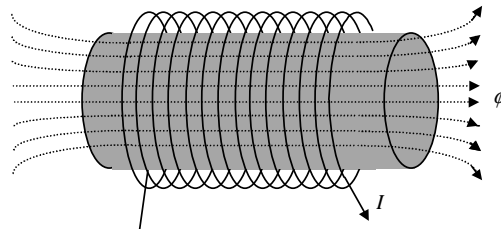


O INDUTOR

Objetivo: Descrever a construção, a finalidade e o funcionamento e aplicações do indutor na carga e descarga e conceituar indutância. Associar indutores e calcular indutância equivalente.

Funcionamento do indutor em corrente contínua

Genericamente, chamamos de indutor ou bobina (ou solenoide) ao elemento cuja constituição física é um fio condutor elétrico (isolado) enrolado em forma helicoidal sobre um núcleo, o qual pode ser de ar ou algum material ferromagnético (que facilita a passagem do fluxo magnético).



O indutor é um elemento passivo que tem a característica de armazenar energia na forma de campo magnético quando percorrido por uma corrente.

Símbolo

O símbolo do indutor lembra a sua constituição básica, qual seja a de um fio condutor enrolado. Associada ao símbolo normalmente aparece a propriedade do indutor chamada de indutância, representada pela letra “L” .

L



Exemplo:

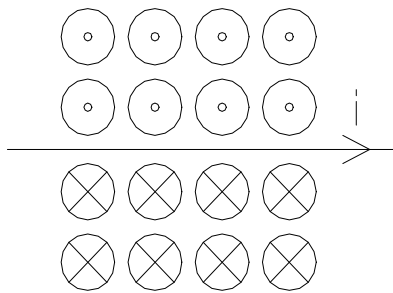
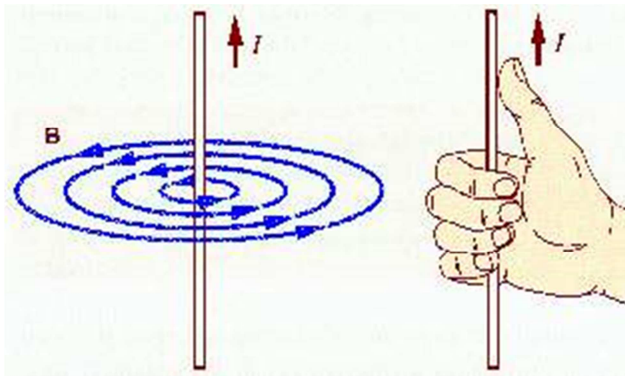
$L = 10 \text{ mH}$



Funcionamento:

As experiências realizadas por Oersted mostraram que um condutor percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético ao seu redor.

Assim, ao redor de um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica existe um campo magnético cujas linhas de força são circunferências concêntricas ao fio.

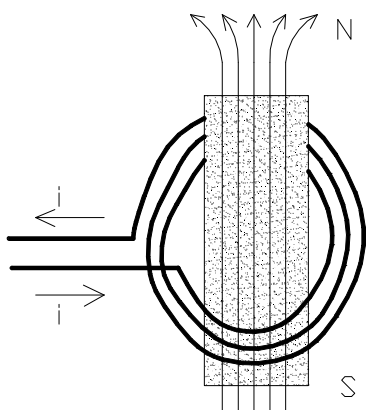


As linhas de indução entram (⊗) e saem (⊙) do papel, no desenho em corte ao lado.

O sentido das linhas de indução - linhas imaginárias utilizadas para representar campo magnético- pode ser determinado pela Regra da Mão Direita, aplicada do seguinte modo:

- **Dedo polegar no sentido da corrente;**
- **Os demais dedos envolvem o condutor e apontam o sentido das linhas de indução.**

Se o condutor for disposto em forma circular, com várias voltas, ocorrerá a concentração das linhas de indução em seu interior, e se receber um núcleo ferromagnético (imantável) a concentração será maior ainda, ocorrendo assim um campo magnético de forte intensidade. Esse conjunto apresenta um funcionamento semelhante ao de um ímã em barra, com polo norte e sul magnéticos bem definidos.



O sentido do campo magnético é dado pela regra da mão direita: Polegar: sentido da corrente elétrica. Dedos: direção e sentido do campo magnético.

A intensidade do vetor indução magnética no centro da espira depende da intensidade da corrente elétrica, do raio da espira, da quantidade espiras e do meio onde ela se encontra.

Campo magnético

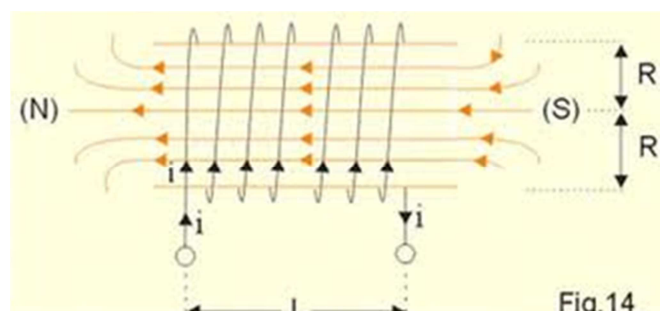
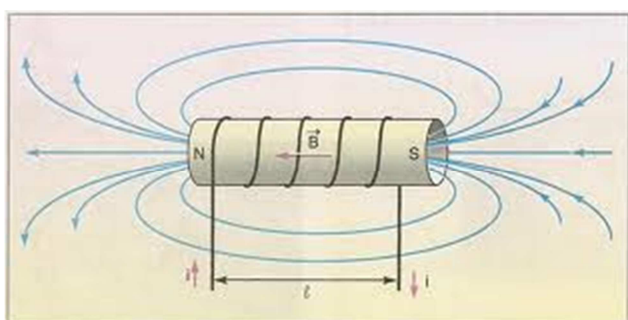


Fig.14

Finalidade, emprego e aplicações:

A finalidade básica de um indutor é a de produzir campo magnético, quando percorrido por uma corrente elétrica. O indutor armazena energia na forma de campo magnético.

Com isso ele pode ser empregado com objetivos de produção de força, de indução e de auto-indução eletromagnéticas, tendo assim diversas aplicações práticas, tais como eletroímãs, relés, motores, transformadores etc.

Indutância (ou Auto- Indutância) de um indutor: L

A Indutância de um indutor é a medida da sua capacidade de auto-induzir, ou seja, de produzir uma tensão entre seus terminais quando a sua corrente varia.

Seu valor depende do n^2 de espiras, da forma em que estão dispostas (anel, espiral,...), de suas dimensões e do material do núcleo. Para um solenóide ou bobina longa (comprimento maior que três vezes o raio), a indutância seria igual a $L = \mu N^2 \cdot S / l$.

Seu símbolo é o “L”.

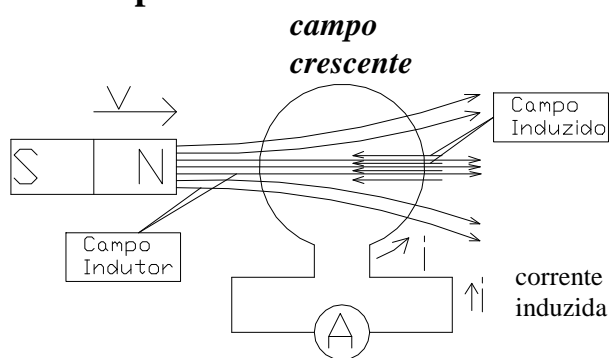
Sua unidade (no SI) é o henry (H).

Indução eletromagnética:

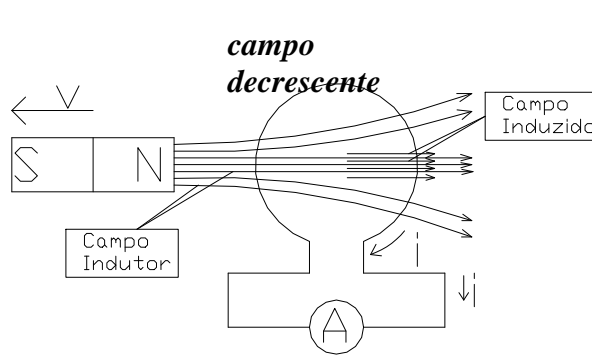
É o fenômeno no qual tensões (e correntes) são produzidas pela variação do campo magnético (ou fluxo magnético), no tempo, através da seção de um indutor.

Exemplo de indução de uma corrente:

A – Imã aproximando-se do Indutor

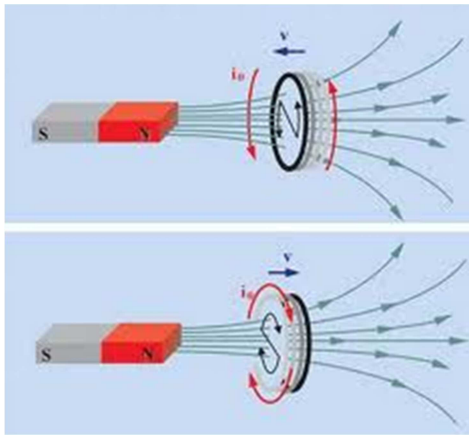


B – Imã afastando-se do Indutor

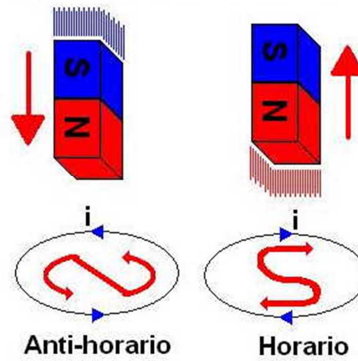


Observe:

- Nos desenhos, o lado direito da espira estaria mais próximo do observador;
- A corrente induzida tem sentidos diferentes, na aproximação e no afastamento do ímã.
- Para a sua melhor compreensão, considere que campos magnéticos variáveis produzem campos elétricos, que por sua vez produzem aceleração de cargas, ou seja, a corrente elétrica.



Sentido da Corrente Induzida

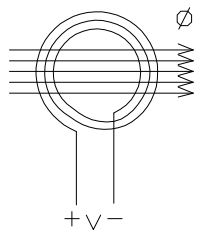


A lei de Faraday

É a lei que rege o fenômeno da indução eletromagnética, ou seja, o da produção de tensão induzida (ou auto-induzida).

Ela sustenta que:

“A tensão induzida é a razão entre a variação do fluxo magnético e o tempo considerado, com o sinal trocado”.



$$v = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

$v \rightarrow$ tensão induzida (média), em volts (V)
 $\Delta \phi \rightarrow$ variação do fluxo (concatenado) em weber-espira (Wb-e)

$\Delta t \rightarrow$ intervalo de tempo em segundos (s)

Note que:

1- Como fluxo magnético (ϕ) mede a quantidade de linhas de indução que atravessa cada espira, para um elemento com “N” espiras considera-se o fluxo magnético concatenado (ϕ_c), que corresponde ao fluxo magnético de uma espira multiplicado pelo número de espiras atravessadas pelo mesmo campo, no indutor considerado ($\phi_c = N\phi$). Este é o fluxo adotado na lei de Faraday, ainda que esteja sem o índice “c”. Por isso a unidade Wb-e (e não Wb) é a mais correta.

2- O sinal negativo na expressão da lei de Faraday indica que a tensão induzida se opõe a variação (crescimento ou diminuição) de sua causa. Esta oposição se manifesta na polaridade da tensão induzida ou auto-induzida e no sentido da corrente induzida (lei de Lenz).

A lei de Lenz

É a lei que rege o sentido de uma corrente induzida, que é resultado de uma tensão induzida.

Segundo Lenz: “O sentido da corrente é aquele que produz um fluxo induzido em oposição à variação do fluxo indutor”.

Ou seja:

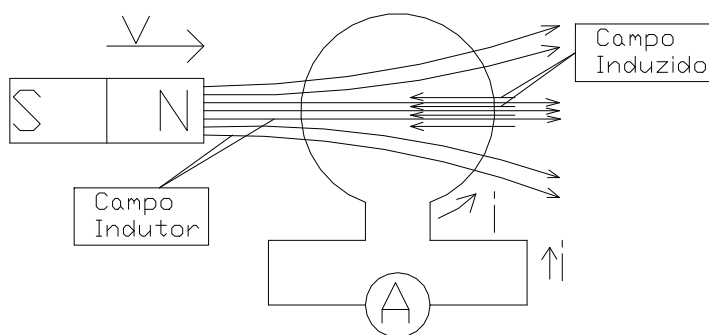
- Se o fluxo indutor é crescente ($\Delta\phi / \Delta t > 0$) → A corrente produz um fluxo induzido em oposição ao fluxo indutor;
- Se o fluxo indutor é decrescente ($\Delta\phi / \Delta t < 0$) → A corrente produz um fluxo induzido a favor do fluxo indutor.

Assim, para se encontrar o sentido da corrente, aplica-se a **Regra da Mão Direita**, da seguinte maneira:

“Ao se colocar o dedo polegar ao longo do fio apontando o sentido da corrente, os demais dedos indicarão o sentido das linhas de indução do campo induzido, para o caso considerado.

Ou melhor, ao se colocar os dedos no sentido do campo induzido, o polegar indicará o sentido da corrente”.

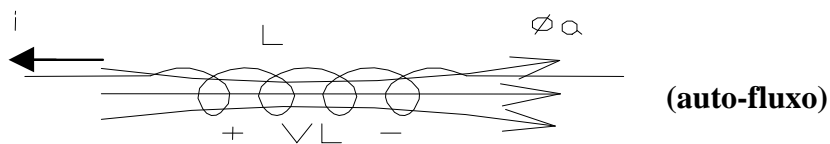
Veja o sentido da corrente no exemplo que segue:



O sentido da corrente está determinando um campo induzido oposto ao do campo indutor crescente com a aproximação do imã .

A auto-indução:

É o fenômeno da produção de tensão nos terminais de um indutor percorrido por uma corrente, devido à variação de seu próprio fluxo, decorrente da variação corrente elétrica.



$$\left. \begin{aligned} \phi &= \phi_a \\ v_L &= -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \phi_a = L \cdot i \Rightarrow \boxed{v_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}}$$

v_L - tensão auto-induzida média (V)

Uma característica do indutor é a de se auto induzir. Isto é, quando a corrente que passa no indutor está variando, o fluxo magnético, provocado pela corrente, também varia e induz uma tensão nos terminais do indutor. Esta tensão, segundo a lei de Lenz, se oporá a causa que a originou, portanto se oporá a variação da corrente.

A capacidade que um condutor possui de induzir tensão em si mesmo é medida pela sua indutância (L) cuja unidade de medida é o Henry (H). A qual é definida por

$$L = \frac{\Delta\phi}{\Delta I} \quad (1) \text{ onde:} \quad L \rightarrow \text{indutância (H - Henry);}$$
$$\Delta\Phi \rightarrow \text{variação do fluxo magnético}$$
$$\Delta I \rightarrow \text{variação da corrente}$$

Para chegarmos a relação entre a tensão induzida “e” e a variação de corrente no indutor é necessário relembrarmos a lei de Faraday, a qual relaciona a tensão induzida “e” com o número de espiras do indutor (N) e com a variação do seu fluxo magnético na espira ($\Delta\phi_1$).

$$e = -\frac{N\Delta\phi_1}{\Delta t} \quad (2)$$

Rescrevendo a equação acima levando em consideração que o valor de $\Delta\phi$ corresponde ao fluxo total produzido pelo indutor (isto é, $\Delta\phi=N\Delta\phi_1$) temos:

$$e = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (3)$$

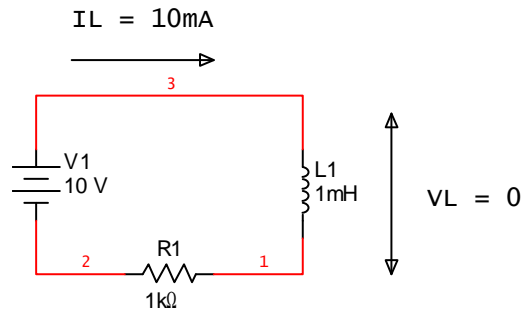
Isolando $\Delta\phi$ na equação (1) e substituindo este valor na equação (3), temos:

$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (4)$$

Uma vez que a tensão induzida “e” é contrária a variação da corrente, para ocorrer aumento de corrente num indutor é necessário que uma fonte aplique uma tensão V_L , com mesma intensidade e polaridade contrária a da tensão induzida “e”. Portanto, a queda de tensão num indutor será dada por:

$$V_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (5)$$

Em corrente contínua quanto maior a corrente que passa pelo indutor, maior será a sua carga armazenada sob o campo magnético. Em corrente contínua um indutor só terá tensão enquanto estiver sendo carregado ou descarregado. Quando estiver em regime permanente, como não há variação na corrente do indutor ($\Delta I = 0$, $I = \text{constante}$), podemos então afirmar que a tensão é nula ($V_L = 0$) e portanto, um indutor em corrente contínua e regime permanente, se comporta como um curto circuito ($V = 0V$).



Note que:

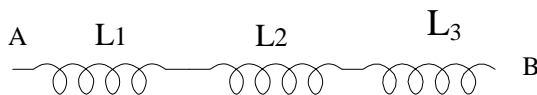
- Segundo a lei de Faraday para a auto-indução ($v_L = -L\Delta i/\Delta t$), sempre que houver variação de corrente num indutor, haverá nele uma tensão auto-induzida. Se a corrente for constante ($\Delta i/\Delta t = 0$), a sua tensão será zero e o indutor se comportará como um curto-circuito. É o que ocorre num circuito em DC, em regime permanente;
- A tensão auto-induzida, na forma $v_L = -L\Delta i/\Delta t$, **com sinal negativo**, é convencionada num circuito elétrico como sendo uma “elevação de tensão”, com a corrente entrando pelo sinal negativo;
- A tensão auto-induzida também pode ser convencionada como uma “queda de tensão”, com a corrente acessando o indutor pelo lado de “polaridade positiva”, e nesse caso sua expressão matemática dispensaria o sinal negativo ($v_L = L\Delta i/\Delta t$).

Associações de indutores e Indutância Equivalente

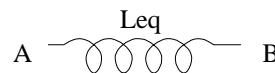
Assim como ocorre com resistores e capacitores, os indutores podem ser associados em série, em paralelo e na forma mista. E cada associação de indutores terá um efeito resultante a ser representado por um único indutor e sua indutância equivalente, que armazenaria a mesma energia que a associação correspondente.

Ou seja:

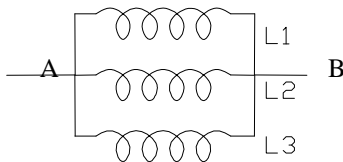
associação em série



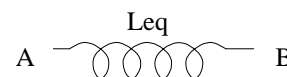
indutância equivalente



associação em paralelo



indutância equivalente



Cálculo de indutância equivalente: (similar ao de resistência equivalente)

Associação série:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$$

Associação em paralelo:

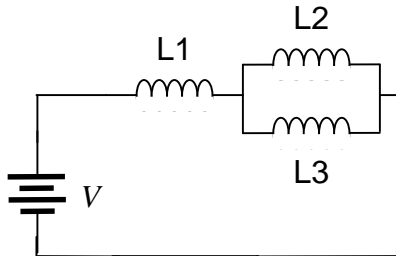
$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

Para 2 indutores em paralelo:
$$L_{eq} = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

Exemplo:

Determinar a indutância equivalente entre os extremos da associação mista abaixo:

Dados: $L_1 = 20 \text{ H}$; $L_2 = 60 \text{ H}$; $L_3 = 30 \text{ H}$



Resposta
$L_{eq} = 40 \text{ H}$

A energia no indutor

Ao ser percorrido por uma corrente elétrica (i) o indutor de indutância "L" apresentará uma energia "E" armazenada em seu campo magnético, calculada por:

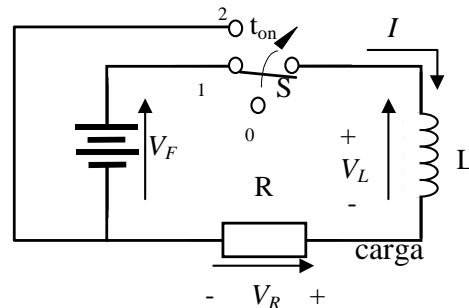
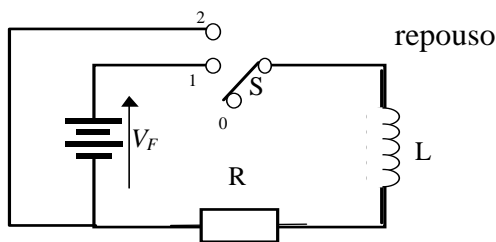
$$E = \frac{1}{2} Li^2 \text{ (J)}$$

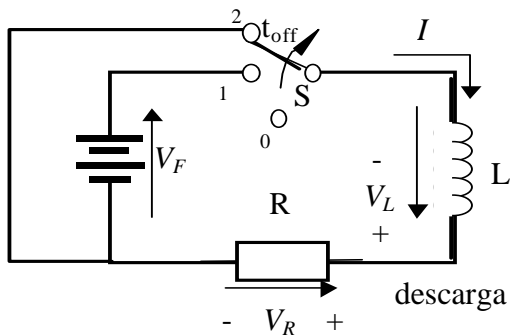
Exemplo:

Se $L = 10 \text{ mH}$ e $i = 1,5 \text{ A}$, então: $E = 11,25 \text{ mJ}$

O comportamento do indutor em DC: Regimes Permanente e Transitório

No circuito abaixo, considere que a chave "S" sofra duas operações sucessivas, sendo levada para a posição "1", no instante t_{on} (carga) e no instante t_{off} , levada para a posição "2" (descarga).

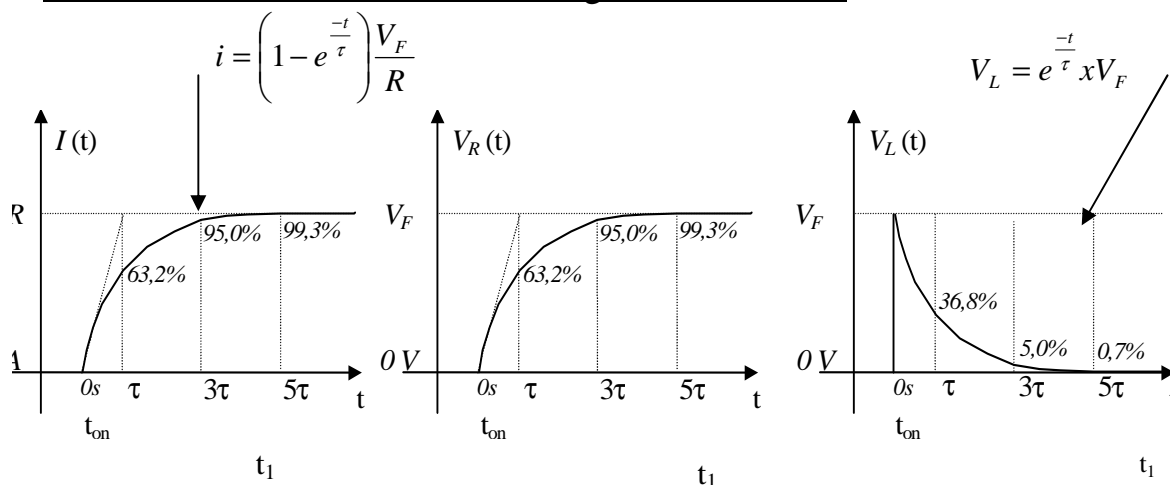




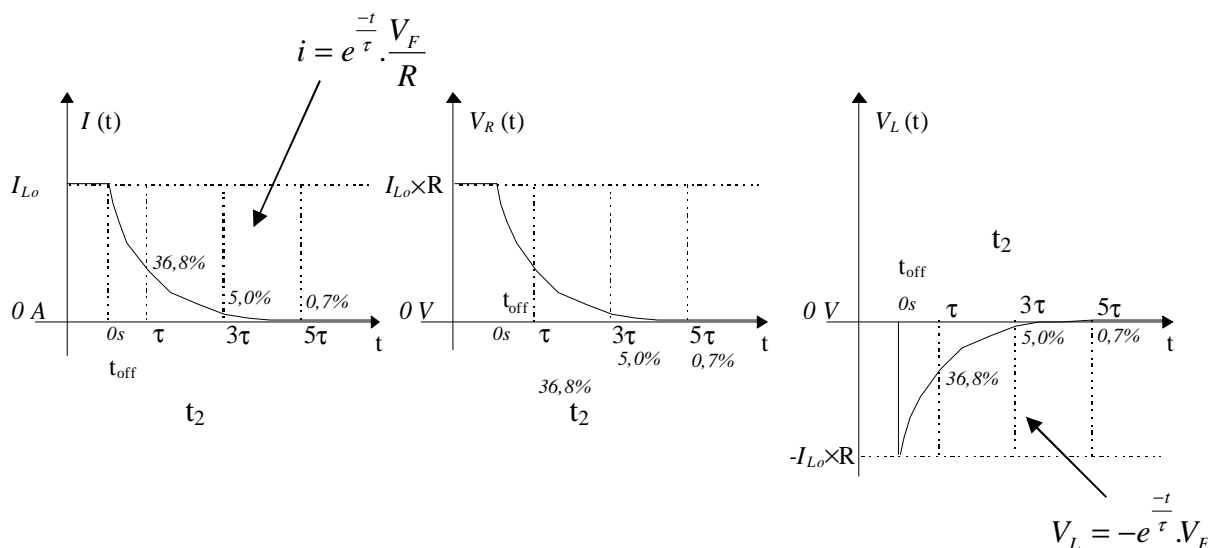
As polaridades das tensões auto-induzidas " v_L ", indicadas aqui nos circuitos, correspondem as situações de momento, obtidas a partir de uma convenção geral de queda.

Os gráficos a seguir mostram o comportamento da corrente e da tensão no indutor (e no resistor), diante das operações de liga e desliga consideradas, utilizando-se "positivo" para "queda de tensão" e "negativo" para "elevação de tensão":

Curvas de tensões e correntes da carga do circuito RL



Curvas de tensões e correntes da descarga do circuito RL



Note que:

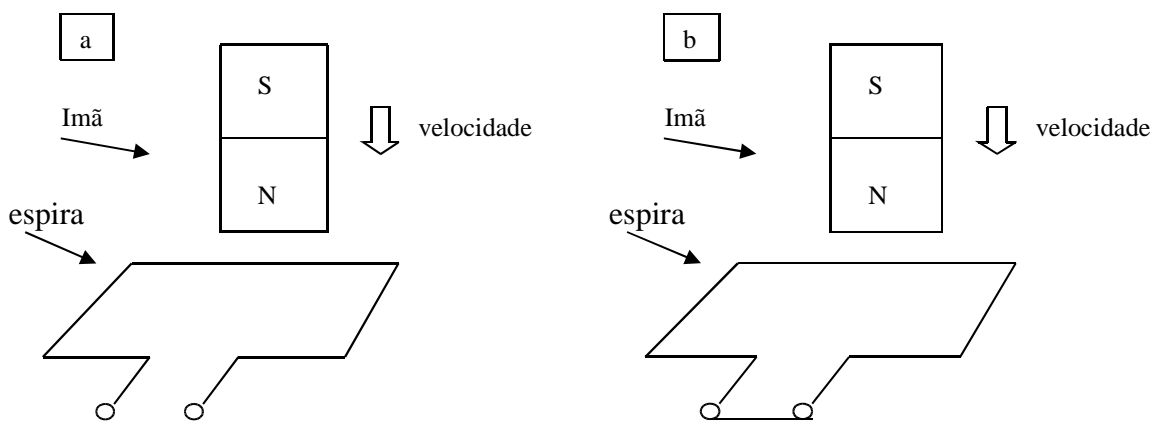
1. A corrente no indutor não varia bruscamente. Daí que a corrente se atrasa da tensão;
2. Nas operações liga-desliga, surgem picos de tensão no indutor ($v_L = L\Delta i/\Delta t$);
3. Em regime permanente, o indutor funciona como um curto-circuito para a corrente ($v_L = 0$);

4. O regime permanente ocorre após decorrido 5 constantes de tempo (“5 τ ”), onde $\tau = L/R$.

5. Em qualquer situação, a energia no indutor é dada por $E = \frac{1}{2} Li^2$ (J).

Exercícios:

1. Qual a construção e finalidade básica do indutor? Ilustre a situação em que um indutor seja percorrido por corrente elétrica e tenha seu campo magnético indicado com auxílio de linhas de força, orientadas a partir da aplicação da Regra da Mão Direita.
2. Enuncie a lei de Faraday, mostre sua expressão matemática geral e faça uma ilustração de uma situação em que esta lei seja aplicada, isto é, ilustre o fenômeno da indução eletromagnética.
3. Faça uma ilustração do fenômeno da indução eletromagnética, onde o sentido da corrente esteja indicado pela aplicação correta da lei de Lenz.
4. Enuncie e aplique as Leis de Faraday e de Lenz, indicando a tensão (a) e a corrente (b) produzidas nos casos de indução abaixo ilustrados:



Calcule a indutância equivalente nos circuitos abaixo.

