

Eletricidade Básica II

Grandezas magnéticas fundamentais

Fluxo magnético - Φ

O fluxo magnético é a quantidade de linhas de indução usadas na representação de um campo magnético numa determinada área que essas linhas atravessam.

A unidade do fluxo magnético no sistema internacional de medida é o weber (Wb). Um weber (Wb) é uma unidade bastante grande o representa uma quantidade de 10^8 linhas de indução. No sistema CGS o fluxo magnético tem como unidade uma linha de indução ou um maxwell (Mx) e as relações que existem entre estas unidades são:

$$1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx} = 10^8 \text{ linhas de indução}$$

Quando um condutor é submetido a um campo magnético, que varia do seu valor máximo a zero no tempo de um segundo, provocando o aparecimento de uma fem induzida de 1 volt, diz-se que este campo produz um fluxo máximo de 1 weber.

Força magnetomotriz - fmm

A força magnetomotriz é definida como o agente responsável pelo surgimento de um campo magnético. Como, em eletromagnetismo, o agente responsável é a corrente elétrica, tem-se:

$$f_{mm} = i$$

Onde

f_{mm} - é a força magnetomotriz

i - é a corrente elétrica

Para aumentar o campo magnético, por meio do eletromagnetismo enrolase o condutor em forma de bobina. Os efeitos dos campos magnéticos tornam-se N vezes mais fortes, de acordo com o número N de voltas ou espiras, então:

$$f_{mm} = N i$$

$$fmm = N i$$

Onde

N - é o número de espiras da bobina

i - é a corrente elétrica na bobina

A unidade é o ampère-espiras e o seu símbolo é o Ae.

A intensidade do campo magnético num ponto qualquer próximo do condutor percorrido por uma corrente elétrica é diretamente proporcional a intensidade da corrente que produz o campo magnético, e inversamente proporcional ao comprimento do circuito magnético, ou seja:

$$H = \frac{i}{\ell} \quad \Rightarrow \quad H = \frac{i}{2\pi R}$$

Onde

H - é a intensidade do campo magnético

i - e a intensidade da corrente elétrica

Permeabilidade magnética - μ

A permeabilidade magnética exprime a facilidade que um meio, de área e comprimento unitários, oferece ao estabelecimento de um campo magnético. Pode também ser compreendida como a grandeza que caracteriza a qualidade magnética de um material, ou simplesmente a facilidade com que o material magnetiza-se.

A permeabilidade magnética de um material é comparada com a permeabilidade do vácuo obtendo-se então a permeabilidade magnética relativa – μ_r , que mostra quantas vezes é mais fácil o estabelecimento do campo magnético em outro meio qualquer, ou seja:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Onde

μ_r - é a permeabilidade relativa do material

μ_0 - é a permeabilidade do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$)

μ - é a permeabilidade de um meio qualquer

A permeabilidade magnética de um material relaciona a densidade de fluxo magnético e a intensidade do campo magnético da seguinte forma:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Sua unidade pode ser obtida por:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{T}{Ae/m} = \frac{T \cdot m}{Ae}$$

Permeância - P

A permeância é a facilidade que um meio oferece ao estabelecimento de um campo magnético. É diretamente proporcional à permeabilidade magnética (μ) e a área (S), e inversamente proporcional ao comprimento do material em que está sendo criado o campo (ℓ), ou seja:

$$P = \frac{\mu \cdot S}{\ell}$$

Onde

P - é a permeância

μ - é a permeabilidade magnética do meio

S - é a área do circuito magnético

ℓ - é o comprimento do circuito magnético

Sua unidade é o weber/ampère.espira (wb/Ae)

Relutância - R

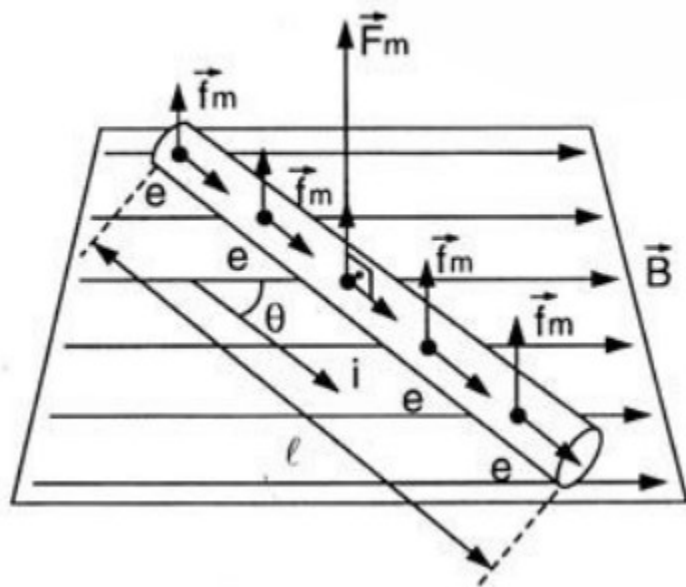
A relutância corresponde á dificuldade oferecida pelo meio ao estabelecimento de um campo magnético, ou seja, é o inverso da permeância:

$$R = \frac{1}{P} = \frac{\ell}{\mu \cdot S}$$

A unidade da relutância é o ampère-espira/weber (Ae/wb)

Força eletromagnética - segundo fenômeno do eletromagnetismo - F_m

Um condutor de comprimento ℓ percorrido por uma corrente elétrica i , colocado perpendicularmente a um campo magnético uniforme B , terá em cada uma das cargas que constituem a corrente elétrica uma força magnética F_m . A força magnética resultante \vec{F}_m será a soma das forças magnéticas que agem sobre todas as cargas elétricas elementares contidas no comprimento ℓ , conforme a figura 6.21.



FORÇA ELETROMAGNÉTICA

Em outras palavras, o fenômeno do eletromagnetismo que explica a força eletromagnética pode ser descrito da seguinte forma:

- um condutor percorrido por uma corrente elétrica, imerso num campo magnético, vai estar sujeito a uma força eletromagnética;
- a força eletromagnética surge da interação entre o campo magnético externo e campo magnético criado ao redor do condutor, conduzindo a corrente elétrica;
- a intensidade e o sentido da força magnética podem ser definidos da seguinte forma:

a) intensidade:

b)

$$\vec{F}_m = \vec{B} \cdot i \cdot \ell \cdot \sin \theta$$

$$\vec{F}_m = \vec{B} \cdot i \cdot \ell \cdot \sin \theta$$

Onde

\vec{F}_m - é a força eletromagnética sobre o condutor

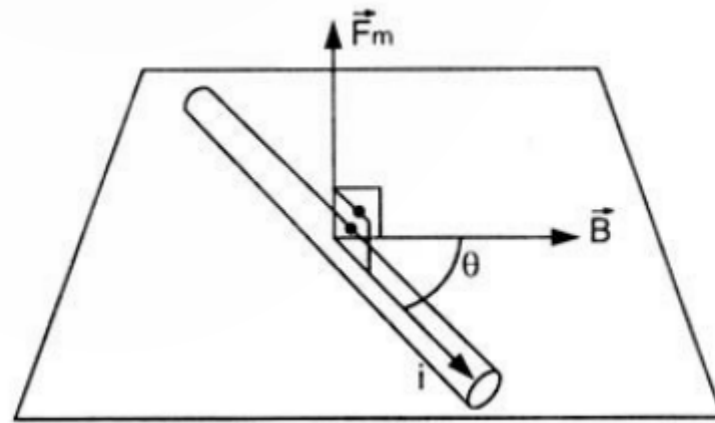
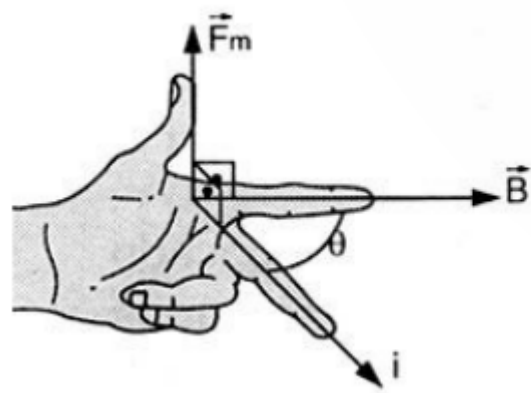
\vec{B} - é a densidade de fluxo, ou vetor indução magnética

i - é a intensidade da corrente elétrica que passa pelo conduto

ℓ - é o comprimento ativo do material

θ - é o ângulo formado entre o condutor retilíneo e a direção das linhas de indução

b) o sentido da força magnética pode ser determinado pela regra da mão esquerda onde os dedos indicador, médio e polegar devem estar perpendiculares entre si, indicando: sentido do campo magnético, sentido da corrente (convencional) e o sentido da força magnética respectivamente. A regra da mão esquerda é também chamada regra de Fleming para motores, que pode ser demonstrada conforme a figura.

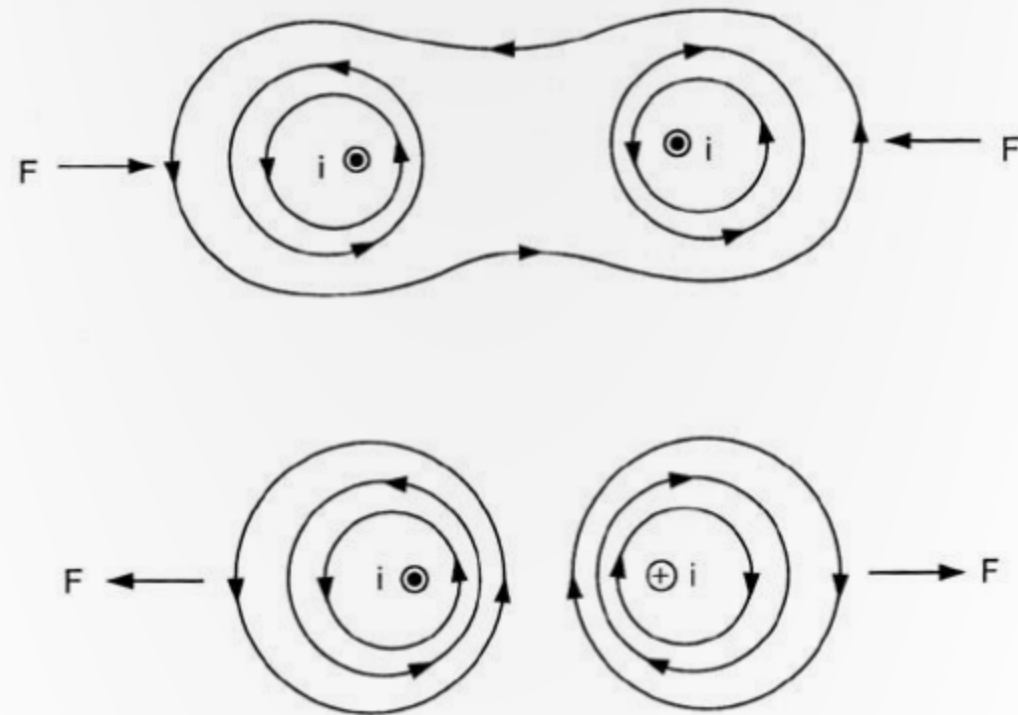


REGRA DA MÃO ESQUERDA

É importante lembrar que o sentido da corrente analisada em eletromagnetismo é, normalmente, o sentido convencional da corrente.

Esta força eletromagnética pode dar origem a uma força mecânica e é a responsável pelo princípio de funcionamento dos motores elétricos e de alguns instrumentos de medida.

Se dois condutores, conduzindo corrente elétrica, forem colocados próximos um do outro, haverá uma interação entre os campos magnéticos formados por eles, de tal forma que, quando as correntes forem de mesmo sentido, haverá uma força de atração, e quando as correntes tiverem sentidos contrários, aparecerá uma força de repulsão. (Fig. 6.23)



INTERAÇÃO ENTRE CAMPOS MAGNÉTICOS DE CONDUTORES

Força eletromotriz induzida

O fenômeno da força eletromotriz induzida é conhecido como o terceiro fenômeno do eletromagnetismo, que pode ser enunciado da seguinte forma:

“Se um condutor estiver imerso num campo magnético, desde que haja movimento relativo entre eles, surgirá uma ddp entre suas extremidades.”

O movimento relativo pode ser:

- movimento do condutor em relação ao campo magnético ou vice-versa;
- submeter o condutor a um campo magnético variável.

A diferença de potencial surge quando o condutor é “cortado” pelas linhas de indução, fazendo com que haja variação de fluxo magnético nele. Esta ddp é conhecida como força eletromotriz induzida ou simplesmente fem induzida, e o fenômeno é denominado de indução eletromagnética.

O fenômeno da indução eletromagnética foi descoberto por Michael Faraday no ano de 1831.

Os estudos e as experiências realizadas por Faraday revelaram que a força eletromotriz induzida surge sempre quando ocorre variação de fluxo magnético no condutor ou circuito. E quanto mais rápida for esta variação. Maior será a fem induzida Daí surgiu a Lei de Faraday da indução eletromagnética, que

é escrita da seguinte forma:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Nesta expressão, $\Delta\Phi$ é a variação de fluxo magnético que ocorre no intervalo de tempo Δt e E a fem induzida.

Esta lei descreve a indução eletromagnética de uma forma geral. Uma variação do fluxo magnético num condutor necessária para que ocorra a indução.

Intensidade e sentido da fem induzida

A fem induzida em um condutor retilíneo que se movimenta em um campo magnético uniforme pode ser calculada pela expressão:

$$E = B \ell v \sen \theta$$

Onde

E - é a fem induzida

B - é a densidade de fluxo

v - é a velocidade do movimento

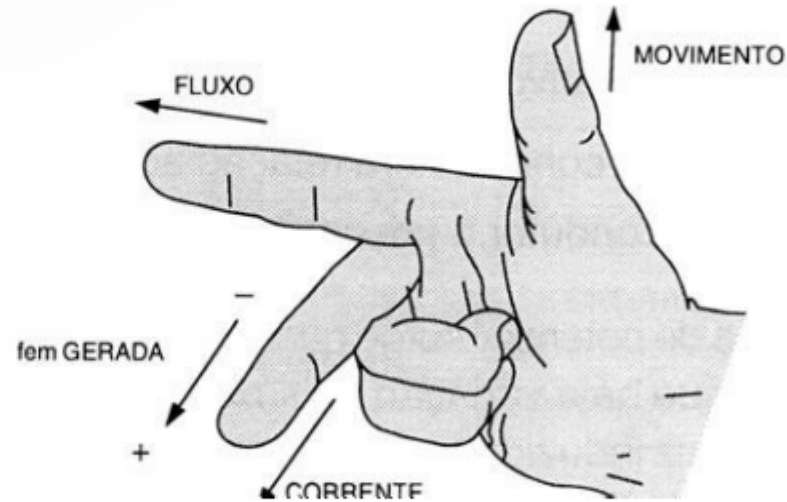
ℓ - é o comprimento ativo do condutor

θ - é o ângulo formado entre o condutor e o sentido das linhas de indução

O sentido da fem induzida pode ser determinado pela regra da mão direita, também chamada de regra de Fleming, para o sentido convencional da corrente elétrica. Colocando-se os dedos indicador, médio e polegar perpendiculares entre si, eles indicarão o sentido do campo magnético, o sentido da corrente induzida (devido a fem induzida) e o sentido do movimento respectivamente, conforme a figura.

O sentido da fem induzida pode ser determinado pela regra da mão direita, também chamada de regra de Fleming, para o sentido convencional da corrente elétrica. Colocando-se os dedos indicador, médio e polegar perpendiculares entre si, eles indicarão o sentido do campo magnético, o sentido da corrente induzida (devido a fem induzida) e o sentido do movimento respectivamente, conforme a figura .

REGRA DA MÃO DIREITA



A palavra indução tem o significado semelhante a influência, interação ou ação à distância. Sempre que a fem é gerada por ação de um campo magnético ela será chamada de fem induzida; a corrente produzida por esta tensão é denominada corrente induzida, O campo magnético que deu origem a estes fenômenos é chamado campo indutor, que é a causa; e o campo magnético criado pela corrente induzida é chamado campo induzido que é o efeito. Os geradores de corrente contínua, os geradores de corrente alternada e os transformadores são aplicações do terceiro fenômeno do eletromagnetismo.

Lei de Lenz

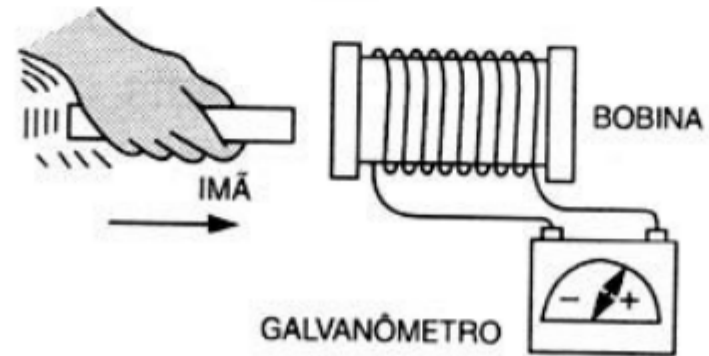
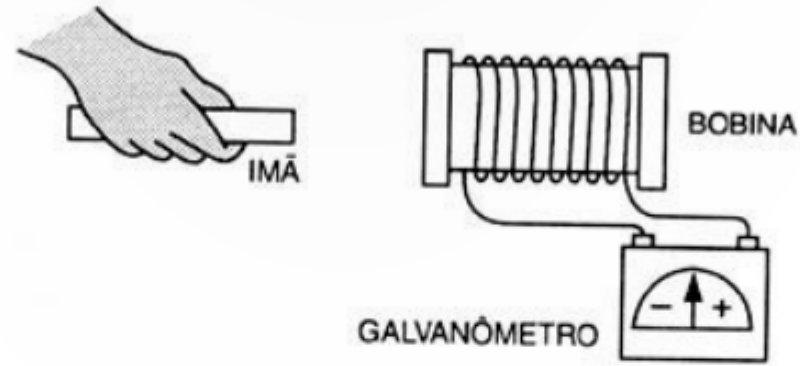
O físico russo Heinrich Lenz publicou, em 1834, um trabalho que veio complementar a Lei de Faraday. A Lei de Lenz, como passou a ser conhecida, estabeleceu de forma universal o sentido da fem induzida.

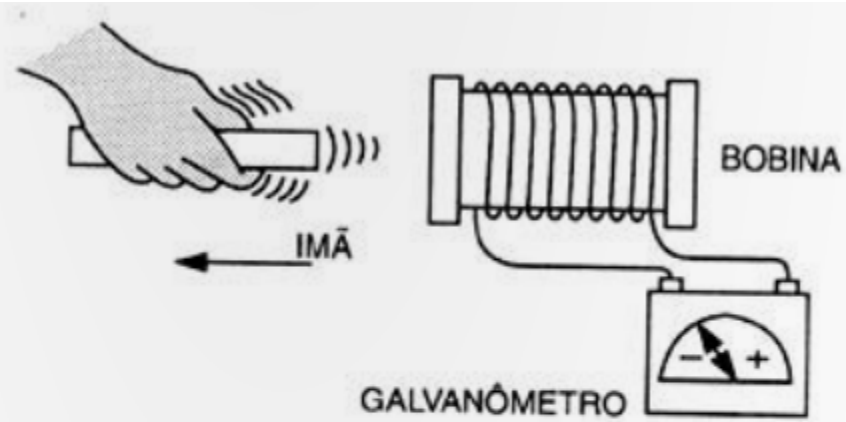
Conforme o Princípio de Conservação de Energia, a energia não pode ser criada, nem destruída, mas apenas transformada em uma outra forma de energia. Baseado nesta afirmativa, quando um fluxo varia dentro de um campo elétrico, gera-se fem e corrente induzida, o que significa a presença de energia elétrica, conforme a figura 6.25.

O fluxo criado pela corrente induzida deve então tentar impedir a variação do fluxo indutor, que é a causa da fem induzida. Assim sendo, para manter a geração de energia elétrica, torna-se necessário o consumo de outra forma de energia para vencer esta oposição. Este fenômeno é conhecido como a Lei do Lenz e pode ser enunciado da seguinte forma:

“Uma variação de fluxo gera uma fem induzida num condutor com o qual se concatena, cujo sentido é tal que a corrente induzida cria um fluxo que tende a anular a variação do fluxo indutor.”

Em outras palavras, pode-se dizer que a fem induzida é tal que se opõe, pelos seus efeitos, à causa que a originou.





INDUÇÃO MAGNÉTICA

Fig. 6.25

Conseqüentemente, o fenômeno da indução magnética deve ser expresso, matematicamente, pelo sinal (-) na equação de Faraday.

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Caso o condutor seja enrolado sob a forma de uma bobina de N espiras, tem-se:

$$E = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Indutância - L

Indutância é a propriedade que tem um corpo de fazer aparecer em si mesmo ou em outro condutor uma fem induzida.

Como já foi estudado anteriormente, para que seja criada uma fem induzida num condutor é necessário que o mesmo seja submetido a uma variação de fluxo magnético. Consequentemente, a indutância de um material é uma propriedade que só se manifesta quando a corrente que passa pelo condutor varia de intensidade, o que produz um campo magnético variável, ao qual está submetido o condutor.

A fem induzida é proporcional à variação do fluxo, que, por sua vez, é proporcional a variação da corrente. Matematicamente, pode-se verificar que:

$$E \propto \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{e} \quad E \propto \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Para exprimir esta proporção em uma equação matemática, basta multiplicá-la por uma constante, ou seja:

$$E = -L \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{ou} \quad E = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Onde

E - é a tensão induzida

L - é a indutância ou coeficiente de auto indução

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ - taxa de variação de fluxo

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$ - taxa de variação de corrente

A unidade de medida da indutância é o henry (H), sendo mais usados os seus submúltiplos mH e μH .

Um indutor possui a indutância de 1 henry se a fem de auto-indução for de 1 volt quando a corrente varia de 1 ampère em 1 segundo.

Auto-indução

Sempre que houver variações de fluxo magnético num condutor surgirá nos terminais deste, uma fem induzida.

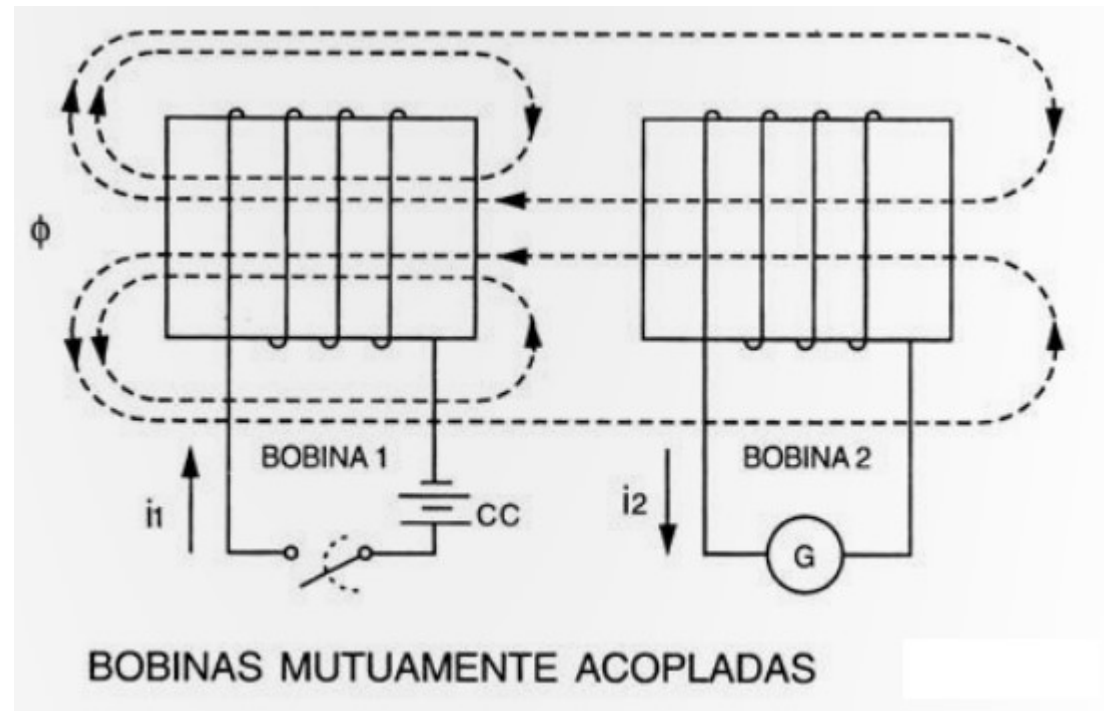
Quando o condutor induz em si mesmo uma força eletromotriz induzida, chama-se o fenômeno de auto-indução e diz-se que o condutor apresenta auto-indutância. A força eletromotriz induzida neste caso é conhecida também como força eletromotriz de auto-indução.

O fenômeno da auto-indução é pequeno em circuitos com condutores retilíneos, mas aumenta consideravelmente quando o condutor é uma bobina.

Indução mútua - M

Normalmente, quando duas bobinas estão próximas, de forma que o fluxo produzido por uma atravesse o espaço da outra, são consideradas como estando mutuamente acopladas.

Cada uma das bobinas possui uma auto-indutância, pois elas podem produzir uma tensão induzida em seu próprio enrolamento como resultado da variação de seu próprio fluxo magnético produzido. Existindo um acoplamento magnético mútuo, a tensão induzida em uma bobina é também induzida na segunda bobina como resultado da variação do fluxo produzido.



Quando a chave é fechada, surge uma corrente na bobina 1 limitada apenas pela resistência dos condutores da bobina. Houve, então, uma variação de fluxo que era zero e chegou ao máximo. Este fluxo que enlaça as bobinas 2 e 1, pelas leis de Faraday e Lenz, induz na bobina 2 uma fem dada por:

$$E_2 = -M_{12} \frac{di_1}{dt}$$

Onde

E_2 - é a tensão induzida na bobina 2

M_{12} - é a indutância mútua da bobina 1 para a bobina 2

$\frac{di_1}{dt}$ - é a taxa de variação da corrente na bobina 1

Quando a corrente da primeira bobina aumenta, o campo magnético em ambas aumentou. Pela Lei de Lenz, a tensão induzida na bobina 2 é oposta à que foi desenvolvida quando a chave foi inicialmente fechada.

Se a situação das bobinas fosse invertida, ou seja, se a fonte CC e a chave fossem trocadas da bobina 1 com o galvanômetro da bobina 2, a tensão E_1 seria induzida na bobina 1 como resultado da corrente na bobina 2. Assim, a fem_1 seria:

$$E_1 = -M_{21} \frac{di_2}{dt}$$

A indutância mútua da bobina 2 para a bobina 1 é M_{21} . Então pode-se concluir que:

$$M = M_{12} = M_{21}$$

Num circuito acoplado, a bobina na qual a energia elétrica é aplicada é denominado enrolamento primário, e a bobina na qual é induzida uma fem através do acoplamento mútuo é o enrolamento secundário. Nem todo o fluxo primário pode envolver o enrolamento secundário. então, pode-se definir o coeficiente de acoplamento k da seguinte forma:

$$k = \frac{\Phi_m}{\Phi_p}$$

Onde

k - é o coeficiente de acoplamento

Φ_m - é o fluxo mútuo que enlaça ambos os enrolamentos

Φ_p - é o fluxo total do primário

Pode-se observar que k nunca é maior que 1. Dependendo de quanto o fluxo de uma bobina enlaça a outra, muito ou pouco, as bobinas são consideradas como fortemente ou fracamente acopladas, respectivamente.

O coeficiente de acoplamento pode ser aumentado de duas formas:

- aproximando as bobinas e alinhando seus eixos;
- introduzindo um núcleo magnético com o objetivo de diminuir a dispersão de fluxo magnético.

A indutância mútua pode ser obtida da seguinte forma:

- Definindo a indutância:

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

de forma que:

$$L = N \frac{d\Phi}{di}$$

Esta expressão mostra que as indutâncias mútuas são:

$$M_{12} = N_2 k \left(\frac{d\Phi_1}{dt_1} \right) \quad e \quad M_{21} = N_1 k \left(\frac{d\Phi_2}{dt_2} \right)$$

O produto $M_{12} \cdot M_{21}$ é:

$$M_{12} \cdot M_{21} = M^2 = N_1 \cdot N_2 \cdot k^2 \left(\frac{d\Phi_1}{dt_1} \right) \cdot \left(\frac{d\Phi_2}{dt_2} \right)$$

Como as expressões das auto-indutâncias são:

$$L_1 = N_1 \frac{d\Phi_1}{di_1} \quad L_2 = N_2 \frac{d\Phi_2}{di_2}$$

Substituindo estas expressões na expressão produto M_{12}

$$M^2 = k^2 \cdot L_1 \cdot L_2$$

ou

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$$

Este é o princípio de funcionamento dos transformadores e o fenômeno é conhecido como indução mútua ou indutância mútua.

Indutores

Indutância é uma propriedade que tende a se opor a qualquer variação da corrente em um circuito elétrico.

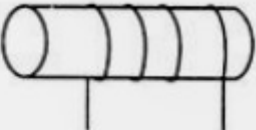
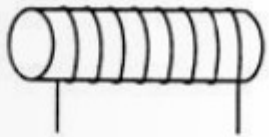
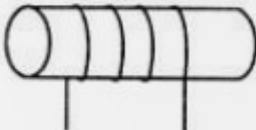
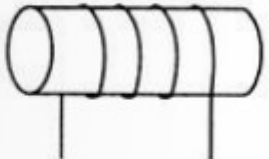
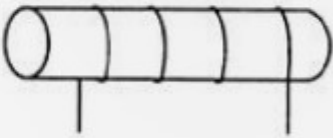
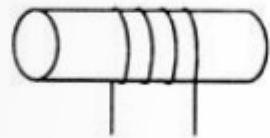
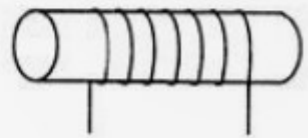
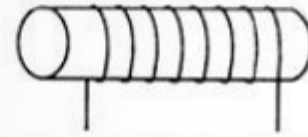
O componente que exhibe a propriedade da indutância é chamado indutor. O indutor mais comum é uma bobina feita de fio enrolado.

Enrolando-se o fio em forma de bobina, o indutor se torna menor e mais compacto e, ao mesmo tempo, a indutância aumenta bastante. Mantendo-se as espiras do fio juntas umas das outras, o campo magnético que circunda o fio se tornará mais concentrado.

Quanto maior o campo magnético, maior a tensão induzida e, portanto, maior indutância.

Fatores que afetam a indutância

As características físicas de uma bobina determinam sua indutância, que vai depender: do número de espiras; do espaçamento entre espiras; do diâmetro do fio; do formato da bobina; do número de camadas do enrolamento; do tipo de enrolamento; do diâmetro da bobina; do comprimento da bobina e do tipo de material do núcleo. Alguns destes fatores estão resumidos na figura .

	INDUTÂNCIA	
	BAIXA	ALTA
NÚMERO DE ESPIRAS		
DIÂMETRO		
COMPRIMENTO E ESPAÇAMENTO DAS ESPIRAS		
MATERIAL DO NÚCLEO	NÚCLEO NÃO MAGNÉTICO 	NÚCLEO MAGNÉTICO 

FATORES QUE INFLUENCIAM NA INDUTÂNCIA

Um fator importante para a indutância é o tipo de material utilizado no núcleo. Muitas bobinas não têm núcleos, sendo conhecidas como indutores com núcleos de ar. Outras são feitas com núcleos que exibem propriedades magnéticas como o ferro, aço e certas ligas que podem concentrar as linhas de indução traduzidas pela bobina e, portanto, aumentam a intensidade do campo magnético. Dessa maneira, aumenta também a tensão induzida e, portanto, a indutância.

O efeito do material do núcleo sobre a indutância da bobina é determinado pela permeabilidade magnética desse material (μ).

E comum usar a expressão matemática, a seguir, como objetivo de calcular o coeficiente de auto-indutância ou simplesmente a indutância de uma bobina.

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot S}{\ell}$$

Onde

L - é o coeficiente da auto-indutância, ou indutância

μ - é a permeabilidade do meio em que é criado o campo magnético

N - é o número de espiras da bobina

S - é a seção transversal do circuito magnético

ℓ - é o comprimento do circuito magnético da bobina

Associação de indutores

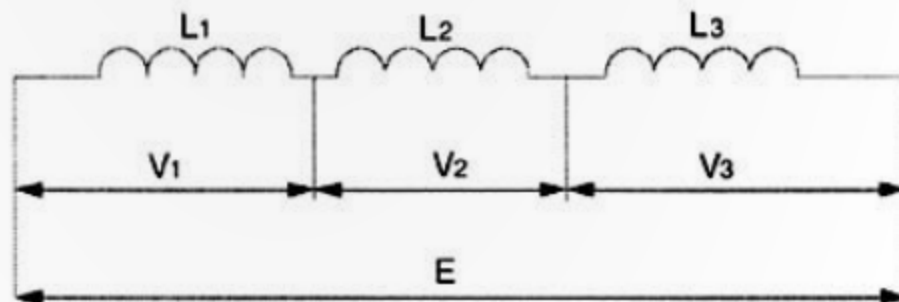
O indutor tem várias aplicações em eletricidade na forma de bobinas usadas em rádios, televisores, equipamentos de som, etc

Da mesma forma que acontece com os resistores e capacitores, não se tem indutores de todos os valores possíveis. Necessita-se associá-los de maneira adequada para se obter os valores desejados.

Numa associação de indutores deve-se prever se haverá, ou não, indutância mútua entre eles, pois alterará o valor da indutância total.

Associação série de indutores sem indutância mútua

Seja uma associação de três indutores conforme a figura 6.28.



ASSOCIAÇÃO DE INDUTORES

$$L_t = L_1 + L_2 + L_3$$

Onde

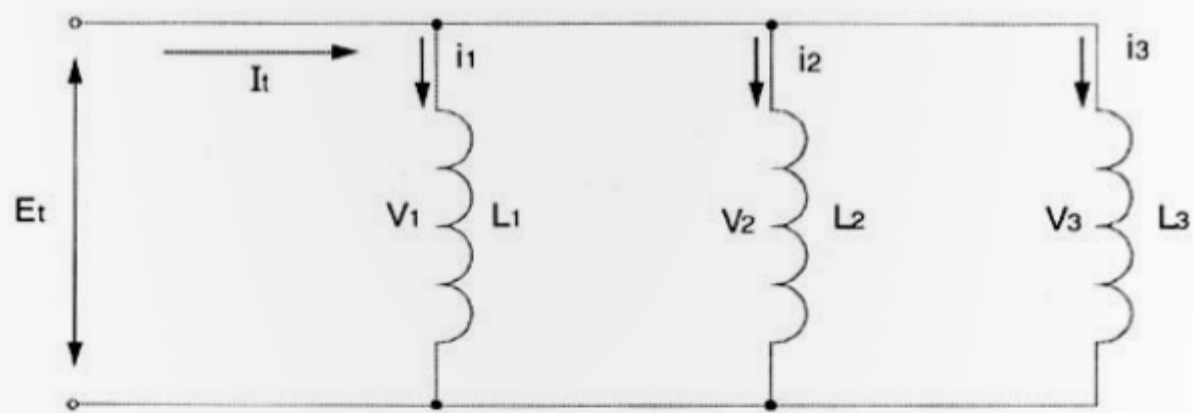
L_t - é a indutância total da associação

L_1 , L_2 e L_3 - são as indutâncias parciais

Associação paralela de indutores sem indutância mútua

Da mesma forma que é realizada a associação de resistores é feita a associação de indutores, desde que não haja indutância mútua.

A figura 6.29 apresenta 3 indutores que não possuem a indutância mútua,



ASSOCIAÇÃO PARALELO Fig. 6.29

$$L_t = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}}$$

Se a associação for de apenas dois indutores, sejam quais forem os seus valores, pode-se usar a seguinte fórmula:

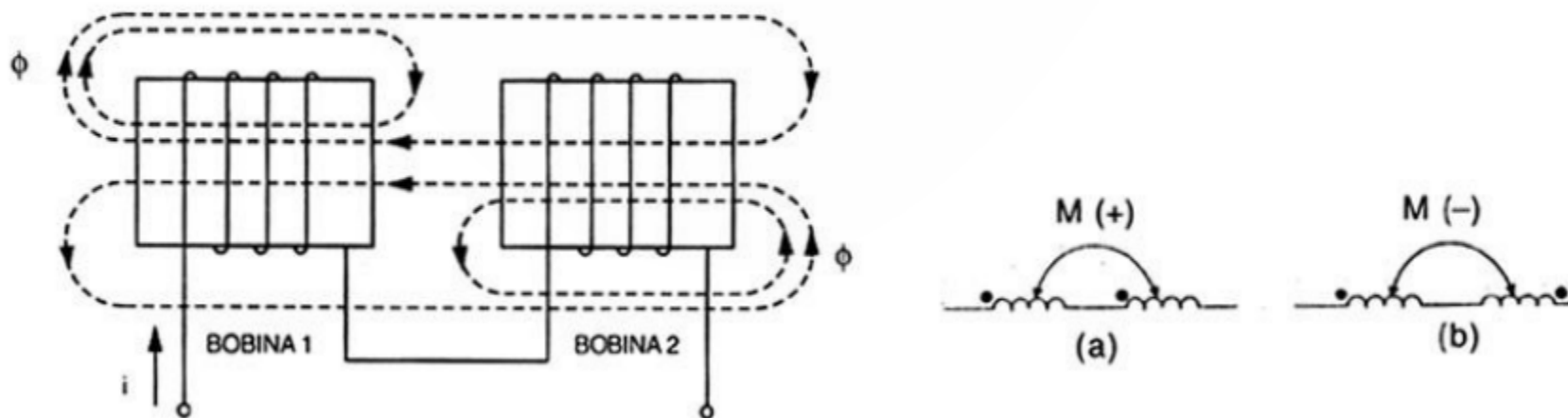
$$L_t = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

Para um número n qualquer de indutores de mesmo valor associados em paralelo, pode-se usar a fórmula a seguir:

$$L_t = \frac{L}{n}$$

Quando mais de dois indutores são associados e entre todos eles houver indutância mútua, o cálculo da indutância se torna complexo. Por isto, o estudo será feito para apenas dois indutores

Ao associar dois indutores, os campos magnéticos podem ter os mesmos sentidos ou sentidos contrários, e a associação é chamada aditiva ou subtrativa, respectivamente. A figura 6.30 apresenta um exemplo de duas bobinas conectadas em série aditiva.



Como a associação é aditiva, pode-se deduzir que:

$$E_T = E_1 + E_2 + E'_1 + E'_2$$

Onde

E'_1 e E'_2 são as fems induzidas nos indutores 1 e 2 pela indutância mútua.
Portanto:

$$L_t = \frac{\Delta i}{\Delta t} = L_1 \frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2 \frac{\Delta i}{\Delta t} + M_1 \frac{\Delta i}{\Delta t} + M_2 \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Sabe-se que a variação da corrente é a mesma em todos os indutores e que a indutância mútua tem o mesmo valor nos dois sentidos. Dividindo-se ambos os membros por $\Delta i / \Delta t$, tem-se:

$$L_t = L_1 + L_2 + M_1 + M_2.$$

Como: $M_1 = M_2$, pois dependem apenas de k , L_1 e L_2 conclui-se:

$$L_t = L_1 + L_2 + 2M$$

Se a associação for subtrativa a fórmula será:

$$L_t = L_1 + L_2 - 2M$$

Geralmente, colocam-se as duas fórmulas, numa só:

$$L_t = L_1 + L_2 \pm 2M$$

- **Exemplo**

Calcular a indutância total de uma associação série de dois indutores, $L_1 = 50 \text{ mH}$ e $L_2 = 80 \text{ mH}$, quando:

- a) não houver indutância mútua;
- b) houver indutância mútua para que a associação seja aditiva e $k = 0,8$
- c) idem a letra b, para associação subtrativa e $k = 0,6$.

Solução

- a) Se não existe indutância mútua, só aplicar a fórmula

$$L_t = L_1 + L_2 = 50 + 80 = 130 \text{ mH}$$

- b) Calcula-se o valor da indutância mútua M .

$$M = k\sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad \Rightarrow \quad M = 0,8\sqrt{50 \cdot 80} \quad \Rightarrow \quad M = 50,6 \text{ mH}$$

Calcula-se a indutância equivalente

$$L_t = L_1 + L_2 + 2M \Rightarrow L_t = 50 + 80 + 2(50,6) \Rightarrow L_t = 231,2 \text{ mH}$$

c) Realizando as mesmas operações porém utilizando o coeficiente de acoplamento igual 0,6 e calculando a associação subtrativa, tem-se:

$$M = k\sqrt{L_1 \cdot L_2} \Rightarrow M = 0,6\sqrt{50 \cdot 80} \Rightarrow M = 37,95 \text{ mH}$$

$$L_t = L_1 + L_2 - 2M \Rightarrow L_t = 50 + 80 - 2(37,95) \Rightarrow L_t = 54,1 \text{ mH}$$

Quando duas bobinas mutuamente acopladas são conectadas em paralelo, a indutância total será obtida através da seguinte equação:

$$L_t = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \pm 2M}$$

O sinal negativo do denominador é usado quando as bobinas são aditivas e o sinal positivo, quando as bobinas são subtrativas.

• Exemplo

Um indutor de 10 mH é associado em paralelo com um outro indutor do mesmo valor. Calcule a indutância quando:

- a) quando não houver indutância mútua;
- b) quando houver uma associação aditiva e $k = 0,8$;
- c) quando houver uma associação subtrativa e $k = 0,6$.

Solução

a) Aplicação da fórmula direta:

$$L_t = \frac{L}{2} \Rightarrow L_t = \frac{10}{2} = 5\text{mH}$$

b) Calcula-se o valor da indutância mútua e, logo após, o valor da indutância equivalente.

$$M = k\sqrt{L_1 \cdot L_2} \Rightarrow M = 0,8\sqrt{10 \cdot 10} \Rightarrow M = 8\text{mH}$$

$$L_t = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} \Rightarrow L_t = \frac{10 \cdot 10 - 8^2}{10 + 10 - 2 \cdot 8} \Rightarrow L_t = \frac{36}{4} \Rightarrow L_t = 9\text{mH}$$

e) Idem ao item anterior, porém com o coeficiente de acoplamento igual a 0,6 e para a associação subtrativa.

$$M = k\sqrt{L_1 \cdot L_2} \Rightarrow M = 0,6\sqrt{10 \cdot 10} \Rightarrow M = 6\text{mH}$$

$$L_t = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} \Rightarrow L_t = \frac{10 \cdot 10 - 6^2}{10 + 10 - 2 \cdot 6} \Rightarrow L_t = \frac{64}{32} \Rightarrow L_t = 2\text{mH}$$