluxo magnético é "causado" pela corrente numa bobina magnetizante enquanto que uma

corrente elétrica é "causada" num circuito elétrico pela f.e.m. O termo *força magnetomotriz* é usado para a quantidade magnética análoga. Realmente, nada está em movimento num campo magnético; o fluxo, apesar do seu nome, não flui. Somente os elétrons se movem, numa bobina magnetizante.

Força magnetomotriz

A f.m.m. produzida por uma bobina de N espiras transportando uma corrente I é $F = NI$ ampère-espiras. Isto acontece em qualquer percurso fechado percorrido pela corrente I . Num determinado ponto num campo magnético em espaço livre a f.m.m. por unidade de comprimento ou força magnetizante H dá origem a uma densidade de fluxo magnético $B_0 = \mu_0 H$, onde $\mu_0 = 4\pi/10^7$. Se o meio onde existe o campo tem uma permeabilidade relativa μ_r , a densidade de fluxo estabelecida é

$$B = \mu_r B_0 = \mu_r \mu_0 H = \mu H$$

A soma de $H \cdot dl$ em torno de qualquer percurso de um circuito de N espiras percorrido por uma corrente I é a f.m.m. total. Se a distribuição de H é conhecida, a densidade de fluxo magnético B ou B_0 pode ser achada em todos os pontos no campo, e um conhecimento da área a do percurso magnético dá $\Phi = Ba$, fluxo magnético total.

Circuitos magnéticos

Somente em alguns casos de simplicidade geométrica, o fluxo pode, devido a um determinado sistema de correntes, ser achado precisamente. Entre estes, estão os seguintes:

Fio isolado reto. Figura 2.10 (a). Este não é um caso estritamente aplicável, mas os resultados são úteis. Admitamos uma corrente de 1 A. A f.m.m. em torno de qualquer percurso fechado ligado é portanto 1A-t. A experiência indica que o campo magnético é simétrico, e concêntrico com, o eixo do fio. Em torno de um percurso fechado de raio x metros haverá uma distribuição uniforme de f.m.m. de modo que

$$H = F/2\pi x = 1/2\pi x$$

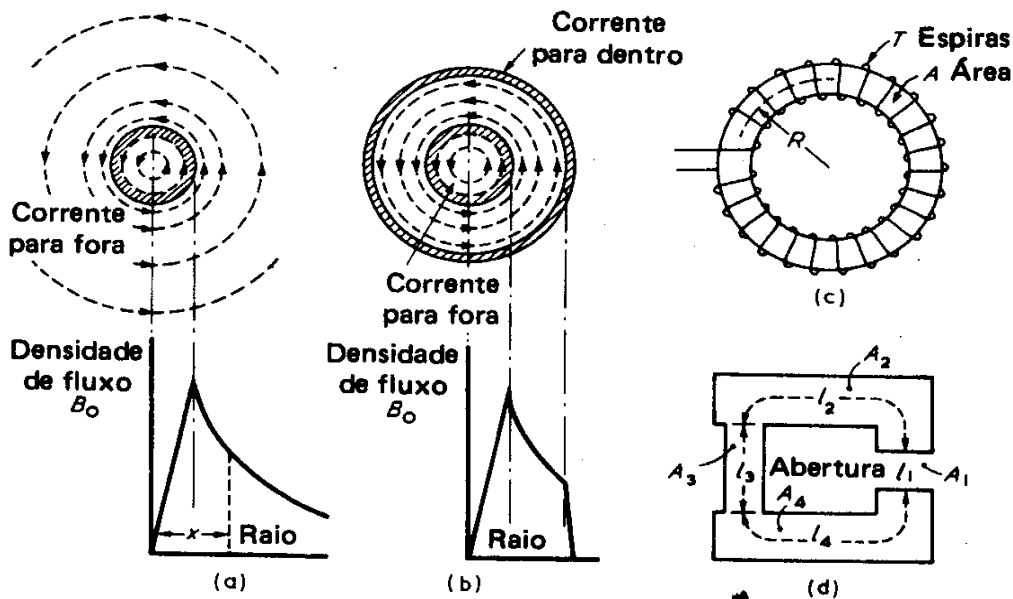


Figura 2.10 Circuitos magnéticos

- (a) Fio isolado reto
- (b) Condutores concêntricos
- (c) Toróide
- (d) Circuito de ferro composto

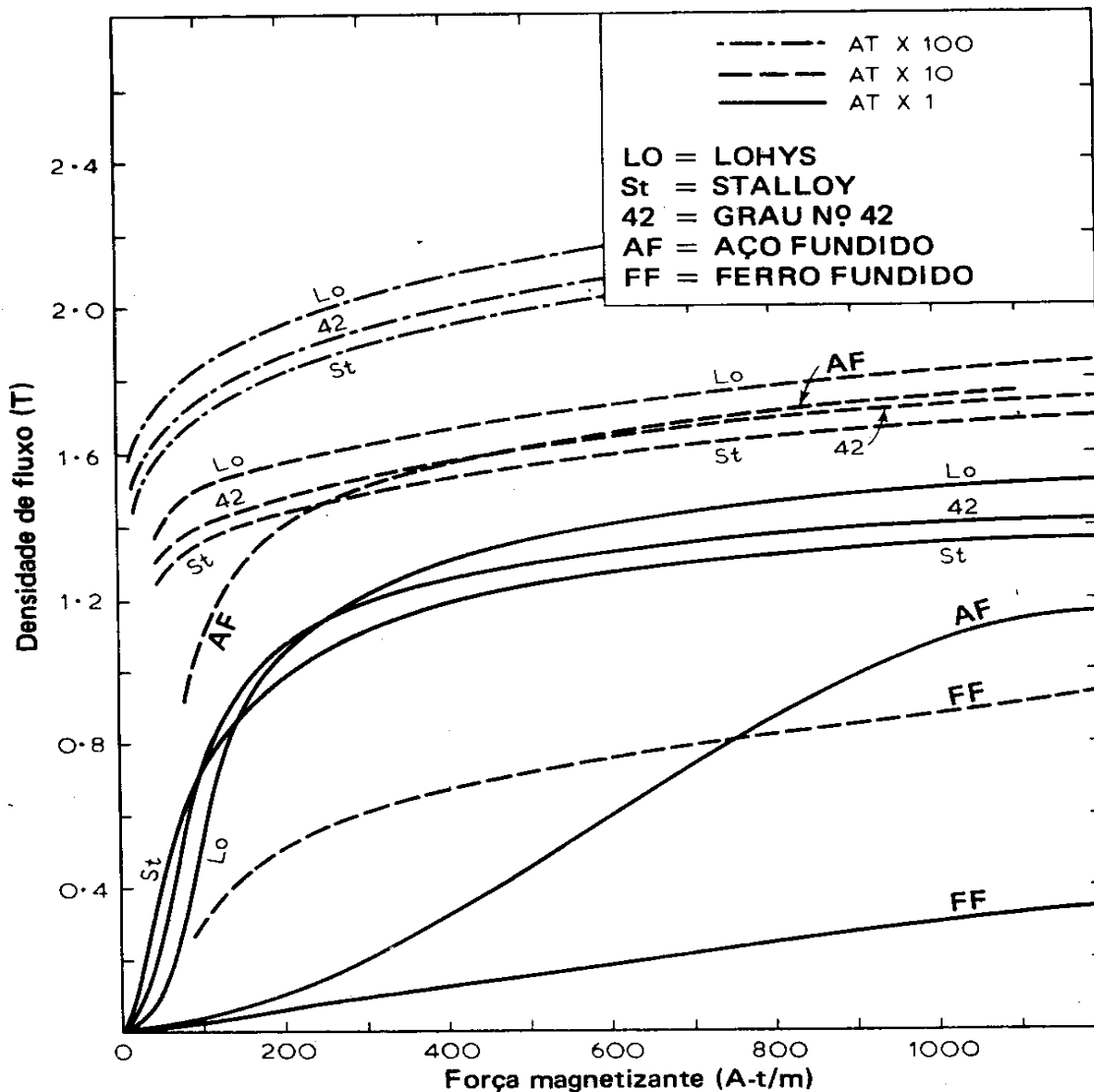


Figura 2.11 Curvas de magnetização

Conseqüentemente, em espaço livre a densidade de fluxo no raio x será

$$B_0 = \mu_0 H = \mu_0 / 2\pi x \text{ tesla (T) ou webers por metro quadrado.}$$

Num meio de permeabilidade constante μ_r , a densidade do fluxo no raio x será

$$B = \mu_r B_0 = \mu_r \mu_0 / 2\pi x \text{ tesla.}$$

Haverá um fluxo magnético seguindo os percursos fechados circulares dentro da seção transversal do próprio fio. Em qualquer raio x , a f.m.m. será $F = (x/r)^2$ porque um percurso circular dentro do condutor liga somente aquela parte da corrente que está fechada dentro dele. A f.m.m. por metro é $H = F/2\pi x = x/2\pi r^2$ e a densidade de fluxo correspondente em um condutor não-magnético é

$$B_0 = \mu_0 H = \mu_0 x / 2\pi r^2,$$

e μ_r vezes a mesma se o condutor tem uma permeabilidade μ_r .

Condutores concêntricos. Figura 2.10 (b). Aqui somente o condutor interno contribui para o fluxo magnético no espaço entre os condutores e ele mesmo, porque todo esse fluxo pode somente ligar a corrente interna. A distribuição de fluxo é achada exatamente como

no caso precedente, mas pode agora ser somada em limites definidos. Se o condutor externo é suficientemente fino radialmente, o fluxo no espaço do condutor interno, por comprimento de metro axial do sistema, é

$$\Phi = \int_r^R \frac{\mu_0}{2\pi x} dx = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \text{ webers}$$

Toróide. *Figura 2.10 (c).* Esta representa a aproximação mais chegada de um circuito magnético simétrico perfeito, no qual a f.m.m. é distribuída igualmente em torno do percurso magnético e a f.m.m. por metro H corresponde em todos os pontos exatamente à densidade de fluxo existente nesses pontos. O fluxo magnético é portanto completamente confinado ao percurso. Seja o raio médio do toróide R metros e sua área de seção transversal A metros quadrados. Então, com N espiras uniformemente distribuídas percorridas pela corrente I ,

$$F = NI; \quad H = NI/2\pi R; \quad B = \mu H; \quad \Phi = \mu_0 NIA/2\pi R$$

Solenóide longo. A expressão para a toróide se mantém no centro do solenóide longo, comprimento l , substituindo R nas expressões por $l/2\pi$.

Circuito magnético composto contendo ferro. *Figura 2.10 (d).* Para simplicidade prática, os circuitos magnéticos compostos são arbitrariamente divididos em partes ao longo das quais a indução é suposta constante. Para cada parte

$$F = Hl = B/\mu = B/A/\mu = \Phi S$$

onde $S = l/\mu A$ é a *relutância*. Seu recíproco $\Lambda = 1/S = \mu A/l$ é a *permeância*. A expressão $F = \Phi S$ se assemelha a $E = IR$ para um circuito simples de c.c. e é portanto chamada algumas vezes de *lei magnética de ohm*.

A excitação total para o circuito magnético é

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \dots$$

para uma série de partes de comprimento $l_1, l_2, \dots$ ao longo das quais as intensidades de campo magnético de $H_1, H_2, \dots$ (A-t/m) são necessárias. Para o espaço livre, ar e materiais não magnéticos, $\mu_r = 1$ e $B_0 = \mu_0 H$, de modo que $H = B_0/\mu_0 \approx 800\,000 B_0$. Isto significa que uma excitação $F = 800\,000$ A-t é necessária para estabelecer densidade de fluxo magnético unitária (1 tesla ou 1 T) sobre um comprimento $l = 1$ m. Para materiais ferromagnéticos é usual empregar gráficos B/H (curvas de magnetização) para a determinação de excitação necessária, porque tais materiais exibem um fenômeno de saturação. As curvas típicas B/H são dadas nas *Figuras 2.11 e 2.12*.

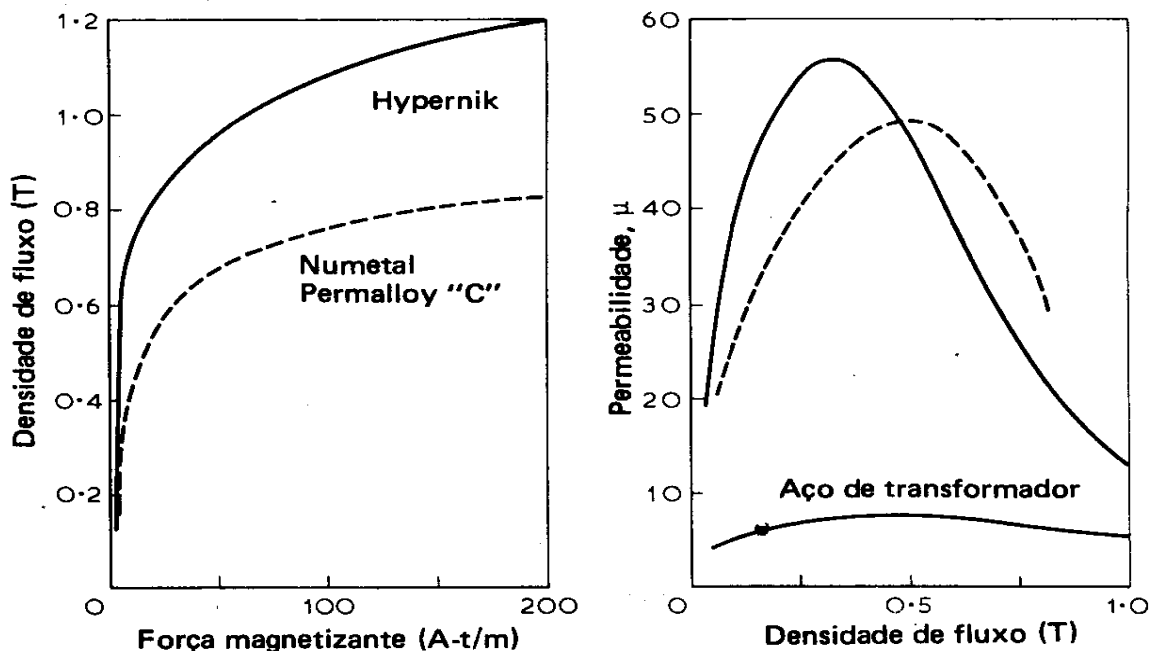


Figura 2.12 Magnetização e permeabilidade

Permeabilidade

Certos materiais *diamagnéticos* têm uma permeabilidade relativa ligeiramente menor que a do vácuo. Assim, o bismuto tem $\mu = 0,999\ 9$. Outros materiais têm o μ_r ligeiramente maior que a unidade; estes são chamados *paramagnéticos*. O ferro, níquel, cobalto, aços, liga Heusler (61 por cento de Cu, 27 por cento de Mn, 12 por cento de Al) e vários outros de grande interesse metalúrgico têm propriedades *ferromagnéticas*, nos quais a densidade de fluxo não é diretamente proporcional à força magnetizante, mas sob certas condições apropriadas são fortemente magnéticos. Os materiais de construção mais comumente empregados nos circuitos magnéticos de maquinaria elétrica podem ter permeabilidades de pico nas proximidades de 5 000–10 000. Um grupo de ligas de níquel-ferro, incluindo o *numetal* (73 por cento de Ni, 22 por cento de Fe, 5 por cento de Cu), *permalloy* 'C' (77,4 por cento Ni, 13,3 por cento Fe, 3,7 por cento Mo, 5 por cento Cu) e *hypernik* (50 por cento de Ni, 50 por cento de Fe), apresentam permeabilidades muito mais altas em baixas densidades (Figura 2.12). As permeabilidades dependem da composição química exata, tratamento térmico, esforço mecânico e condições de temperatura, assim como da densidade de fluxo. Os valores de μ_r excedendo meio milhão podem ser conseguidos.

Perdas de núcleo

Um núcleo ferromagnético sujeito a ciclos de magnetização, sejam eles alternantes (inversos), de rotação ou de vibração, apresentam *histerese*. A Figura 2.13 indica a relação típica cíclica B/H deste fenômeno. As quantidades significativas de *densidade de fluxo remanente* e *força coercitiva* também estão indicadas. A área da *curva da histerese* é uma medida de perda de energia no ciclo por volume unitário de material. Uma expressão empírica para a *perda de histerese* num núcleo tomada através de f ciclos de magnetização, é

$$p_h = k_h B_m^x \text{ watts por peso unitário ou volume.}$$

Aqui B_m é a indução máxima atingida, e k_h é a constante de histerese dependendo da qualidade molecular e estrutura do metal do núcleo. O expoente x pode ficar entre 1,5 e 2,3. É muitas vezes tomado como 2.

Uma outra causa de perda nas mesmas circunstâncias é a *perda de corrente turbulenta*, devida às perdas de I^2R , das correntes induzidas. Pode ser indicado como

$$p_e = k_e t^2 f^2 B^2 \text{ watts por peso unitário ou volume,}$$

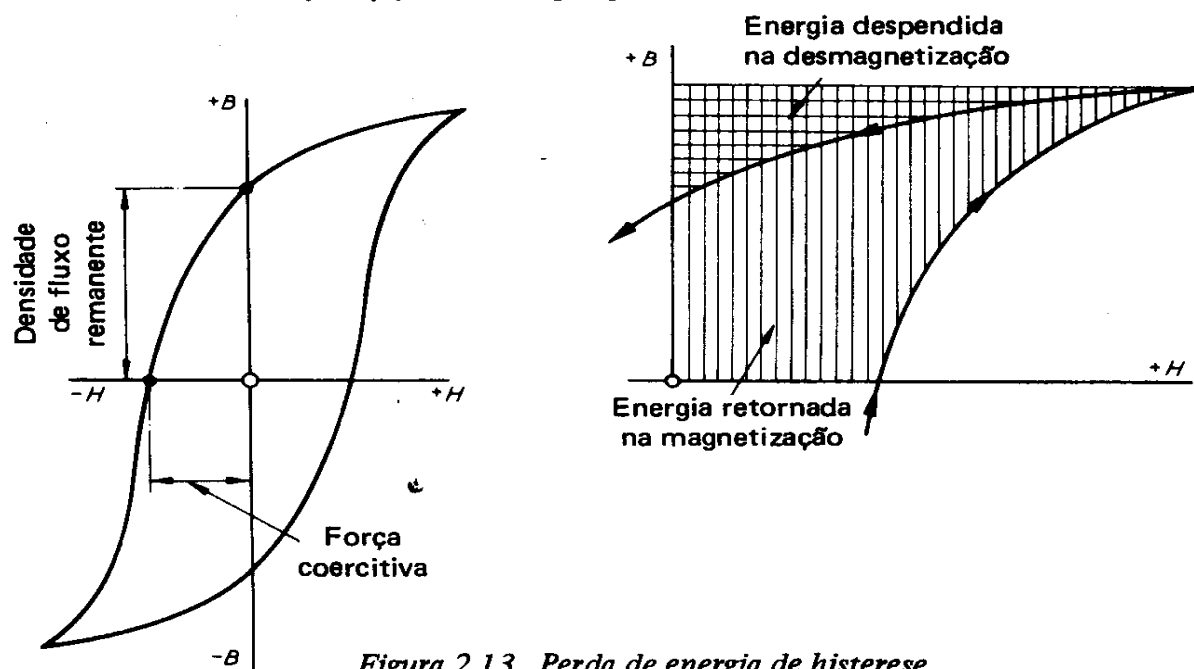


Figura 2.13 Perda de energia de histerese

dependendo a constante k_e da resistividade do metal e sendo t sua espessura, sendo o material laminado para diminuir a f.e.m. induzida por lâmina e para aumentar a resistência do percurso em que fluem as correntes turbulentas. Na prática, são empregadas curvas de perda por quilograma ou por metro cúbico para várias densidades de fluxo, sendo as curvas construídas a partir dos resultados de testes cuidadosos. Dever-se-á notar que a perda de histerese é dependente da densidade de fluxo máximo B_m , enquanto que a perda de corrente turbulenta é uma função de corrente induzida r.m.s. e f.e.m., e portanto da densidade de fluxo B da r.m.s., e não da densidade máxima B_m .

Efeitos de campo magnético

Os efeitos observados nos campos magnéticos podem ser classificados como *mecânicos*, *geradores* e *indutivos*.

Efeitos mecânicos

As forças mecânicas são desenvolvidas em sistemas de campo magnético de um modo tal que o movimento resultante aumenta a ligação de fluxo com o circuito elétrico, ou abaixa a f.m.m. exigida para um dado fluxo. No primeiro caso, um aumento de ligação necessita mais energia do circuito, tornando disponível energia mecânica; no último, a energia magnética armazenada é liberada em forma mecânica.

Os sistemas nos quais são desenvolvidas forças magnetomecânicas são indicados diagramaticamente na *Figura 2.14*.

(a) *Solenóide e núcleo magnético.* O núcleo é mergulhado no solenóide, aumentando o fluxo magnético e, por conseqüência, as ligações de fluxo de circuito.

(b) *Atração ou repulsão de superfícies magnetizadas.* A atração em (b) aumenta o fluxo reduzindo a relutância da abertura interna. A repulsão oferece mais espaço para os fluxos opostos e de novo reduz a relutância.

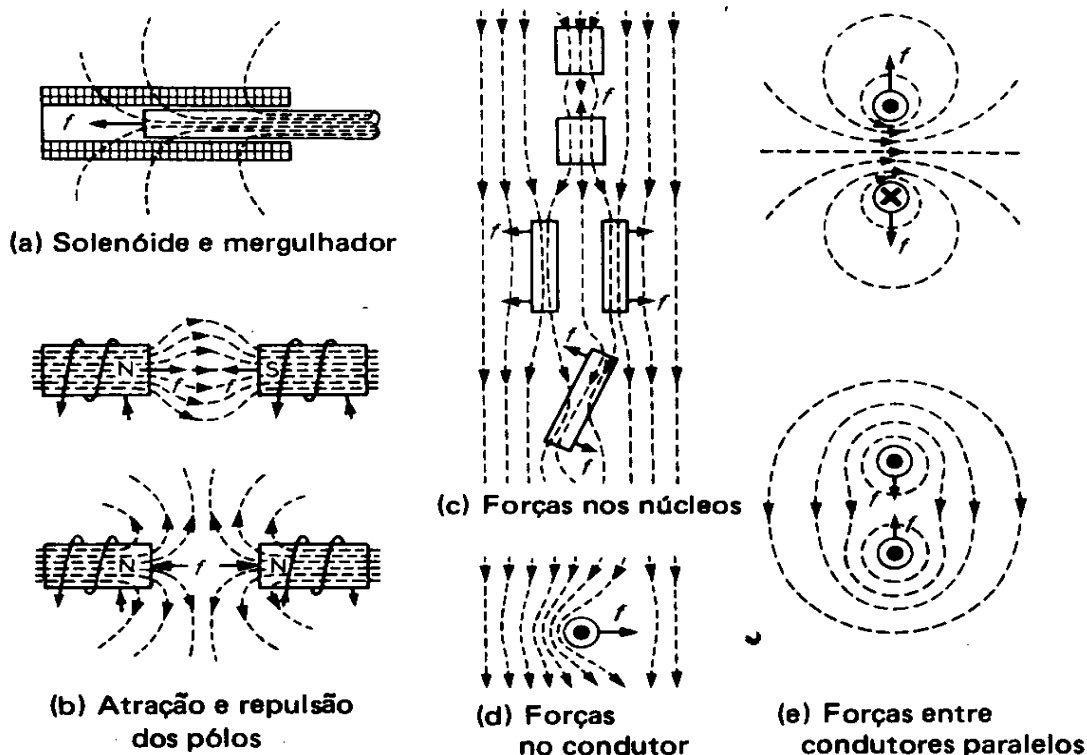


Figura 2.14 Forças eletromagnéticas

2-28 ELETROTECNOLOGIA

(c) *Forças em núcleos magnéticos num campo magnético.* Os núcleos alinhados com o campo se atraem uns aos outros, núcleos lado a lado se repelem uns aos outros, e um núcleo fora do alinhamento com a direção do campo geral experimenta uma força tendendo a alinhá-lo.

(d) *Força eletromagnética num condutor transportando corrente.* Um condutor transportando corrente colocado num campo produzido externamente (ou “principal”) tende a se mover de modo a aumentar o fluxo no lado onde o seu próprio campo tem a mesma direção que a do campo principal.

(e) *Força eletromagnética entre condutores transportando corrente.* Dois condutores paralelos transportando correntes em direções opostas se repelem, porque, ao se afastarem, eles fornecem uma área maior entre si. Ao transportar correntes na mesma direção eles se atraem tendendo a fornecer um percurso menor para o fluxo comum.

Vale a pena considerar como regra para o comportamento dos problemas de campo magnético (embora não seja uma explicação física daquele comportamento) que as forças observadas são em direções tais que causariam o encurtamento do comprimento das linhas de fluxo e sua expansão lateral, como se fossem fios esticados de elástico.

O cálculo da força produzida nos casos é baseado no movimento do sistema de força por uma quantidade dl e na quantidade de energia mecânica de dW aí absorvida ou liberada. Então a força é

$$f = dW/dl$$

Com a energia em joules e o deslocamento em metros, a força é dada em newtons. O cálculo somente é possível diretamente em alguns casos simples, como abaixo. As referências estão nos diagramas da *Figura 2.14*.

Caso (c). A energia armazenada por metro cúbico de um meio no qual a força magnetizante H produz uma densidade B é $\frac{1}{2}BH = \frac{1}{2}B^2/\mu_r\mu_0$ joules. Numa superfície de ferro ao ar, um movimento da superfície para um espaço originalmente ocupado por ar resulta, para uma densidade constante B , numa redução de energia por metro cúbico de $B^2/2\mu_0$ a $B^2/2\mu_r\mu_0$, visto que, para o ar, $\mu_r = 1$. A força deve ser, portanto,

$$f = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) \simeq \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ newtons por m}^2$$

sendo a última expressão suficientemente aproximada quando $\mu_r \gg 1$.

Caso (d). Este caso é de importância particular, porque é o princípio básico de motores normais e geradores, e de instrumentos de ímã permanente e bobina em movimento. A consideração da energia mecânica dá, para uma corrente I de comprimento l ficando perpendicular ao campo principal, uma força

$$f = BIl$$

onde B é a densidade de fluxo. A força, como indicado na *Figura 2.14 (d)*, fica em ângulo reto a B e a I . Supondo que o condutor é movido na direção da força (ou com ela ou contra ela) o trabalho feito num deslocamento de x é

$$fx = W = BIlx = \Phi I \text{ joules}$$

onde $\Phi = Blx$ é o fluxo total através do condutor.

Indução eletromagnética

Um campo magnético é de algum modo um armazém de energia. Quando ele é aumentado ou diminuído, a quantidade de energia armazenada aumenta ou diminui. Onde a energia é obtida de, ou restabelecida para, um circuito elétrico associado, a energia liberada ou recebida é em forma de corrente fluindo por motivo de uma *f.e.m. induzida* em um intervalo de tempo (especificado pelas condições), sendo estas três quantidades associadas essenciais às que determinam a energia elétrica. As direções relativas da f.e.m. e da corrente dependem da direção do fluxo de energia. Isto é descrito pela *lei de Lenz (Figura 2.15)*, a

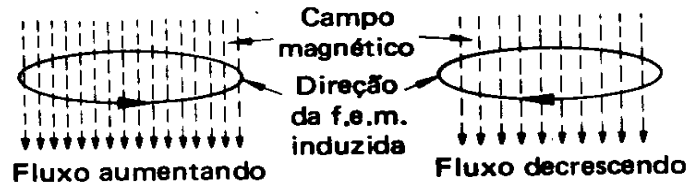


Figura 2.15 Lei de Lenz

qual estabelece que a direção da f.e.m. induzida por uma mudança de campo magnético ligado é tal que se oporia à mudança se fosse permitida a produção de uma corrente no circuito associado.

A *lei de Faraday* estabelece que a f.e.m. induzida num circuito por um campo magnético ligado é proporcional à taxa da mudança da ligação de fluxo ψ com o tempo. A ligação de fluxo é a soma dos produtos do fluxo magnético pelo número de espiras do circuito ligado por ele. Então,

$$e = -d\psi / dt = -\Sigma N(d\Phi / dt),$$

sendo o sinal negativo indicativo da direção da f.e.m. como especificado na lei de Lenz.

Consideremos um circuito de N espiras completamente ligadas com um fluxo Φ . A ligação $\psi = \Phi N$ pode mudar de vários modos:

- (i) Supondo o fluxo constante em valor, o circuito pode se mover através do fluxo (movimento relativo do fluxo e circuito: *efeito de movimento* ou *gerador*).
- (ii) Supondo a bobina estacionária em relação ao percurso magnético do fluxo, o último pode variar em dimensão (vibração do fluxo: *efeito vibrador* ou *transformador*).
- (iii) Ambas as mudanças podem ocorrer simultaneamente [movimento de bobina através de fluxo variante: combinação dos efeitos em (i) e (ii)].

O efeito de gerador é associado com a conversão de energia entre a forma elétrica e mecânica, usando uma forma magnética intermédia; o efeito transformador se relaciona à conversão de energia elétrica em/ou de energia magnética.

Efeito gerador

Em termos simplificados aplicados a máquinas elétricas heteropolares de rotação, *Figura 2.16*, a f.e.m. instantânea devida à taxa de mudança da ligação resultante do movimento à velocidade u de uma bobina de N espiras completas de comprimento efetivo l é $e = 2NBlu$, onde B é a densidade de fluxo, no qual a bobina se move no instante considerado. Desta expressão, como base, as fórmulas bem conhecidas das f.e.m. em movimento de máquinas podem ser derivadas. Por exemplo, consideremos a montagem no lado direito da *Figura 2.16*, onde a densidade de fluxo B é considerada como sendo uniforme: façamos a bobina girar a uma velocidade angular ω_r rad/s correspondendo a uma velocidade $n = \omega_r / 2\pi$ rpm. Então a velocidade periférica da bobina é $u = \omega_r R$ se seu raio for R . Deixemos a bobina

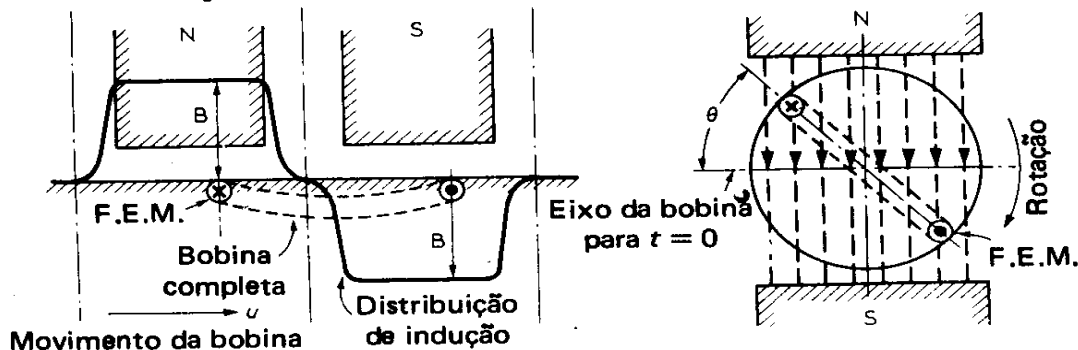


Figura 2.16 F.E.M. em movimento em bobina de máquina heteropolar

2-30 ELETROTECNOLOGIA

tomar uma posição perpendicular ao eixo do fluxo quando o tempo $t = 0$. Em $t = \theta/\omega_r$ estará numa posição fazendo o ângulo θ . Sua taxa de movimento através do fluxo é $\omega_r R \sin \theta$ e a f.e.m. instantânea da bobina é

$$e = \omega_r R N B l \sin \theta = \omega_r N \Phi_m \sin \theta$$

onde $\Phi_m = 2 B l R$ é o fluxo máximo envolvido, i.é, com $\theta = 0$. A f.e.m. é, portanto, uma função seno de frequência $\omega_r/2\pi$ e valores característicos:

$$\text{pico: } e_m = \omega_r N \Phi_m \quad \text{r.m.s.: } E = (1/\sqrt{2}) \omega_r N \Phi_m$$

É obtido o mesmo resultado por uma aplicação direta da lei de Faraday. Em $t = 0$ o fluxo ligado é Φ_m ; em $t = \theta/\omega_r$, é $\Phi_m \cos \theta = \Phi_m \cos \omega_r t$. A f.e.m. instantânea é

$$e = -d\psi/dt = -N\Phi_m d(\cos \omega_r t)/dt = \omega_r N \Phi_m \sin \theta$$

como anteriormente.

Efeito transformador

O caso prático diz respeito a uma bobina de N espiras envolvendo um fluxo variante Φ . Se o fluxo varia sinusoidalmente com o tempo, pode ser expresso em

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t = \Phi_m \cos 2\pi f t$$

onde Φ_m é o seu valor máximo de tempo, f é sua frequência, e $\omega = 2\pi f$ é sua frequência angular. A f.e.m. instantânea na bobina é

$$e = -N(d\Phi/dt) = \omega N \Phi_m \sin \omega t.$$

Esta relação forma a base da f.e.m. induzida em transformadores e motores de indução. A relação da f.e.m. e do fluxo é a das Figuras 2.15, 19 (c) e 21.

Cálculo da f.e.m. induzida

Os dois métodos de calcular as f.e.m. induzidas eletromagneticamente são (i) a lei de mudança de fluxo e (ii) a lei de corte de fluxo.

Mudança de fluxo. Esta lei tem a forma básica

$$e = -N(d\Phi/dt)$$

e é aplicável onde um circuito de forma constante liga um fluxo magnético mutante.

Corte de fluxo. Onde um condutor de comprimento l se move a uma velocidade u em ângulo reto com um campo magnético uniforme de densidade B , a f.e.m. induzida no condutor é

$$e = B l u$$

Esta pode ser aplicada ao movimento dos condutores em campos magnéticos constantes e quando existem contatos deslizantes.

Mudança de ligação. Onde as bobinas se movem em fluxos mutáveis, e ambos os processos de vibração e corte de fluxo ocorrem, a expressão geral

$$e = -d\psi/dt$$

deve ser usada, com a variação da ligação ψ expressa como resultado de ambos os processos.

Princípio da ligação constante

A ligação de um circuito *fechado* não pode ser mudada instantaneamente, porque isto implicaria uma mudança instantânea da energia magnética associada, i.é, o aparecimento momentâneo de potência infinita. Pode ser demonstrado que a ligação de um circuito fechado de *resistência zero* e nenhuma fonte interna, não pode ser mudada. O último conceito é incluído no teorema seguinte.

Teorema da ligação constante. A ligação de um circuito passivo fechado de resistência zero é uma constante. Tentativas externas de mudar a ligação são opostas por correntes induzidas que evitam efetivamente qualquer mudança da ligação.

O teorema é muito útil ao tratar com transientes em circuitos altamente indutivos tais como transformadores, geradores síncronos, etc.

Transformador ideal

Um transformador ideal compreende duas bobinas sem resistência envolvendo um circuito magnético comum de permeabilidade infinita e zero de perda de núcleo, *Figura 2.17*. As bobinas não produzem fluxo de fuga: i.é, o fluxo total do circuito magnético liga completamente ambas as bobinas. Quando a bobina primária é ativada por uma voltagem alternada V_1 , é desenvolvido um fluxo correspondente de valor máximo Φ_m , induzindo na bobina

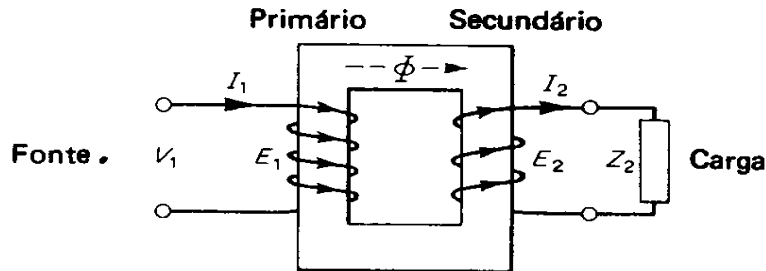


Figura 2.17 Transformador ideal

primária de N_1 espiras uma f.e.m. $E_1 = V_1$. Ao mesmo tempo é induzida uma f.e.m. na bobina secundária de N_2 espiras. Se os terminais do secundário forem ligados a uma carga percorrida por uma corrente I_2 , o primário deve aceitar uma corrente equilibradora I_1 de modo que $I_1 N_1 = I_2 N_2$, porque o núcleo requer uma excitação zero. As condições de operação são portanto

$$N_1/N_2 = E_1/E_2 = I_2/I_1; \quad \text{e} \quad E_1 I_1 = E_2 I_2.$$

A impedância da carga secundária $Z_2 = E_2/I_2$ é refletida no primário para dar a impedância $Z_1 = E_1/I_1$, de modo que

$$Z_1 = (N_1/N_2)^2 Z_2.$$

Um transformador de potência prático difere do ideal em relação ao seu núcleo que não é infinitamente permeável e exige uma excitação $N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2$; as bobinas primária e secundária têm ambas fugas de resistência e magnéticas; e ocorrem perdas de núcleo. Tratando estes efeitos separadamente, um transformador prático pode ser considerado como um transformador ideal ligado a uma rede externa que responde pelos defeitos.

Máquinas eletromagnéticas

Uma máquina eletromagnética liga um sistema de energia elétrica a um mecânico, fornecendo um meio reversível de fluxo de energia entre eles no fluxo magnético comum ou "mútuo" ligando o estator e o rotor. A energia é armazenada no campo e liberada como trabalho. Um condutor transportando corrente no campo está sujeito a uma força mecânica e, ao se mover, produz trabalho e gera uma contra-f.e.m. Assim, o produto do movimento pela força é convertido para ou do produto corrente-voltagem representando a potência elétrica.

As equações de equilíbrio de taxa-energia em relação à potência mecânica p_m , potência elétrica p_e , e à energia armazenada no campo magnético w_f são

$$\text{Motor: } p_e = p_m + dw_f/dt. \quad \text{Gerador: } p_m = p_e + dw_f/dt.$$

O termo potência mecânica deve ser responsável pelas mudanças na energia cinética armazenada, a qual ocorre quando a velocidade da máquina e suas cargas mecânicas conjuntas se alteram.

MOTORES DE RELUTÂNCIA

A força entre superfícies magnetizadas [Figura 2.14 (b)] pode ser aplicada a máquinas de rotação, Figura 2.18 (a). A armadura tende a se alinhar ela própria com o eixo do campo, desenvolvendo um binário de relutância. O princípio é aplicado a motores-miniatura de contato rotativo e motores síncronos de relógio.

MÁQUINAS COM ENROLAMENTOS DE ARMADURA

Consideremos uma máquina rotativa com velocidade angular constante ω_r e desenvolvendo um binário M . A potência mecânica é $p_m = M\omega_r$; a potência elétrica é $p_e = ei$ onde e é a f.e.m. oposta devida à reação do campo magnético mútuo. Então $ei = M\omega_r + dw/dt$ em cada instante. Se o condutor em armadura a na Figura 2.18 (b) está se deslocando num fluxo não variável no tempo de densidade local B , a f.e.m. é inteiramente rotacional e igual a $e_r = Blu = Bl\omega_r R$. A força tangencial no condutor é $f = Bli$ e o binário é $M = BliR$. Assim $e_r i = M\omega_r$ porque $dw_f/dt = 0$. Este caso se aplica a máquinas (c.c., síncronos trifásicos e indução) de fluxo constante.

Se à armadura da Figura 2.18 (b) são fornecidos dois condutores a e b , eles podem ser ligados para formar uma espira. Desde que a espira seja totalmente fechada, os binários serão sempre aditivos. Mais espiras em série formam um enrolamento. O fluxo total na máquina resulta das f.m.m. de todos os condutores transportando corrente, quer no estator, quer no rotor, mas o binário aparece do componente do fluxo total em ângulo reto com o eixo da f.m.m. do enrolamento.

Os enrolamentos, Figura 2.18 (c), podem ser do tipo comutador ou de fase (fechados). O primeiro é fechado em si mesmo e a corrente é conduzida para dentro e para fora do enrolamento por escovas fixas, que incluem entre elas um número constante de condutores em cada percurso de corrente de armadura. A f.m.m. da armadura coincide sempre com o eixo da escova. Enrolamentos de fase têm conexões externas separadas. Se o enrolamento é no rotor, sua corrente e f.m.m. giram com ele e as conexões externas devem ser feitas através de anéis coletores. Tais dois (ou três) enrolamentos com 2- (ou 3-) correntes de fase podem produzir uma f.m.m. resultante que gira em relação aos enrolamentos.

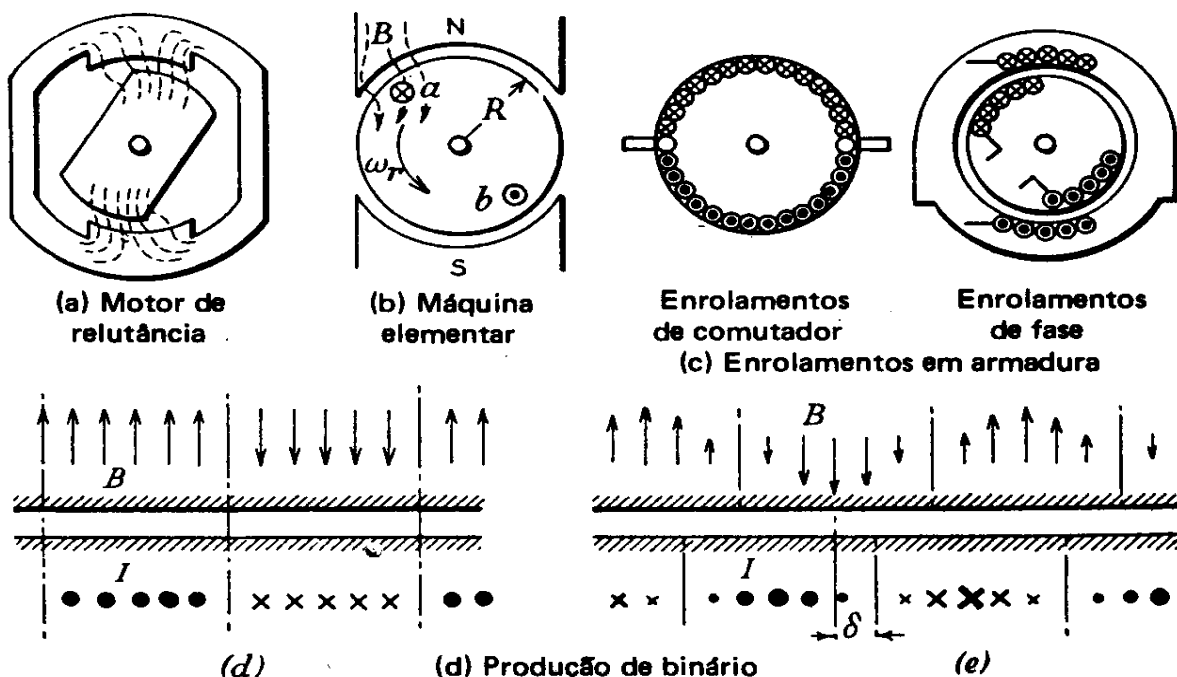


Figura 2.18 Máquinas eletromagnéticas

BINÁRIO

A *Figura 2.18 (d)* mostra um enrolamento de comutador composto para o binário máximo: i.é, o eixo da f.m.m. do enrolamento é deslocado eletricamente $\pi/2$ dos centros dos pólos do campo. Se a armadura tem um raio R e um comprimento de núcleo l , o fluxo tem uma densidade uniforme constante B , e há Z condutores nos $2p$ enrolamentos cada um transportando a corrente I , o binário é $BRIZ/2p$. Isto se aplica diretamente a uma máquina de c.c. Também dá o binário médio de uma máquina de comutador de uma fase se B e I são valores eficazes e o fator $\cos \phi$ é introduzido para qualquer ângulo de tempo-fase entre eles.

O binário de um enrolamento de fase pode ser derivado da *Figura 2.18 (e)*. A densidade de fluxo é suposta ser distribuída sinusoidalmente, e computada do centro do pólo como $B_m \cos \alpha$. A corrente no enrolamento de fase produz a f.m.m. F_a , tendo um eixo deslocado do ângulo δ do centro do pólo. O binário total é então

$$M = \pi B_m F_a l R \sin \delta = \frac{1}{2} \pi \Phi F_a \sin \delta$$

por par de pólos. Este caso se aplica diretamente às máquinas síncronas e de indução trifásicas.

TIPOS DE MÁQUINA

Para binário unidirecional, os eixos dos centros dos pólos e f.m.m. de armadura devem ficar fixos relativamente um ao outro. O binário máximo é obtido com estes eixos em ângulo reto. A máquina é tecnicamente melhor se o fluxo de campo e a f.m.m. da armadura não oscilarem com o tempo (i.é, são valores de c.c.): se eles se alternarem, é preferível que sejam da mesma fase.

Máquinas praticáveis podem ser construídas com (1) ('campo') concentrado, ou (2) enrolamentos de fase em um elemento, com (A) comutador ou (B) enrolamentos de fase no outro. É basicamente indiferente qual a função designada para o estator e qual para o rotor, mas para conveniência prática um enrolamento de comutador normalmente gira. A lista abaixo dos principais tipos dá o tipo de enrolamento (1, 2, A, B) e o fornecimento de corrente (c ou a), com o estator em primeiro lugar:

Máquina de c.c.: $1c/Ac$. A montagem é a da *Figura 2.18 (d)*. É necessário um comutador e escovas para o rotor.

Máquina comutadora monofásica: $1a/Aa$. A montagem física é a mesma que a da máquina de c.c. O fluxo de campo alterna, de modo que a f.m.m. do rotor também deve alternar na mesma frequência e preferencialmente em fase no tempo. A conexão em série de estator e rotor dá esta condição.

Máquina síncrona: $Ba/1c$. O rotor contém um enrolamento de c.c. concentrada, por isso a f.m.m. do rotor gira com ele a uma velocidade (síncrona) correspondente, requerendo um fornecimento de c.a. (usualmente trifásica). A máquina pode ser invertida ($1c/Ba$).

Máquina de indução: $2a/Ba$ [*Figura 2.18 (e)*]. O enrolamento de estator polifásico produz um campo rotativo de velocidade angular ω_1 . O rotor gira com um deslizamento s , i.é, a uma velocidade $\omega_1 (1 - s)$. O binário é mantido unidirecional pelas correntes induzidas no enrolamento de rotor a uma frequência $s\omega_1$. Com a c.c. fornecida ao rotor ($2a/Bc$) a f.m.m. do rotor é fixa relativamente aos enrolamentos e o binário unidirecional é somente mantido à velocidade síncrona ($s = 0$).

Todas as máquinas eletromagnéticas são variantes das acima mencionadas.

Gerador magneto-hidrodinâmico

A magneto-hidrodinâmica (m.h.d.) diz respeito à interação entre um fluido condutor em movimento e um campo magnético. Se um gás se movendo rapidamente a alta temperatura (e portanto ionizado) passa através de um campo magnético, é desenvolvido um campo elétrico através da corrente gasosa exatamente como se fosse um condutor metálico, em conformidade com a lei de Faraday. O campo elétrico dá origem a uma d.d.p. entre os

2-34 ELETROTECNOLOGIA

elétrodos nos extremos da corrente, e pode se produzir uma corrente num circuito externo ligado aos elétrodos. O gerador m.h.d. oferece uma conversão direta entre calor e energia elétrica. Há uma intensa pesquisa para o princípio da m.h.d. como meio possível de geração de potência em larga escala rivalizando com a convencional conversão de múltiplas etapas empregando uma força motriz mecânica e máquina eletromagnética rotativa.

Indutância

A f.e.m. induzida num circuito elétrico por mudança de ligação de fluxo pode ser o resultado da mudança da corrente própria do circuito. Um campo magnético liga sempre um circuito transportando corrente, e a ligação é (sob certas restrições) proporcional à corrente. Quando a corrente muda, a ligação também muda e uma f.e.m., chamada *f.e.m. de indução própria*, é induzida. Se a ligação devida à corrente i no circuito por $\psi = \Phi N = Li$, a f.e.m. induzida por mudança de corrente será

$$e = -d\psi/dt = -N(d\Phi/dt) = -L(di/dt).$$

L é o coeficiente dando a ligação por ampère: é chamado o *coeficiente de indução própria*, ou, mais usualmente, a *indutância*. A unidade é o henry, e em consequência de sua relação à ligação, f.e.m. induzida, e energia magnética armazenada, pode ser definido como segue.

Um circuito tem indutância unitária, um henry, se:

- (a) a energia armazenada no campo magnético associado é $\frac{1}{2}$ joule quando a corrente é 1 ampère;
- (b) a f.e.m. induzida é 1 volt quando a corrente é mudada à taxa de 1 ampère por segundo;
- (c) a ligação de fluxo totaliza 1 weber-espira quando a corrente é 1 ampère.

Voltagem aplicada a um indutor

Seja um indutor (i.é, uma bobina ou circuito indutivo) isento de resistência e capacitância ligado a uma fonte de diferença de potencial constante V , e seja a indutância L . Por definição (b) acima, uma corrente será iniciada, aumentando a uma taxa tal que a f.e.m. induzida contrabalançará a voltagem aplicada V . A corrente deve aumentar uniformemente a V/L ampères por segundo como indicado na *Figura 2.19 (a)*, enquanto a d.d.p. aplicada for mantida. Simultaneamente o circuito desenvolve um fluxo ligado crescente e armazena uma quantidade crescente de energia magnética. Depois de um tempo t_1 , a corrente alcança $I_1 = (V/L)t_1$, e absorveu uma quantidade de energia à voltagem V e corrente média $I_1/2$, i.é,

$$W_1 = V \cdot \frac{1}{2}I_1 \cdot t_1 = \frac{1}{2}VI_1t_1 = \frac{1}{2}LI_1^2 \text{ joules,}$$

visto que $V = I_1 L/t_1$. Se agora a fonte é removida mas o circuito continua fechado, não há maneira de converter a energia armazenada, a qual se mantém constante. Portanto, a corrente continua a circular indefinidamente ao valor I_1 .

Suponhamos que V é aplicado por um tempo t_1 , e então invertido por um intervalo de tempo igual, e assim sucessivamente. A corrente resultante é indicada na *Figura 2.19 (b)*. Durante o primeiro período t_1 , a corrente se eleva uniformemente até $I_1 = (V/L)t_1$ e a energia armazenada é então $\frac{1}{2}LI_1^2$. Na inversão da voltagem aplicada a corrente executa a mesma taxa de mudança, mas negativamente de modo a reduzir o valor da corrente. Depois de t_1 é zero e assim também a energia armazenada, a qual retornou toda à fonte donde ela veio.

Se a voltagem aplicada é sinusoidal e alterna a uma frequência f , tal que $v = v_m \cos 2\pi ft = v_m \cos \omega t$, e é ligada ao instante $t = 0$ quando $v = v_m$, a corrente começa a aumentar à taxa v_m/L , *Figura 2.19 (c)*; mas a redução imediata e subsequente inversão da voltagem aplicada requerem mudanças correspondentes na elevação e queda de corrente. A f.e.m. induzida faz oposição às mudanças de corrente de modo que

$$v = -e = -[-L(di/dt)] = L(di/dt)$$

a cada instante. Isto exige

$$i = \int \frac{v}{L} dt = \frac{v_m}{\omega L} \sin \omega t.$$

A corrente máxima alcançada é $i_m = v_m/\omega L$ e a corrente r.m.s. é $I = V/\omega L = V/X_L$, onde $X_L = \omega L = 2\pi fL$ é a *reatância indutiva*.

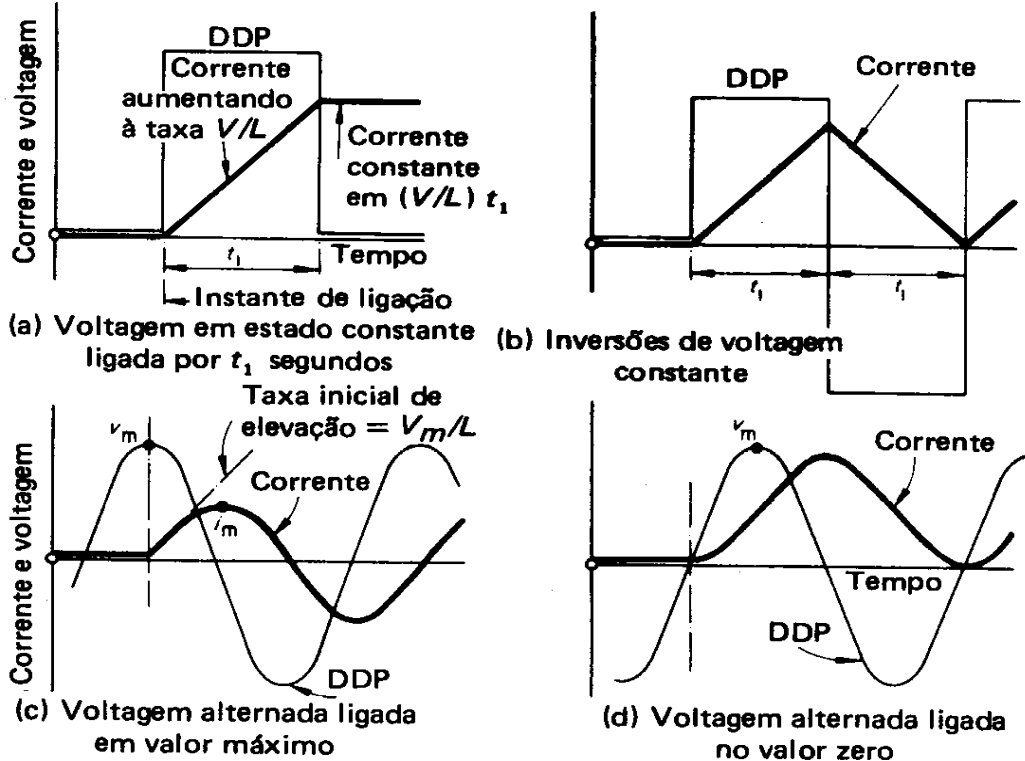


Figura 2.19 Comportamento de uma indutância pura

Se a tensão aplicada for ligada a uma tensão zero, *Figura 2.19 (d)*, a aplicação do mesmo argumento resulta numa corrente de forma sinusoidal unidirecional mas pulsante, atingindo o valor máximo $2i_m = 2v_m/\omega L$, ou duas vezes isto no caso simétrico acima. Isto é chamado de efeito duplo. Comparar com a *Figura 2.19 (b)*.

Cálculo de indutância

Para calcular a indutância em um determinado caso (problema capaz de resolução exata razoável somente em casos de simplicidade geométrica considerável), a solução é a do ponto de vista da definição (c). O cálculo envolve a estimativa do campo magnético produzido por uma corrente de 1A, somando a ligação ΦN produzida por este campo com o circuito, e escrevendo a indutância como $L = \Sigma \Phi N$. Os casos ilustrados na *Figura 2.10* e *2.20* dão os resultados seguintes:

Condutor isolado reto comprido. *Figura 2.11 (a).* A força magnetizante em um percurso circular concêntrico com o condutor de raio x é $H = F/2\pi x = \frac{1}{2}\pi x$; isto dá origem a uma densidade de fluxo de circuito $B_0 = \mu_0 H = \mu_0/2\pi x$. Somando a ligação do raio r do condutor a uma distância s dá

$$\psi = (\mu_0/2\pi) \ln(s/r)$$

weber-espira por metro de comprimento de condutor. Se s é infinito, a ligação também o é e, portanto, a indutância também o será: mas na prática não é possível isolar de tal forma o condutor.

Há um fluxo magnético seguindo os percursos circulares fechados dentro do con-

2-36 ELETROTECNOLOGIA

dutor, sendo a densidade $B_1 = \mu x / 2\pi r^2$ no raio x . A ligação efetiva é o produto do fluxo por aquela proporção do condutor realmente envolvida, dando $\mu/8\pi$ por metro de comprimento. Acontece que a ligação interna produz uma contribuição $L_i = \mu/8\pi$ henry/metro, sem considerar o diâmetro do condutor na suposição de que a corrente é uniformemente distribuída. A permeabilidade absoluta μ do material do condutor tem um efeito considerável na indutância interna.

Condutores cilíndricos concêntricos. *Figura 2.11 (b).* A indutância de um metro de comprimento de cabo concêntrico transportando correntes iguais dirigidas opostamente nas duas partes é devida ao fluxo no espaço entre o condutor central e tubular estabelecido somente pela corrente interna, visto que a corrente no condutor externo não pode estabelecer fluxo interno. Somando as ligações e acrescentando a ligação interna do condutor interno:

$$L = (\mu/8\pi) + (\mu_0/2\pi)\ln(R/r) \text{ henry/metro.}$$

Fios paralelos. *Figura 2.20 (a).* Entre dois fios paralelos de raio r transportando a mesma corrente em direções opostas o campo é concentrado [comparar *Figura 2.14 (e)*]. A ligação total entre os condutores é achada somando o fluxo produzido pelo fio A no espaço a supondo o fio B ausente, e duplicando o resultado. Desde que $a \gg r$, isto dá para o anel

$$L = (\mu/4\pi) + (\mu_0/\pi)\ln(a/r) \text{ henry/metro.}$$

É permissível considerar metade da ligação associada com cada condutor. A indutância de cada condutor sob este ponto de vista é a indutância da linha para o neutro.

$$L_0 = (\mu/8\pi) + (\mu_0/2\pi)\ln(a/r) \text{ henry/metro.}$$

Ver *Figura 2.20 (b)*.

Uma linha trifásica tem uma indutância *da linha para o neutro* idêntica à de cima se os fios são simetricamente espaçados. Se o espaçamento não é simétrico, *Figura 2.20 (c)*,

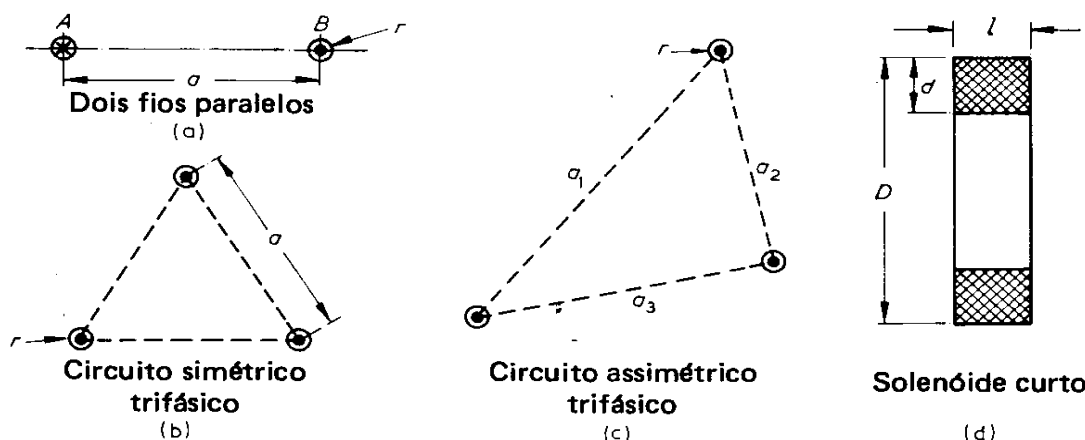


Figura 2.20 Relativo a cálculo de indutância

mas as linhas são transpostas ciclicamente, pode ser usada a expressão se o espaçamento geométrico médio $a = \sqrt[3]{(a_1 a_2 a_3)}$ é empregado.

Toróide. *Figura 2.11 (c).* Para um núcleo de permeabilidade μ , a ligação por ampère, i.é, a indutância é

$$L = \mu N^2 A / 2\pi R = \mu N^2 A / l \text{ henry}$$

onde $l = 2\pi R$ é a circunferência média, e A é a área de seção transversal efetiva do núcleo.

Solenóide. Um solenóide *comprido* tendo uma razão de comprimento pelo diâmetro de pelo menos 20, tem uma indutância dada aproximadamente pela expressão do toróide acima.

Para solenóides *curtos* o fluxo não ligará todas as espiras, e a fórmula de toróide dá resultados que são demasiado altos. O caso foi longamente pesquisado em linhas matemáticas. Uma expressão aproximada (devida a J. H. Reyner), usando as dimensões estabelecidas na Figura 2.20 (d), é

$$L = \frac{6.4\mu_0 N^2 D^2}{3.5D + 8l} \cdot \frac{D - 2.25d}{D} \text{ henry,}$$

sendo todas as dimensões em metros. Para a melhor razão de indutância pela resistência (dimensões ótimas de Maxwell), $d : l : D = 1 : 1 : 4.7$. Com estes, $L = 8N^2 D$.

Circuito de ferro. Figura 2.11 (d). A presença de materiais ferromagnéticos torna impossível o cálculo preciso da indutância. É necessário admitir um fluxo Φ no circuito magnético, estimar a f.m.m. exigida para cada parte distinta, e somar os componentes da f.m.m. para dar a F total. Então, com uma bobina excitatriz de N espiras, a corrente requerida é $I = F/N$, a ligação é ΦN e a indutância é

$$L = \Phi N / I.$$

O efeito de saturação é fazer L uma função de I , diminuindo a ligação por ampère com o aumento da corrente e, por consequência, L diminuindo. A variação pode ser abrandada mas não evitada, incluindo uma abertura de ar no circuito magnético para "endurecer" o fluxo.

Relação de fase

Um indutor puro, excitado por uma voltagem alternada sinusoidal V , transporta uma corrente puramente reativa i , que produz um fluxo magnético Φ , o qual, por sua vez, induz uma

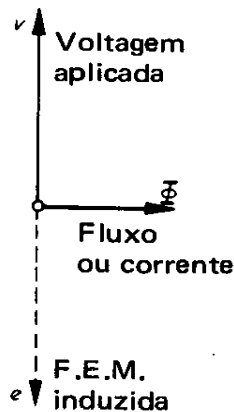


Figura 2.21 Diagrama de fase

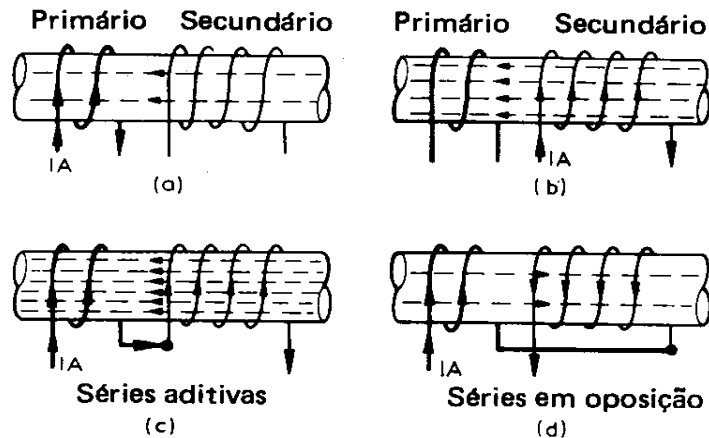


Figura 2.22 Relativo à indutância mútua

contra-f.e.m. $e = -N (d\Phi/dt)$. O diagrama de fase, Figura 2.21, mostra a relação em fase dos números complexos representando v , Φ e e .

Indutância mútua

Se duas bobinas, chamadas respectivamente *primário* e *secundário*, são de tal modo dispostas que o fluxo magnético desenvolvido pela corrente no primário liga a bobina secundária, diz-se que as duas bobinas têm *indutância mútua*. Dois circuitos têm indutância mútua, um henry, se:

- a energia armazenada no campo magnético associado comum for 1 joule quando a corrente em cada circuito for 1 ampère;
- a f.e.m. induzida no secundário for 1 volt quando a corrente primária mudar à taxa de 1 ampère por segundo;

- (c) o número de ligações de fluxo com o secundário totalizar 1 weber-espira quando a corrente primária for 1 ampère.

A *Figura 2.22 (a)* mostra duas bobinas num circuito magnético comum: considera-se que *todo* o fluxo devido à corrente primária liga a bobina secundária, uma condição que é aproximada na prática quando são empregados núcleos de alta permeabilidade com baixa saturação e as bobinas são enroladas entre si em cada uma, ou são entrefolhadas. Deixemos 1 A nas duas espiras primárias produzir 2 Wb. A indutância própria do primário é, conseqüentemente, $L_1 = 2 \times 2 = 4$ H. A ligação secundária é $4 \times 2 = 8$, de modo que a indutância mútua é $M = 8$ H. Deixemos agora uma corrente de 1 A ser circulada no secundário, *Figura 2.22 (b)*. Desenvolverá duas vezes mais ampère-espiras que o primário na *Figura 2.22 (a)*, e portanto produz 4 Wb. A indutância própria é $L_2 = 4 \times 4 = 16$ H. A ligação primária é $2 \times 4 = 8$, i.é, $M = 8$ H. Assim, M é univalente.

Na *Figura 2.22 (c)* as bobinas são ligadas em séries aditivas. Com uma corrente de 1 A, as ampère-espiras são $2 + 4 = 6$, o fluxo é 6 Wb e a indutância total é $6 \times 6 = 36$ H. Isto pode ser indicado como segue

$$L = L_1 + L_2 + 2M = 4 + 16 + 2 \times 8 = 36 \text{ H.}$$

Se a conexão é como em *(d)*, séries opostas, as ampère-espiras estão em oposição, com um valor real de $4 - 2 = 2$. O fluxo resultante é 2 Wb. As ligações se opõem nos dois enrolamentos, elevando-se a $4 \times 2 - 2 \times 2 = 4$. A indutância total é 4 H, obtido por

$$L = L_1 + L_2 - 2M = 4 + 16 - 2 \times 8 = 4 \text{ H.}$$

A indutância de duas bobinas em combinação depende do *sentido* da conexão.

A consideração dos exemplos anteriores mostra que $M = \sqrt{(L_1 L_2)}$. Usualmente, as conexões são menos completas, e $M < \sqrt{(L_1 L_2)}$. O coeficiente $M/\sqrt{(L_1 L_2)} = k$, é o *coeficiente de conexão*.

Não é necessário os circuitos conterem bobinas para terem indutância mútua. O cálculo contudo é quase sempre difícil, mas quando a geometria é suficientemente simples, uma estimativa das ligações contribuindo para a indutância mútua pode ser desenvolvida nas mesmas linhas como já indicado acima para a indutância própria.

Conexão de indutores

A discussão acima mostra que, na ausência de indutância mútua, a indutância total de um circuito consistindo de bobinas de indutância $L_1, L_2, L_3, \dots$ ligadas em *série* será

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

Onde há indutância mútua entre duas ou mais, é necessário achar os coeficientes de indutância mútua M_{xy} entre L_x e L_y e incluir seus efeitos. Para apenas duas bobinas a indutância é, como já discutido,

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M.$$

Indutores em *paralelo* são adicionados pela regra: $1/L = (1/L_1) + (1/L_2) + \dots$ desde que não tenham indutância mútua.

Magnetos permanentes

Os magnetos permanentes são feitos de ligas que podem ser tratadas termicamente para dar ao material uma grande histerese (*Figura 2.13*). A *Figura 2.23* mostra o quadrante de desmagnetização B/H de um material típico. Na utilização, um magneto produz energia magnética no restante do circuito magnético derivado de alguma desmagnetização própria: conseqüentemente, o ponto de trabalho do magneto é na curva entre o ponto força coercitiva/fluxo zero e o ponto força zero/fluxo remanescente. Diferentes partes de um magneto trabalharão em pontos diferentes da curva devido à fuga, e as condições se tornam muito mais

complexas se a relutância do circuito magnético externo oscilar.

Ao projetar um magneto é necessário tomar em consideração a fuga, pelo uso de uma margem F_a de f.m.m. (normalmente não mais de 1,25) e uma margem de fluxo Φ_a , que pode ser qualquer valor entre 2 a 20, sendo maior para um coeficiente de comprimento de abertura pela seção de abertura.

Se H_g = resistência do campo na abertura, l_g = comprimento da abertura, A_g = seção de abertura, B_m = densidade de trabalho no magneto, H_m = trabalho desmagnetizante de resistência de campo no magneto, l_m = comprimento de magneto, e A_m = seção de magneto, então pode ser demonstrado que

$$H_g = \sqrt{[(B_m H_m / F_a \Phi_a)(A_m l_m / A_g l_g)]}.$$

i.é, é maior quando $B_m H_m$ é máximo. Isto ocorre num ponto de trabalho em $(BH)_{\max}$. A seção e comprimento do magneto devem ser proporcionados para a liga e as dimensões de abertura para assegurar as condições exigidas. A seção é $A_m = (H_g A_g \Phi_a / B_m)$ e o comprimento $l_m = (H_g l_g F_a / H_m)$. Para calcular estes, os valores de B_m e H_m no ponto $(BH)_{\max}$

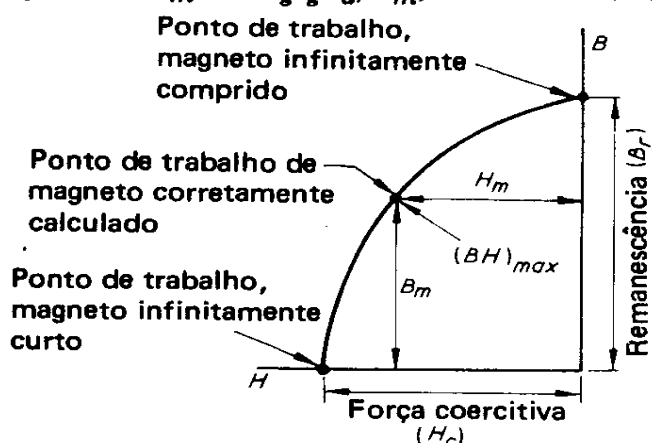


Figura 2.23 Condições de magneto permanente

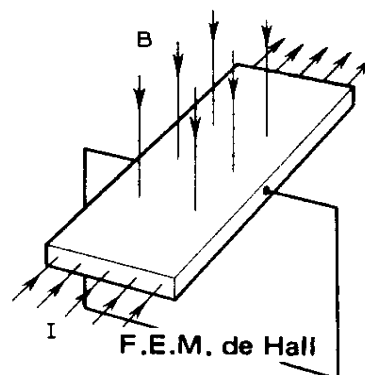


Figura 2.24 Efeito de Hall

devem ser conhecidos. Alternadamente, se os três pontos correspondendo à densidade de fluxo remanescente B_r , a $(BH)_{\max}$ e a força coercitiva H_c são dados, os valores de trabalho podem ser calculados de

$$B_m = \sqrt{[(BH)_{\max}(B_r/H_c)]} \quad \text{e} \quad H_m = \sqrt{[(BH)_{\max}(H_c/B_r)]}.$$

Efeito de Hall

Se um condutor plano transportando uma corrente I é colocado num campo magnético B perpendicular a ele, *Figura 2.24*, então é estabelecido um campo elétrico através da largura do condutor. Este é o efeito de Hall, a geração de uma f.e.m. transversal pelo movimento de elétrons através do campo magnético. (A f.e.m. de Hall é adicional a, e sobreposta sobre, o campo elétrico ao longo do condutor conseqüentemente sobre a queda de IR .) A f.e.m. de Hall, normalmente alguns microvolts, pode ser apreciada por meio de pancadinhas aplicadas às arestas do condutor. O efeito tem sido usado para medir correntes pelo seu efeito magnético, e para a indicação de potências de alta frequência.

EFETOS DE CAMPO ELÉTRICO

Campo elétrico

Quando dois condutores são separados num vácuo (ou, para todos os objetivos práticos, no ar) e são mantidos a uma diferença de potencial, um estado eletrificado é obtido no espaço circundante. Consideremos os tais dois condutores A e B , *Figura 2.25*. A aplicação de uma diferença de potencial provoca uma corrente de elétrons de A para B , deixando A positivo e tornando B negativo.

M.G. SAY

Ph.D., M.Sc., C.Eng., A.C.G.I., D.I.C., F.I.E.E., F.R.S.E.

Colaboradores **e** especializados

MANUAL DO ENGENHEIRO ELETRICISTA

**Unidades e grandezas físicas • Eletrotecnologia •
Análise de redes • Materiais**

Alexandre Luiz Bertozzi
ENG. ELETRICA

