
Introdução ao Eletromagnetismo

Unidade 1/4

Prof. Carlyle Câmara Santos Júnior

Instituto Federal de Santa Catarina – Campus São José
Engenharia de Telecomunicações
Eletromagnetismo (EMG129005) – 5ª Fase

`carlyle.camara@ifsc.edu.br`

12 de agosto de 2025



1 Observações gerais

2 Conceitos básicos

3 Síntese

4 Referências

Observações gerais



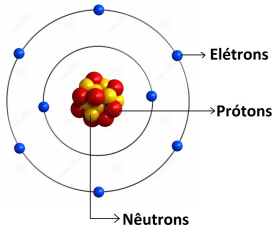
- Conteúdo:
 - 1 Conceitos básicos de eletromagnetismo.
- Objetivo:
 - 1 Compreender os fundamentos da teoria eletromagnética.

Conceitos básicos

Carga elétrica [2]

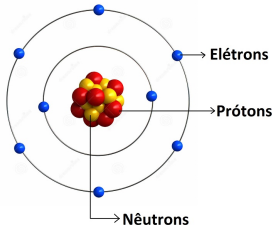


- A carga elétrica é uma propriedade básica da matéria.
- Elétrons apresentam carga **negativa (-)** e prótons apresentam carga **positiva (+)**.
- No Sistema Internacional (SI), medimos a carga elétrica em coulomb (símbolo C).
- Um elétron possui carga dada por $-1,602 \times 10^{-19}$ C e um próton possui carga igual a $+1,602 \times 10^{-19}$ C.
- A carga elétrica é **quantizada**: $q = \pm n \times e$.
- A **conservação da carga** é uma lei fundamental do universo.





- A carga elétrica é uma propriedade básica da matéria.
- Elétrons apresentam carga **negativa (-)** e prótons apresentam carga **positiva (+)**.
- No Sistema Internacional (SI), medimos a carga elétrica em coulomb (símbolo C).
- Um elétron possui carga dada por $-1,602 \times 10^{-19}$ C e um próton possui carga igual a $+1,602 \times 10^{-19}$ C.
- A carga elétrica é **quantizada**: $q = \pm n \times e$.
- A **conservação da carga** é uma lei fundamental do universo.
- Qual é a quantidade de elétrons correspondente a uma carga de -1 C?





- A estrutura dos materiais e as suas propriedades são determinadas a partir de uma combinação entre forças elétricas e efeitos quânticos:
 - 1 Em condutores elétricos, os elétrons podem se mover livremente;
 - 2 Em isolantes, os elétrons se encontram presos a núcleos individuais.



- A estrutura dos materiais e as suas propriedades são determinadas a partir de uma combinação entre forças elétricas e efeitos quânticos:
 - 1 Em condutores elétricos, os elétrons podem se mover livremente;
 - 2 Em isolantes, os elétrons se encontram presos a núcleos individuais.
- A força eletromagnética que age sobre uma carga elétrica q é dada por:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

em que \mathbf{v} é a velocidade da carga, enquanto \mathbf{E} e \mathbf{B} são os vetores campo elétrico e densidade de fluxo magnético, respectivamente.



- A estrutura dos materiais e as suas propriedades são determinadas a partir de uma combinação entre forças elétricas e efeitos quânticos:
 - 1 Em condutores elétricos, os elétrons podem se mover livremente;
 - 2 Em isolantes, os elétrons se encontram presos a núcleos individuais.
- A força eletromagnética que age sobre uma carga elétrica q é dada por:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

em que \mathbf{v} é a velocidade da carga, enquanto \mathbf{E} e \mathbf{B} são os vetores campo elétrico e densidade de fluxo magnético, respectivamente.

- O efeito das forças elétricas de todas as outras cargas do universo pode ser sintetizado nos vetores \mathbf{E} e \mathbf{B} , cujos valores dependem da posição e do tempo.



- Para determinar o movimento dos portadores de carga, precisamos encontrar **E** e **B**.



- Para determinar o movimento dos portadores de carga, precisamos encontrar **E** e **B**.
- Um dos princípios mais importantes acerca da geração dos campos elétrico e magnético é o da superposição:
 - 1 Suponhamos que um conjunto de cargas produza um campo **E**₁;
 - 2 Suponhamos que outro conjunto de cargas produza um campo **E**₂;
 - 3 Quando esses dois conjuntos de carga estiverem presentes ao mesmo tempo, o campo total será **E** = **E**₁ + **E**₂.
- O princípio da superposição também é válido para o magnetismo.



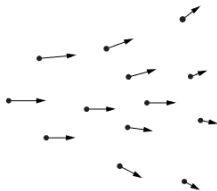
- Para determinar o movimento dos portadores de carga, precisamos encontrar **E** e **B**.
- Um dos princípios mais importantes acerca da geração dos campos elétrico e magnético é o da superposição:
 - 1 Suponhamos que um conjunto de cargas produza um campo **E**₁;
 - 2 Suponhamos que outro conjunto de cargas produza um campo **E**₂;
 - 3 Quando esses dois conjuntos de carga estiverem presentes ao mesmo tempo, o campo total será **E** = **E**₁ + **E**₂.
- O princípio da superposição também é válido para o magnetismo.
- Com base nisso, basta conhecer a lei dos campos elétrico e magnético para uma única carga arbitrária em movimento para conhecer todas as leis do eletromagnetismo.



- Como os vetores \mathbf{E} e \mathbf{B} dependem da posição (x, y, z) e do tempo t , descrevemos os seus valores assim: $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ e $\mathbf{B}(x, y, z, t)$.
- Além disso, cada um deles possui três componentes: E_x , E_y e E_z , bem como B_x , B_y e B_z .
- Eles são campos vetoriais.

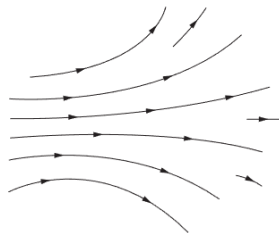
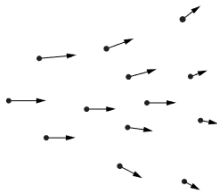


- Como os vetores \mathbf{E} e \mathbf{B} dependem da posição (x, y, z) e do tempo t , descrevemos os seus valores assim: $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ e $\mathbf{B}(x, y, z, t)$.
- Além disso, cada um deles possui três componentes: E_x , E_y e E_z , bem como B_x , B_y e B_z .
- Eles são campos vetoriais.





- Como os vetores \mathbf{E} e \mathbf{B} dependem da posição (x, y, z) e do tempo t , descrevemos os seus valores assim: $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ e $\mathbf{B}(x, y, z, t)$.
- Além disso, cada um deles possui três componentes: E_x , E_y e E_z , bem como B_x , B_y e B_z .
- Eles são campos vetoriais.
- Na representação por linhas de campo, a densidade das linhas é uma estimativa da magnitude do vetor.



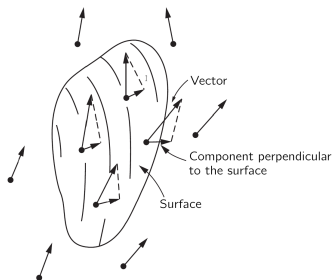
Características dos campos vetoriais [1]



- Uma das duas principais características de um campo vetorial é o seu fluxo.
- Para uma superfície fechada arbitrária, definimos o fluxo assim:

$$\text{Fluxo} = (\text{componente normal média}) \cdot (\text{área da superfície}). \quad (2)$$

- Na figura abaixo, ilustramos uma superfície fechada em meio a um campo vetorial, o qual pode representar a velocidade de um fluido.

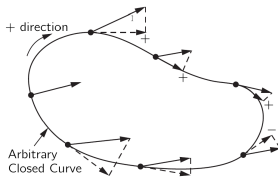




- A outra característica essencial de um campo vetorial é a sua circulação.
- Para uma curva fechada arbitrária, definimos a circulação assim:

$$\text{Circulação} = (\text{componente tangencial média}) \cdot (\text{comprimento da curva}). \quad (3)$$

- Na figura abaixo, ilustramos uma curva fechada em meio a campo vetorial, o qual pode representar a velocidade de um fluido.





- A primeira lei do eletromagnetismo relaciona o fluxo do campo elétrico e a carga elétrica.
- Especificamente, para uma superfície fechada S qualquer que envolva um volume V , temos:

$$\text{Fluxo de } \mathbf{E} \text{ através de } S = \frac{\text{carga elétrica em } V}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

em que ϵ_0 é a permissividade do espaço livre.

- Se não houver carga elétrica no interior da superfície, o valor médio da componente normal do campo elétrico será zero, portanto não haverá fluxo através da superfície.
- Podemos demonstrar que a Eq. (4) é equivalente à lei de Coulomb, dada a hipótese adicional de que o campo elétrico de uma só carga é simétrico esfericamente.



- Outra lei do eletromagnetismo conecta a circulação de **E** ao fluxo de **B**.
- Para qualquer superfície não fechada S cuja fronteira seja a curva C , verificamos que

$$\text{Circulação de } \mathbf{E} \text{ em torno de } C = -\frac{d}{dt}(\text{fluxo de } \mathbf{B} \text{ através de } S). \quad (5)$$



- Outra lei do eletromagnetismo conecta a circulação de **E** ao fluxo de **B**.
- Para qualquer superfície não fechada S cuja fronteira seja a curva C , verificamos que

$$\text{Circulação de } \mathbf{E} \text{ em torno de } C = -\frac{d}{dt}(\text{fluxo de } \mathbf{B} \text{ através de } S). \quad (5)$$

- Completamos as leis do eletromagnetismo ao escrever equações análogas para o campo **B**.



- Outra lei do eletromagnetismo conecta a circulação de **E** ao fluxo de **B**.
- Para qualquer superfície não fechada S cuja fronteira seja a curva C , verificamos que

$$\text{Circulação de } \mathbf{E} \text{ em torno de } C = -\frac{d}{dt}(\text{fluxo de } \mathbf{B} \text{ através de } S). \quad (5)$$

- Completamos as leis do eletromagnetismo ao escrever equações análogas para o campo **B**.
- Especificamente, para uma superfície fechada S qualquer, temos:

$$\text{Fluxo de } \mathbf{B} \text{ através de } S = 0. \quad (6)$$



- Outra lei do eletromagnetismo conecta a circulação de **E** ao fluxo de **B**.
- Para qualquer superfície não fechada S cuja fronteira seja a curva C , verificamos que

$$\text{Circulação de } \mathbf{E} \text{ em torno de } C = -\frac{d}{dt}(\text{fluxo de } \mathbf{B} \text{ através de } S). \quad (5)$$

- Completamos as leis do eletromagnetismo ao escrever equações análogas para o campo **B**.
- Especificamente, para uma superfície fechada S qualquer, temos:

$$\text{Fluxo de } \mathbf{B} \text{ através de } S = 0. \quad (6)$$

- Essa equação determina que não existem “cargas” magnéticas.



- A última equação diz que, para qualquer superfície não fechada S cuja fronteira seja a curva C , verificamos também que

$$c^2(\text{circulação de } \mathbf{B} \text{ em torno de } C) = \frac{d}{dt}(\text{fluxo de } \mathbf{E} \text{ através de } S) \quad (7) \\ + \frac{\text{fluxo da corrente através de } S}{\epsilon_0},$$

em que c é a velocidade da luz no espaço livre.

- Para uma corrente constante, a circulação de \mathbf{B} é a mesma para qualquer curva que envolva o fio.
- Assim, se considerarmos, por exemplo, círculos cada vez maiores, então a componente tangencial do campo \mathbf{B} deve diminuir.
- Em particular, a magnitude de \mathbf{B} diminui linearmente com a distância para o fio.

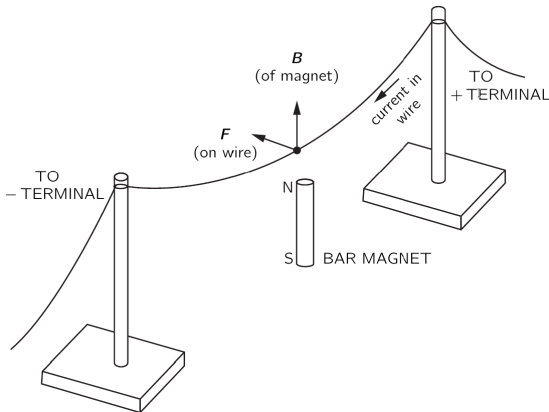


- A principal consequência das leis do eletromagnetismo está na combinação entre as equações (5) e (7).
- Trata-se da propagação de ondas eletromagnéticas.
- Se, por exemplo, ligarmos repentinamente a corrente em um fio, haverá um campo magnético crescente.
- Isso corresponde a uma circulação do campo **E**.
- Por sua vez, esse campo elétrico variante no tempo produz uma circulação de campo **B**.
- Assim, inicia-se um novo ciclo e a energia eletromagnética se propaga no espaço sem a necessidade de cargas ou correntes, exceto na sua origem.

Exemplos de experimentos [1]



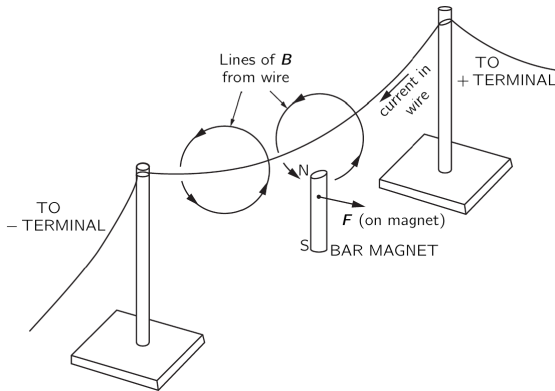
- Podemos verificar empiricamente a força magnética a partir do experimento ilustrado na figura abaixo.
- O ímã fornece um campo **B** no fio.
- Quando passa corrente através do fio, ele se move em razão da força $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.



Exemplos de experimentos [1]



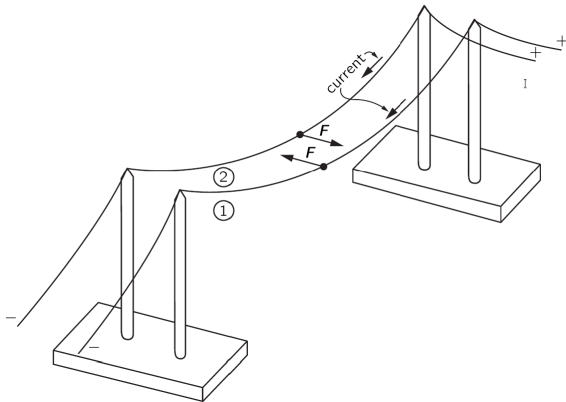
- Pela conservação do momento, deve haver uma força sobre o ímã.
- De fato, devido ao último termo na Eq. (7), a corrente no fio gera circulação do campo \mathbf{B} , o que corresponde a linhas de campo que são laços em torno do fio.
- Esse campo produz uma força no ímã.



Exemplos de experimentos [1]



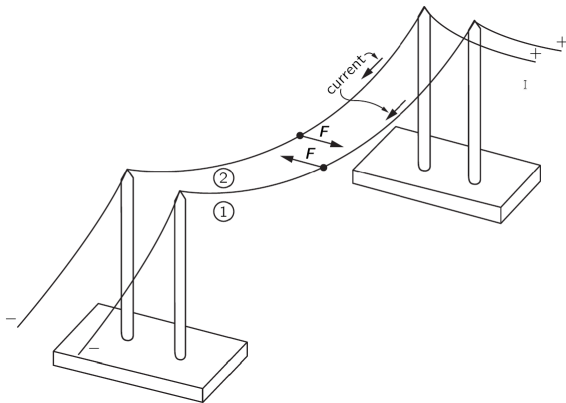
- Quando dois fios conduzem corrente elétrica, cada um deles exerce uma força sobre o outro:



Exemplos de experimentos [1]



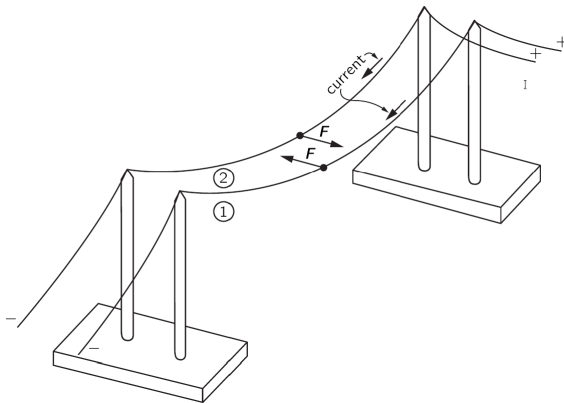
- Quando dois fios conduzem corrente elétrica, cada um deles exerce uma força sobre o outro:
 - 1 Os dois fios se atraem se as correntes estiverem no mesmo sentido;



Exemplos de experimentos [1]



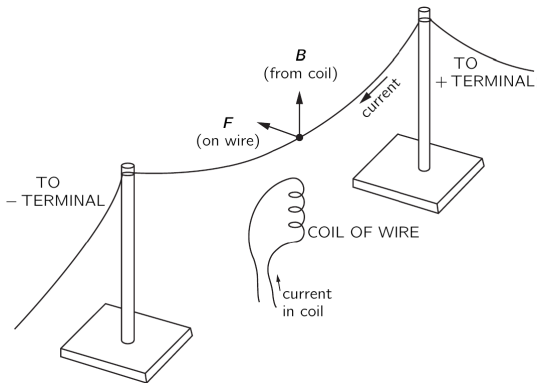
- Quando dois fios conduzem corrente elétrica, cada um deles exerce uma força sobre o outro:
 - 1 Os dois fios se atraem se as correntes estiverem no mesmo sentido;
 - 2 Os dois fios se repelem se as correntes estiverem em sentidos opostos.



Exemplos de experimentos [1]

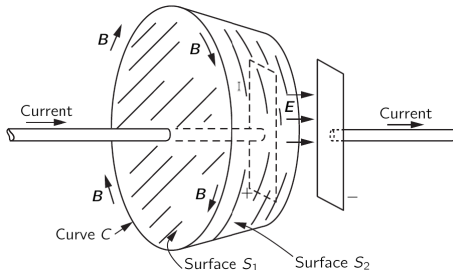


- Como correntes elétricas produzem campos magnéticos, podemos substituir o ímã do primeiro experimento por uma bobina que conduza uma corrente.
- Uma força similar atuará sobre o fio.





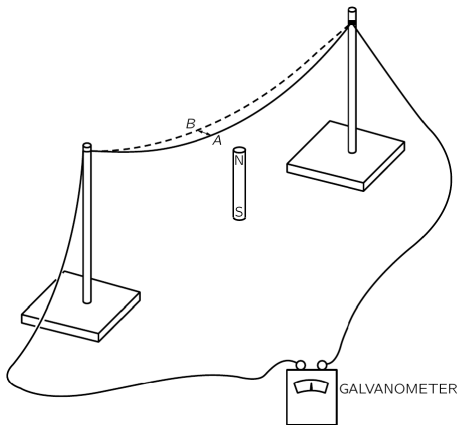
- O primeiro termo do lado direito da Eq. (7) expressa que um campo elétrico variante no tempo produz efeitos magnéticos.
- De fato, sem esse termo, não poderia haver correntes em circuitos que não fossem laços fechados.
- No circuito de carga de um capacitor de placas paralelas, a circulação de \mathbf{B} ao longo de C é dada tanto pela corrente através de S_1 quanto pelo fluxo de \mathbf{E} através de S_2 .



Exemplos de experimentos [1]



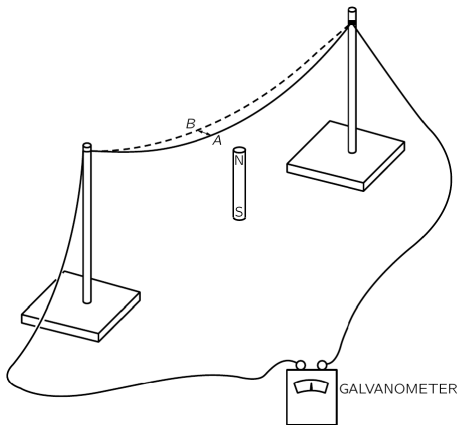
- Suponhamos que o fio seja ligado a um amperímetro.
- Se movermos o fio lateralmente, haverá uma força sobre ele, $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.
- Essa força faz os elétrons se deslocarem ao longo do fio, o que produz uma leitura no amperímetro.



Exemplos de experimentos [1]



- O que ocorre se deixarmos o fio parado e movimentarmos o ímã?
- Como o fio está em repouso, não pode haver uma força magnética.
- Contudo, a Eq. (5) mostra que um fluxo magnético variante no tempo produz um campo elétrico.



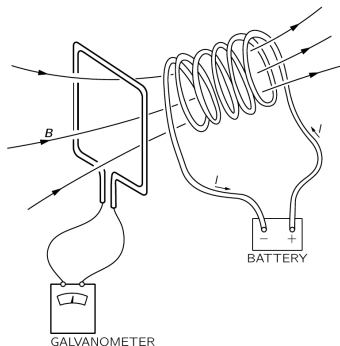


- Em 1831, o cientista britânico Michael Faraday descobriu a indução eletromagnética.

Indução eletromagnética [1]



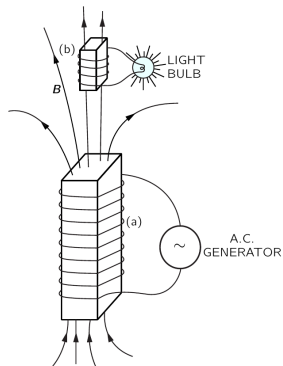
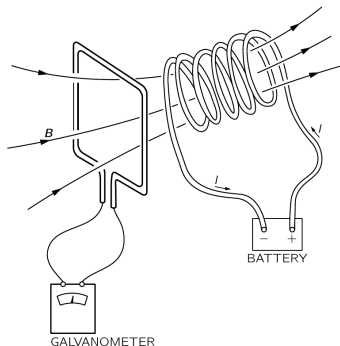
- Em 1831, o cientista britânico Michael Faraday descobriu a indução eletromagnética.
- Se movermos uma bobina, percorrida por uma corrente CC, perto de outra bobina, induziremos uma corrente nesta segunda bobina.



Indução eletromagnética [1]

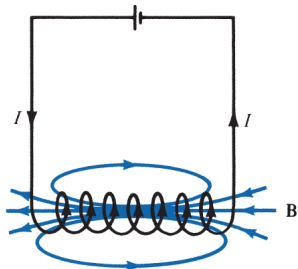


- Em 1831, o cientista britânico Michael Faraday descobriu a indução eletromagnética.
- Se movermos uma bobina, percorrida por uma corrente CC, perto de outra bobina, induziremos uma corrente nesta segunda bobina.
- Se uma bobina for percorrida por uma corrente CA (variante no tempo), também haverá indução de corrente em outra bobina.





- Simplificadamente, um indutor consiste numa bobina enrolada em torno de um núcleo.¹
- A indutância é uma propriedade física que caracteriza a oposição à variação do fluxo magnético.
- Quanto maior a indutância, maior será a força eletromotriz (tensão) gerada para uma dada variação de corrente.
- No SI, medimos a indutância elétrica em henry (símbolo H):
 $1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A}$.



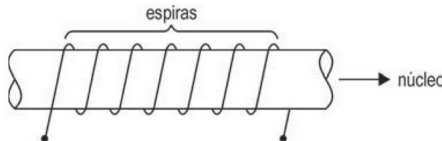
¹Esse núcleo, inclusive, pode ser o ar.



- A indutância depende das seguintes características do indutor:
 - 1 Número de espiras;
 - 2 Geometria do indutor (comprimento, área da seção transversal, formato);
 - 3 Material, através da permeabilidade magnética, $\mu = \mu_r \mu_0$.
- Por exemplo, um indutor em formato de solenoide, com área de seção transversal A e comprimento l , possui indutância dada por²

$$L \approx \frac{\mu \times N^2 \times A}{l}. \quad (8)$$

- No espaço livre, temos $\mu = \mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ H/m}$.



²A expressão é válida se o raio da hélice, r , for muito menor do que o seu comprimento l .



- Os indutores podem ter valores fixos ou variáveis.
- Destacamos que uma indutância de 1 H corresponde a um valor razoavelmente elevado.
- Normalmente, trabalhamos com submúltiplos de 1 H:
 - 1 milihenry: $1 \text{ mH} = 1 \times 10^{-3} \text{ H}$.
 - 2 microhenry: $1 \mu\text{H} = 1 \times 10^{-6} \text{ H}$;
 - 3 nanohenry: $1 \text{ nH} = 1 \times 10^{-9} \text{ H}$;
- Um indutor de $1000 \mu\text{H}$, portanto, equivale a um indutor de 1 mH.



■ Podemos usar diversos símbolos para representar indutores:

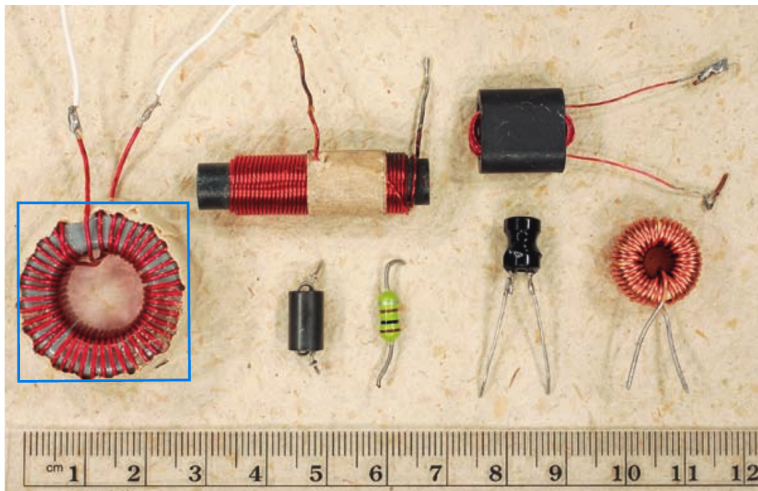
- 1 L_1 é um indutor de núcleo de ar;
- 2 L_2 é um indutor de núcleo de ferro;
- 3 L_3 é um indutor de núcleo de ferrite.



Exemplos de indutores [2]



- Em destaque, vemos um indutor toroidal com núcleo de ferrite no valor de $287 \mu\text{H}$.



Característica corrente vs tensão [2]



- Para determinar a relação entre corrente e tensão num indutor, consideremos intervalos de tempo, Δt , muito curtos.
- Partimos da nossa equação $\lambda = L \times I$ e supomos uma variação de fluxo concatenado, $\Delta \lambda$, no indutor:

$$\Delta \lambda = L \times \Delta I \Rightarrow \frac{\Delta \lambda}{\Delta t} = L \times \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (9)$$

- Agora, lembremos que a tensão elétrica é a taxa de variação do fluxo concatenado na bobina:

$$V_L = \frac{\Delta \lambda}{\Delta t}. \quad (10)$$

- Por fim, substituímos a Eq. (10) na Eq. (9):

$$V_L = L \times \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (11)$$

- Em resumo, temos tensão num indutor sempre que a corrente na bobina varia no tempo (e vice-versa).

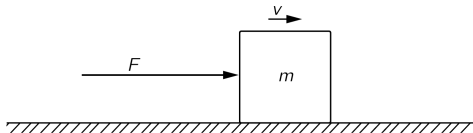
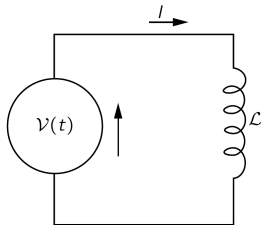


- A partir da Eq. (11), concluímos que um indutor se opõe a variações rápidas de corrente.
- De fato, se Δt for pequena e ΔI for alta, então a razão $\Delta I / \Delta t$ será muito elevada.
- Assim, precisaríamos de uma tensão muito grande para variar a corrente num indutor repentinamente.
- Podemos utilizar indutores para produzir arcos, o que ocorre, por exemplo, na vela de ignição de um carro.

Analogia mecânica [1]



- Podemos fazer uma analogia entre um indutor de um circuito elétrico e uma massa de um sistema mecânico.
- Nesse caso, temos a seguinte correspondência:
 - 1 Força \leftrightarrow tensão elétrica;
 - 2 Velocidade \leftrightarrow corrente elétrica;
 - 3 Massa \leftrightarrow indutância;
- Quanto mais pesada for uma massa, maior será a força que teremos que aplicar para que a velocidade dela varie.
- Similarmente, quanto maior for a indutância, maior será a tensão que teremos que aplicar para que a corrente nele varie.



Síntese



- O modelo mais simples de indutor é obtido a partir de um fio condutor enrolado em torno de um núcleo.
- Um indutor é um dispositivo que representa a oposição a variações de fluxo magnético.
- Um indutor armazena energia por meio de um campo magnético.
- Caracterizamos um indutor, na prática, a partir de sua indutância, tolerância e corrente máxima.
- Indutores se opõem a variações da corrente através de seus terminais.
- O comportamento de energização e desenergização de um indutor é descrito por funções exponenciais.
- A constante de tempo de um circuito RL determina a velocidade de energização ou desenergização de um indutores.
- Quando associamos indutores em série, somamos todas as indutâncias.
- Quando associamos indutores em paralelo, reduzimos a indutância total.

Referências



- [1] FEYNMAN, Richard P.; LEIGHTON, Robert P.; SANDS, Matthew. *The Feynman Lectures on Physics, Volume II: Mainly Electromagnetism and Matter*. 12.ed. Nova Iorque: Basic Books, 2010. ISBN: 978-0-465-07998-8.
- [2] HAYT JUNIOR, W. H.; KEMMERLY, J. E.; DURBIN, S. M. *Engineering circuit analysis*. 8.ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2012. ISBN: 978-0-07-352957-8.
- [3] MARINO, M. A. M.; CAPUANO, F. G. *Laboratório de eletricidade e eletrônica*. 24. ed. São Paulo: Érica, 2007. ISBN: 978-85-7194-016-1.