

FUCO5A - Análise De Circuitos Elétricos 1

Aula 18

Prof.: Renan Silva Maciel

(slides adaptados de AC64-2018/1 – Prof. Maurício Zardo)

- **Tópicos:**

- Características de Indutores
- Armazenamento e Decaimento
- Transitórios

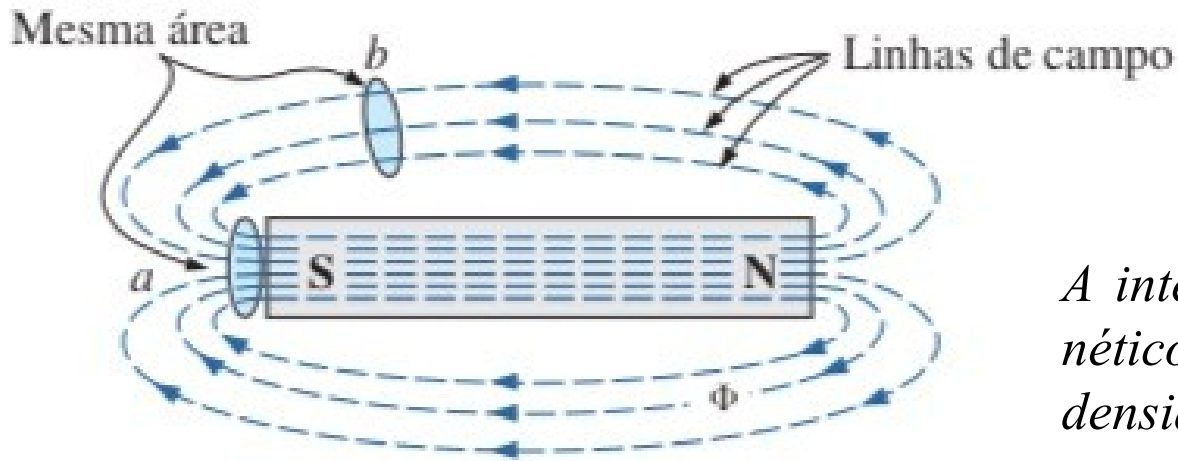
- **Indutores:**

- o indutor é o dual do capacitor: o que vale para a tensão de um é aplicável à corrente do outro.

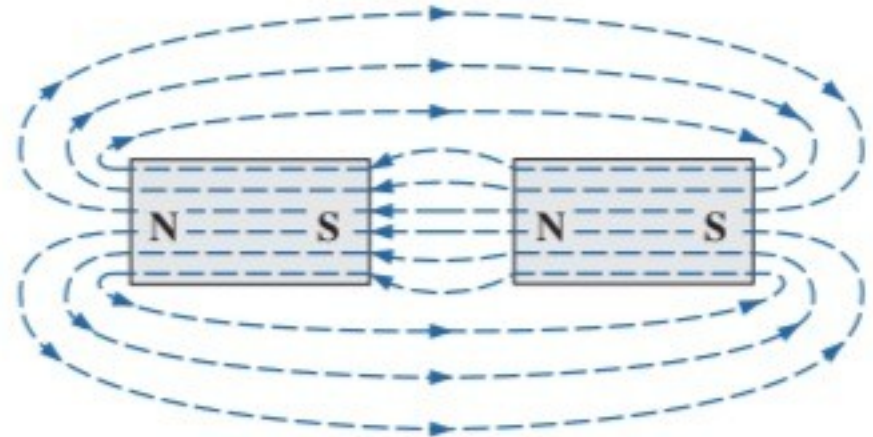
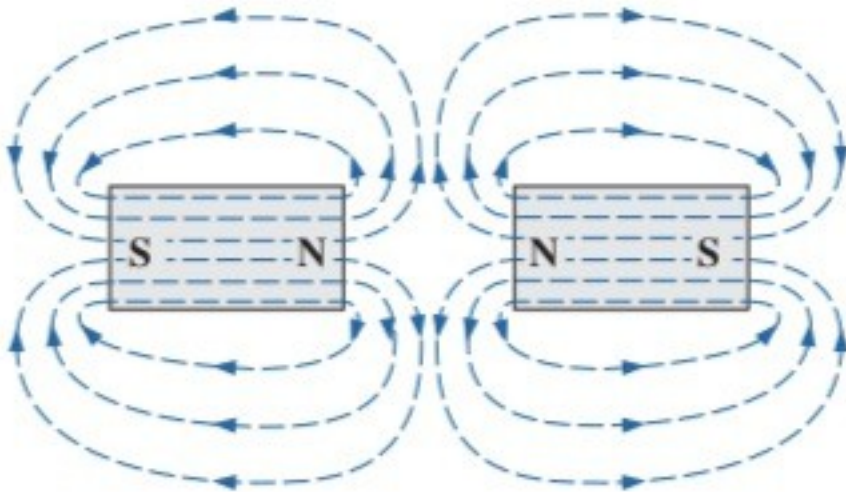


- o indutor exibe algumas de suas características em CC apenas quando ocorre uma mudança na tensão ou na corrente do circuito.

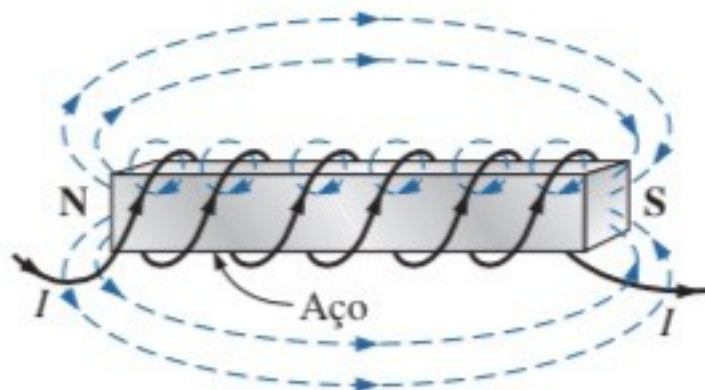
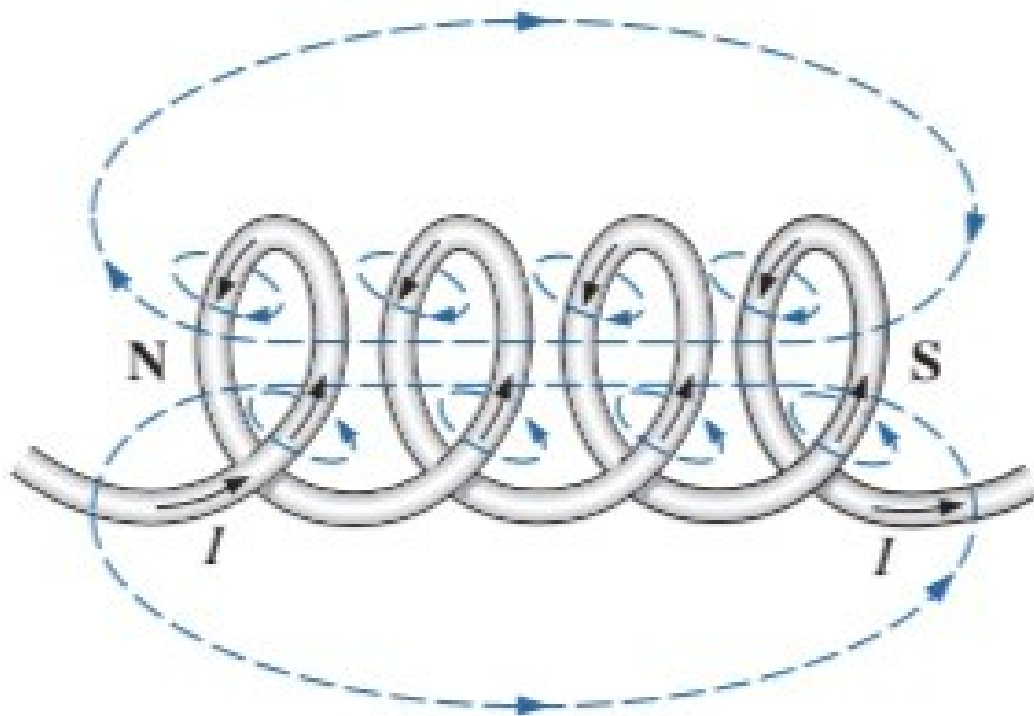
- CAMPO MAGNÉTICO



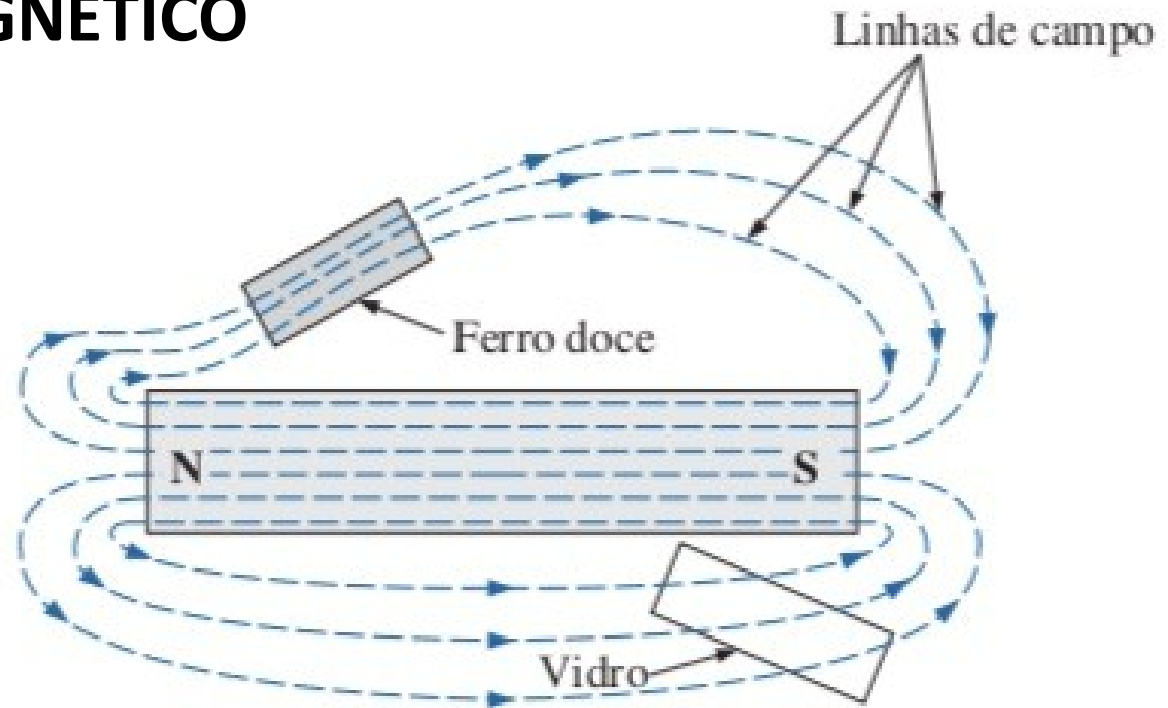
A intensidade do campo magnético é determinada pela densidade das linhas de campo



Regra da mão direita



CAMPO MAGNÉTICO



Efeito de uma amostra de material ferromagnético sobre as linhas de campo de um ímã permanente.

- **Materiais magnéticos:**

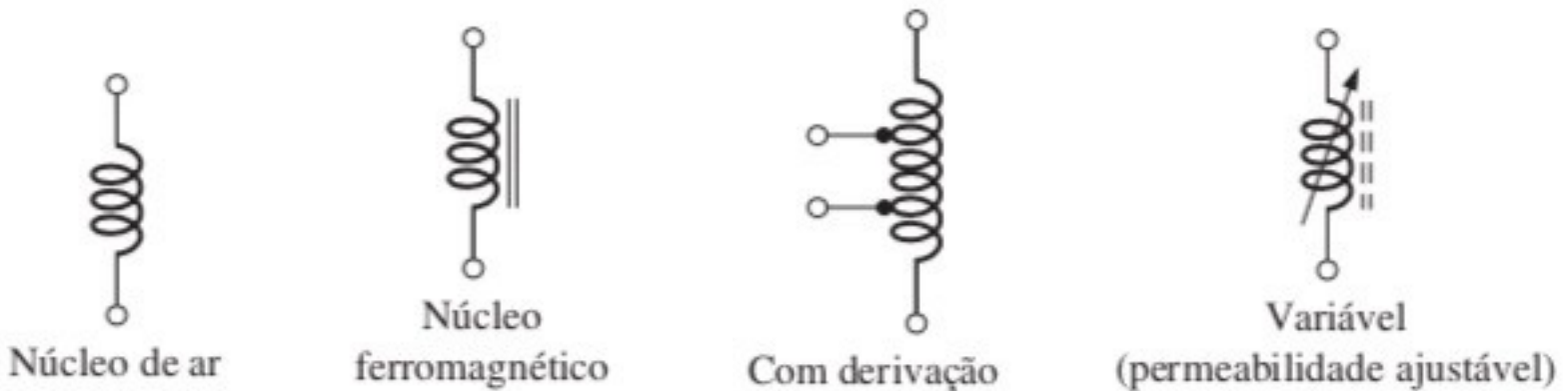
- Não magnéticos: como madeira, vidro e ar: é a mesma do espaço livre.
- Diamagnéticos: permeabilidades ligeiramente menores que o espaço livre. (Cu e Ag)
- Paramagnéticos: permeabilidades ligeiramente maiores que o espaço livre. (Al)
- Ferromagnéticos: como ferro, níquel, aço, cobalto e ligas desses metais têm permeabilidades centenas e até milhares de vezes maiores que as do espaço livre $\mu_r \geq 100$.

Permeabilidade relativa

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

- **INDUTÂNCIA**

- **Indutor:** componente no qual a passagem de corrente através de uma bobina, com ou sem um núcleo, estabelece um campo magnético através da unidade e cercado essa unidade.



- A indutância é medida em henries (H)

1 henry é o nível de indutância que estabelecerá uma tensão de 1 volt através da bobina devido a uma variação na corrente de 1 A/s através da bobina.

Indutância:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

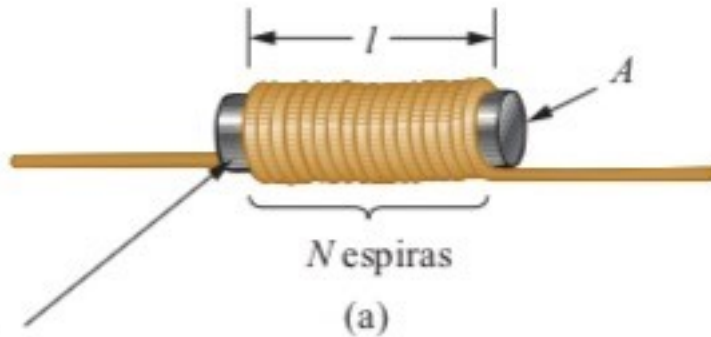
μ = permeabilidade (Wb/A · m)

N = número de espiras

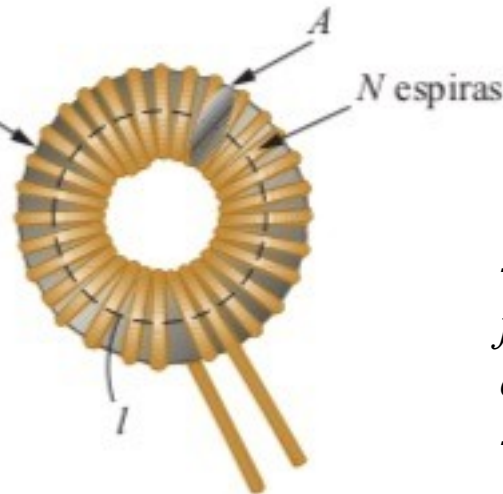
A = m²

l = m

L = henries (H)



Ferro ou núcleo
de ferrita (μ_r)



$$L = \mu_r \left(\frac{\mu_o N^2 A}{l} \right)$$

$$L = \mu_r L_o$$

- A indutância de um indutor com um núcleo ferromagnético é μ_r vezes a indutância obtida com um núcleo de ar;
- Relação: corrente admissível e N (tamanho do indutor);
- Medição.

Tipo: Indutores de núcleo de ar (1-32 espiras)

Valores típicos: 2,5 nH a 1 μ H

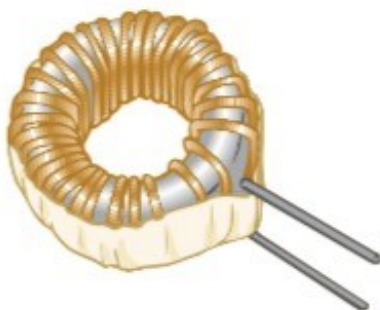
Aplicações: Aplicações de alta frequência



Tipo: Toroidal

Valores típicos: 10 μ H a 30 mH

Aplicações: Usado em linhas de transmissão para filtrar transitórios e reduzir interferências eletromagnéticas. Encontrado em muitos eletrodomésticos.



Tipo: Cilíndrico

Valores típicos: 3 μ H a 1 mH

Aplicações: Usado em linhas de transmissão de alta corrente.



Tipo: Linha de retardo

Valores típicos: 10 μ H a 50 μ H

Aplicações: Usado em receptores de televisão em cores para corrigir diferenças de tempo entre os sinais de cor e o sinal de preto e branco.



Tipo: Cilíndrico de modo comum

Valores típicos: 0,6 mH a 50 mH

Aplicações: Usado em filtros de linha CA, interruptores de suprimento de energia, carregadores de bateria e outros equipamentos eletrônicos.



Tipo: RF Chokes

Valores típicos: 10 μ H a 470 mH

Aplicações: Usado em receptores de rádio e televisão e em circuitos de comunicação. Encontrados em circuitos de AM, FM e UHF.



Tipo: Encapsulado

Valores típicos: 0,1 μ H a 100 mH

Aplicações: Usado em uma grande variedade de circuitos como osciladores, filtros, filtros passa-baixa e outros.



Tipo: Para montagem em superfície

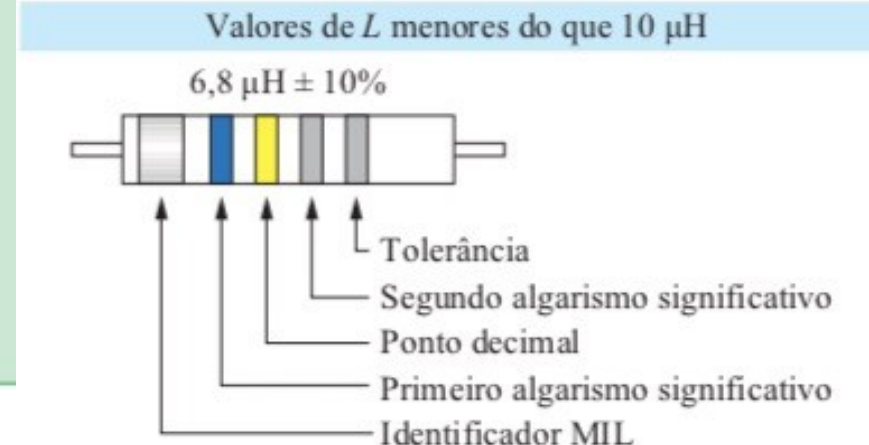
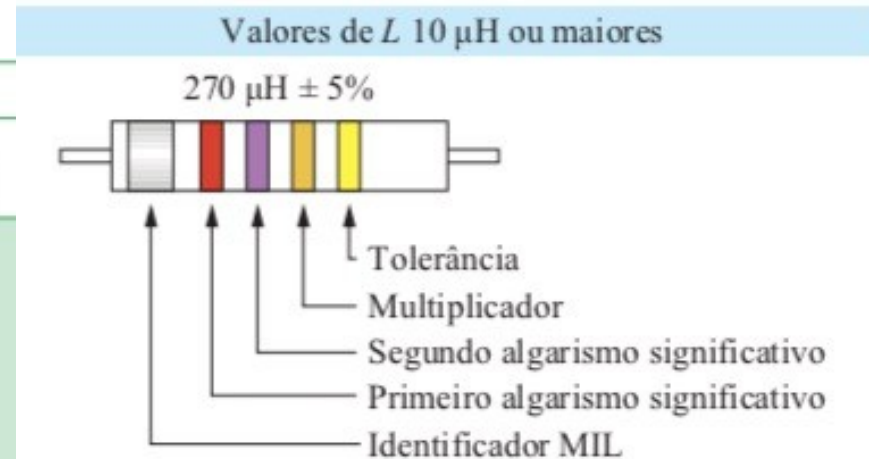
Valores típicos: 0,01 μ H a 250 μ H

Aplicações: Encontrado em muitos circuitos eletrônicos que exigem componentes em miniatura para que sejam montados em placas de circuito impresso com multicamadas.



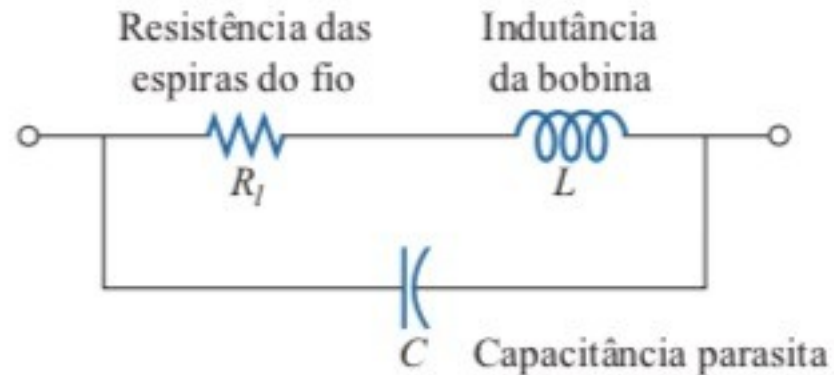
• Rotulação de indutores:

Tabela de código de cores			
Cor ¹	Algarismo significativo	Multiplicador ²	Tolerância da indutância (%)
Preto	0	1	
Marrom	1	10	
Vermelho	2	100	
Laranja	3	1000	
Amarelo	4		
Verde	5		
Azul	6		
Violeta	7		
Cinza	8		
Branco	9		
Nenhuma			±20
Prata			±10
Ouro	Ponto decimal		±5



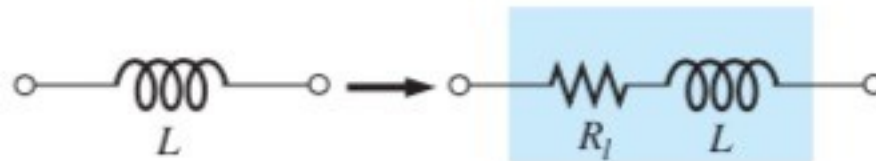
Modelos equivalentes

Modelo equivalente completo

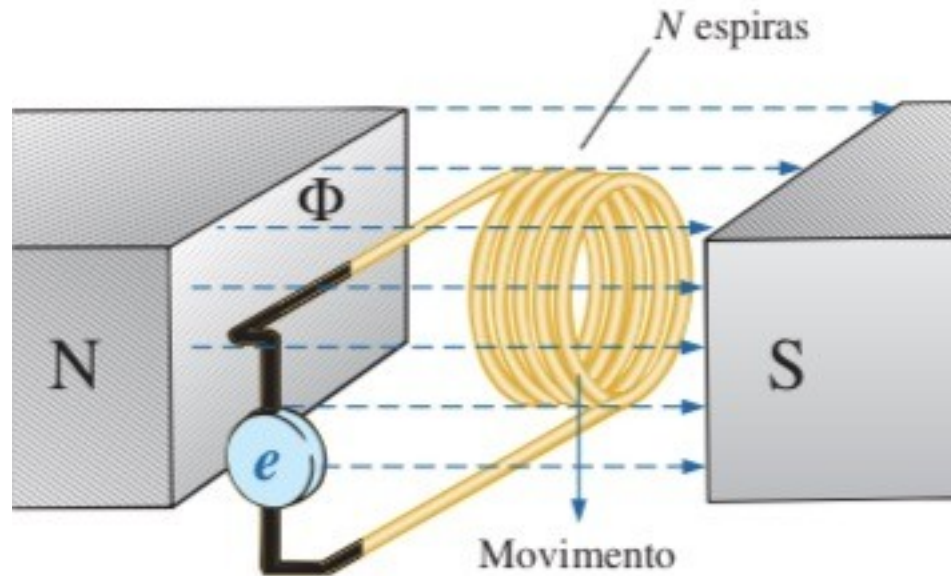


Capacitância parasita devido à capacitância entre as espiras que conduzem a corrente da bobina (superfícies condutoras separadas por um isolante).

Modelo equivalente prático

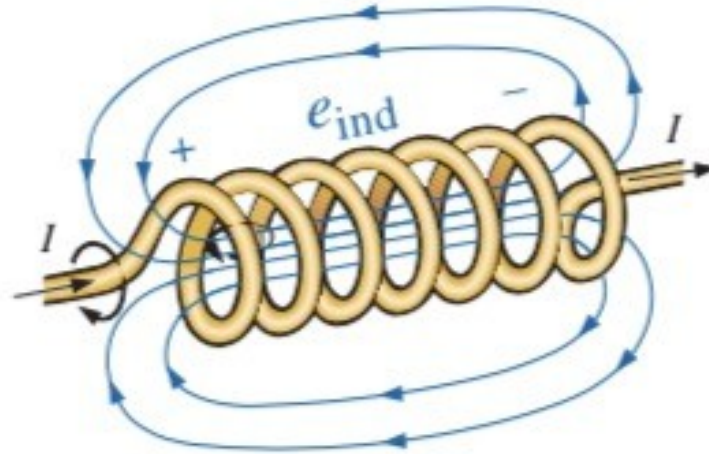


- TENSÃO INDUZIDA V_L
 - Lei de Faraday



$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{volts, V})$$

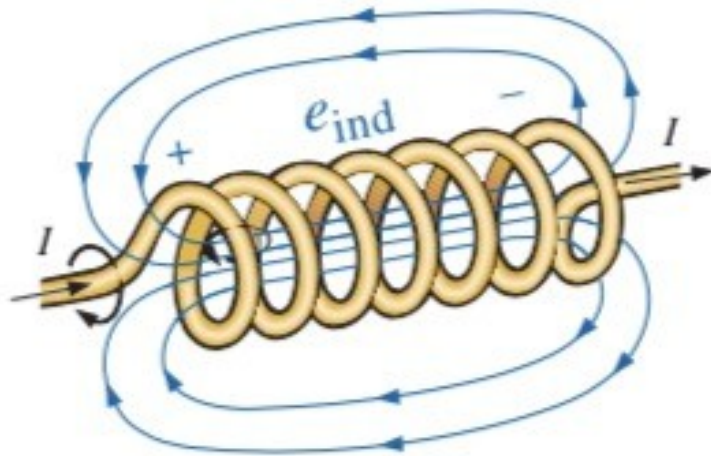
- **TENSÃO INDUZIDA V_L :**



- A polaridade da tensão induzida através da bobina é tal que ela se opõe ao nível crescente de corrente na bobina.
- A corrente que varia na bobina induz uma tensão através da bobina, que se opõe à tensão aplicada, estabelecendo o aumento na corrente em primeiro lugar.
- Quanto mais rápida a variação na corrente através da bobina, maior a tensão induzida que se opõe para reprimir a tentativa da corrente de crescer em magnitude.

- **Indutância:**

- A indutância de uma bobina é também uma medida da variação do fluxo na bobina em razão de uma variação na corrente através da mesma.



$$L = N \frac{d\Phi}{di_L} \quad (\text{henries, H})$$

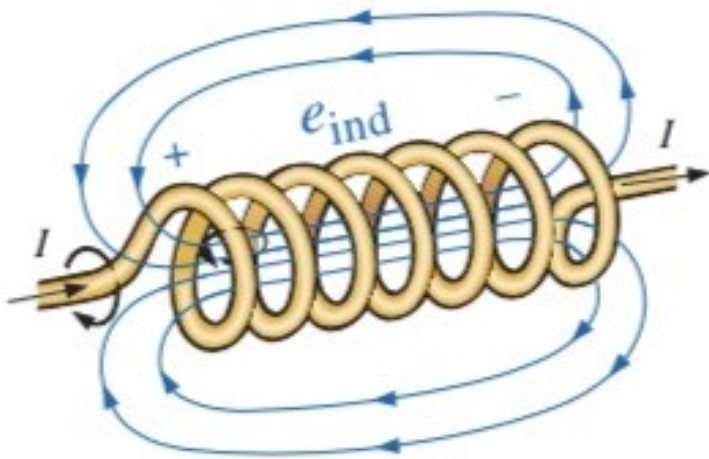
$$e = N \frac{d\Phi}{dt} = \left(N \frac{d\Phi}{di_L} \right) \left(\frac{di_L}{dt} \right)$$

$$e_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{volts, V})$$

Quando os efeitos induzidos são usados na geração de tensões como aquelas de geradores CC ou CA, o símbolo e é aplicado à tensão induzida.

- **TENSÃO INDUZIDA V_L :**

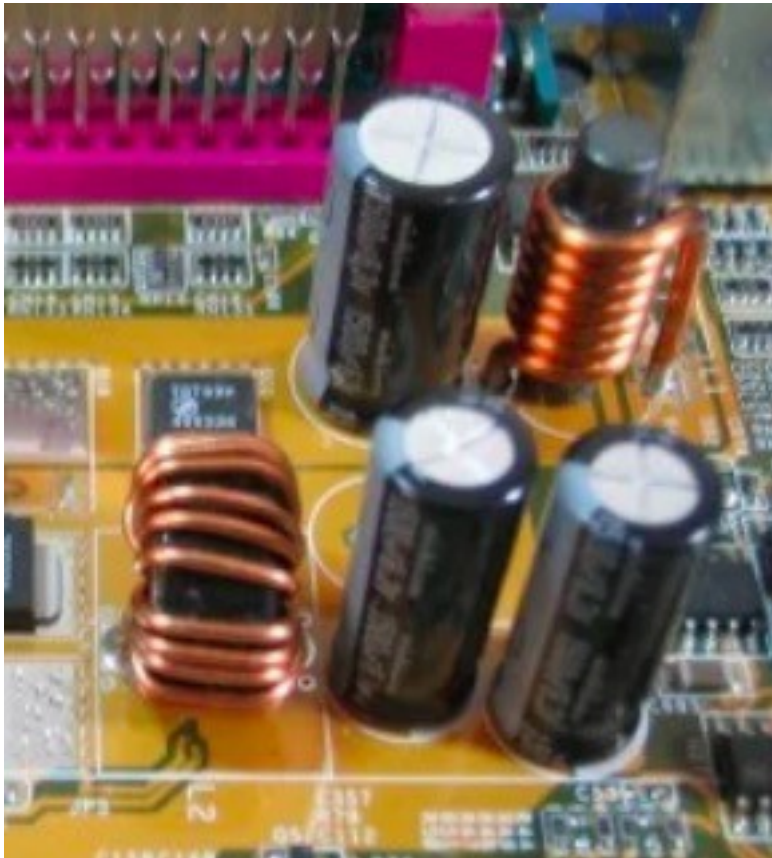
- Na análise de circuitos, a tensão induzida através de um indutor terá sempre uma polaridade que se opõe à tensão aplicada. Portanto, a notação a seguir é usada para a tensão induzida por um indutor:



$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{volts, V})$$

Quanto maior a indutância e/ou mais rápida a variação na corrente por uma bobina, maior a tensão induzida pela bobina.

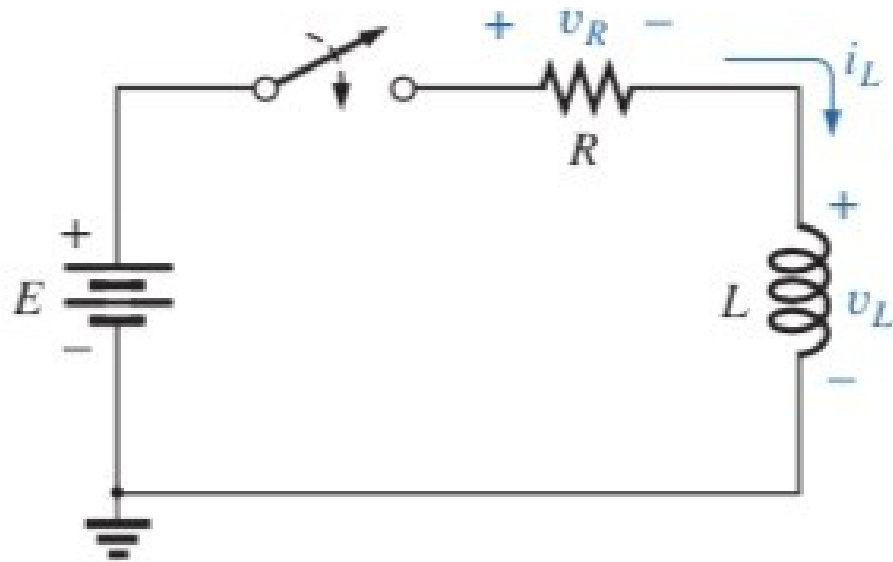
Capacitores e indutores:



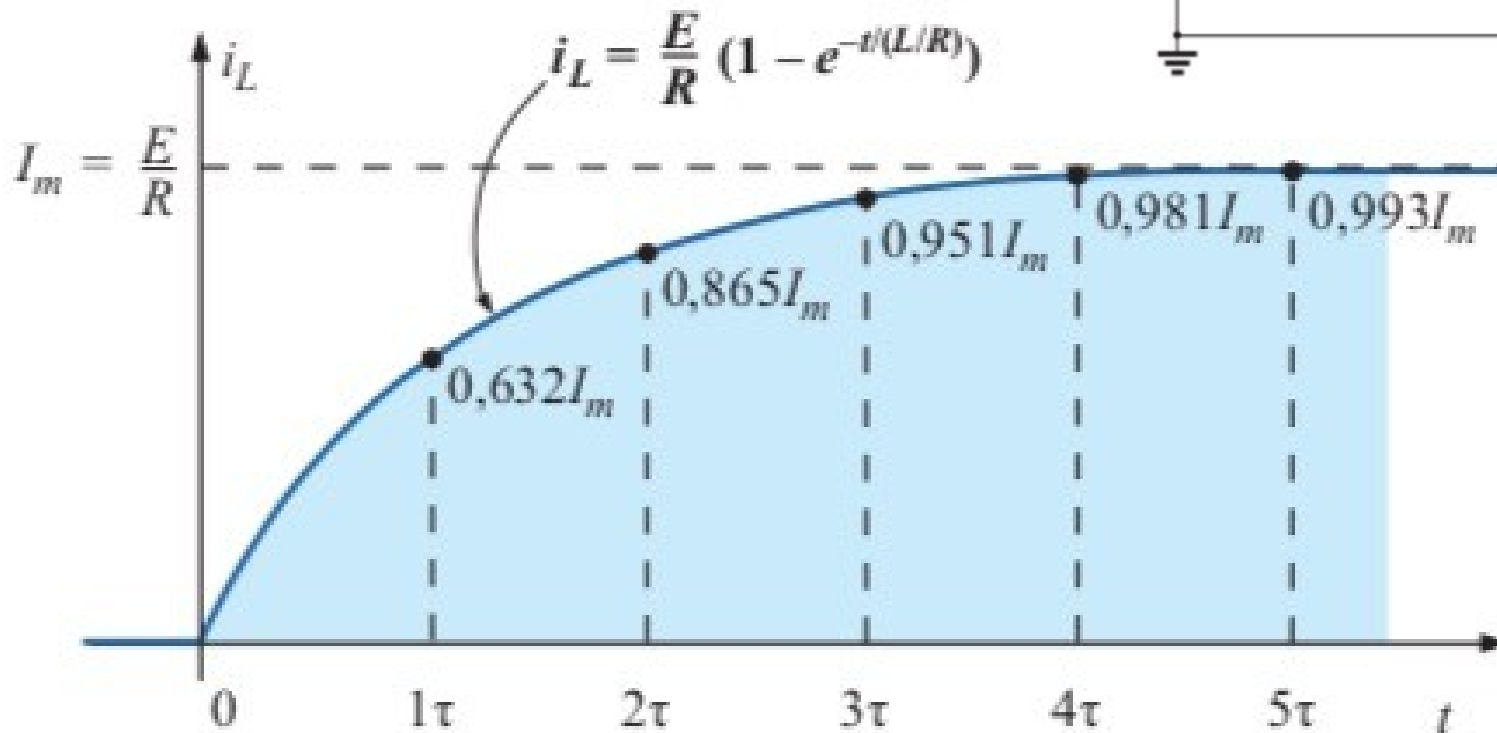
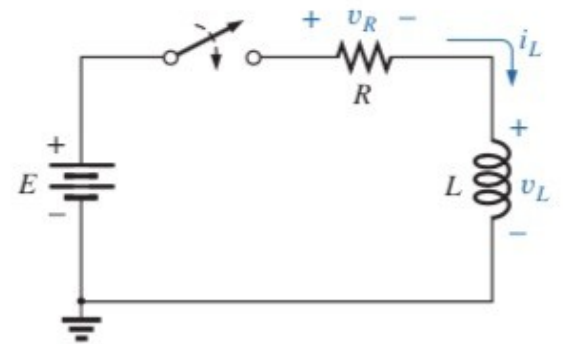
Indutores são projetados para estabelecer um forte campo magnético na unidade, enquanto capacitores são projetados para estabelecer um forte campo elétrico entre as placas.

$$\begin{array}{c} v_L = L \frac{di_L}{dt} \\ \downarrow \\ i_C = C \frac{dv_C}{dt} \end{array}$$

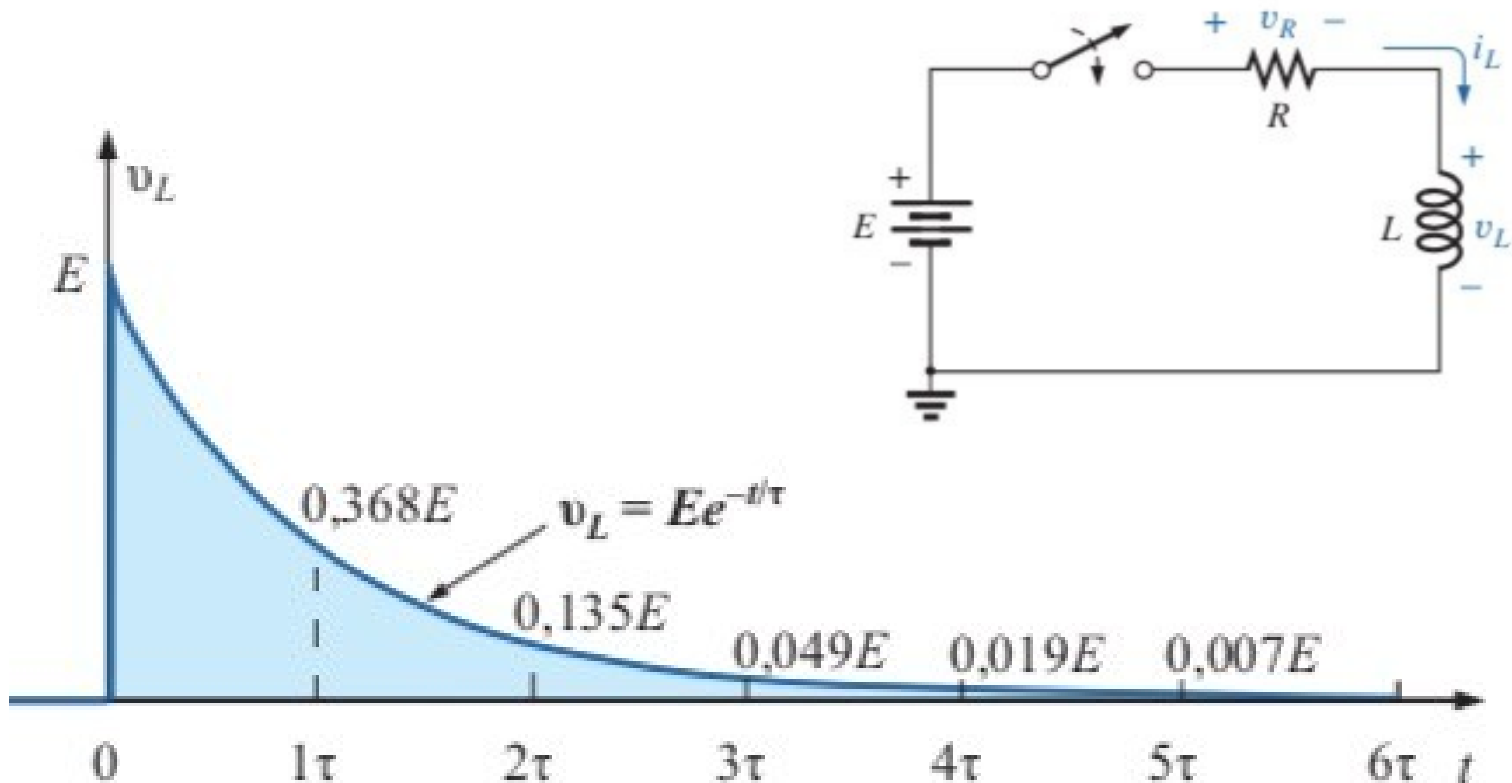
- TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R - L : FASE DE ARMAZENAMENTO



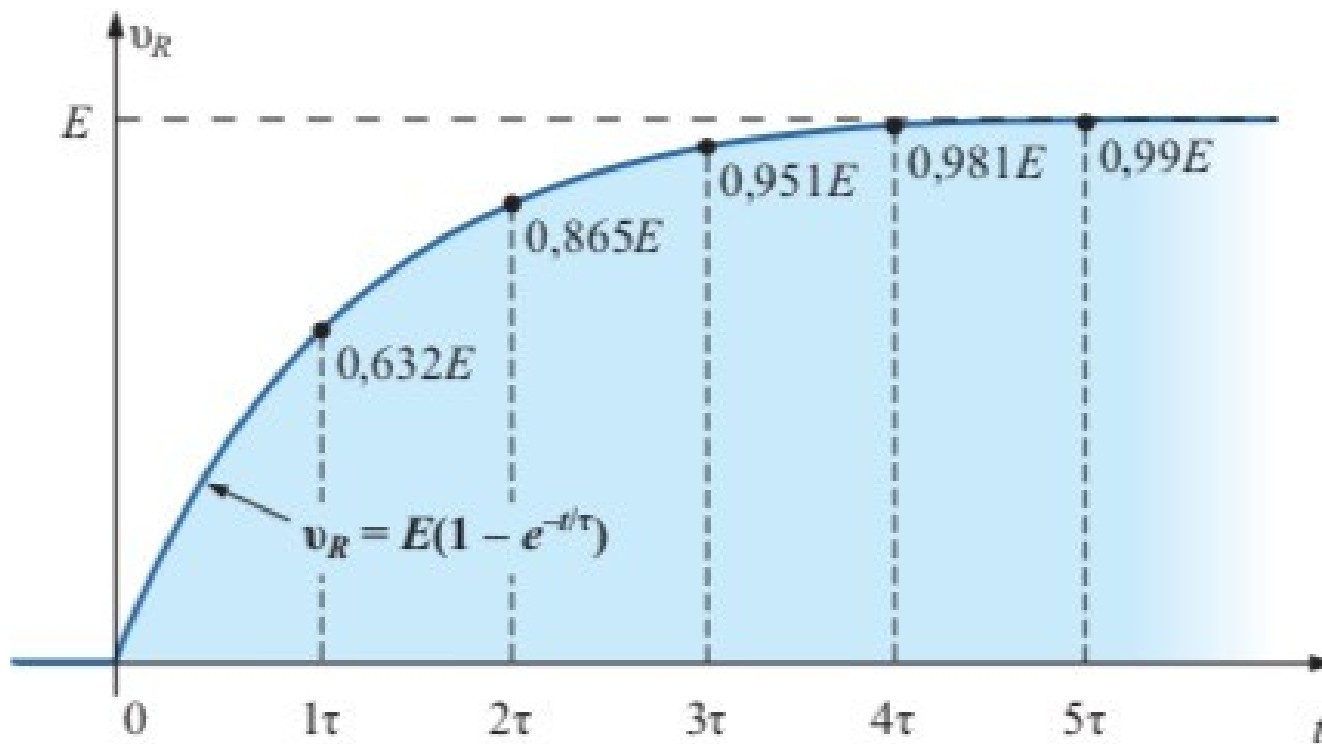
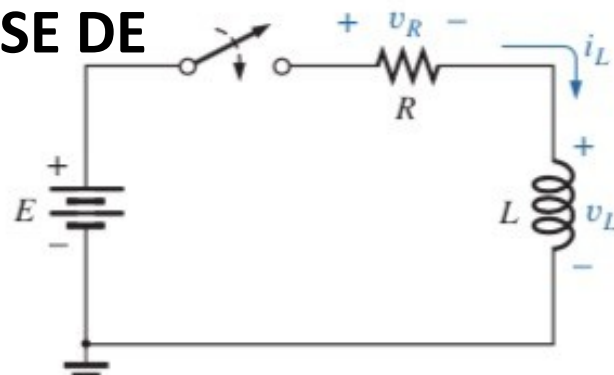
TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R-L: FASE DE ARMAZENAMENTO (CORRENTE)



TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R-L: FASE DE ARMAZENAMENTO (TENSÃO)



TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R-L: FASE DE ARMAZENAMENTO (TENSÃO R)



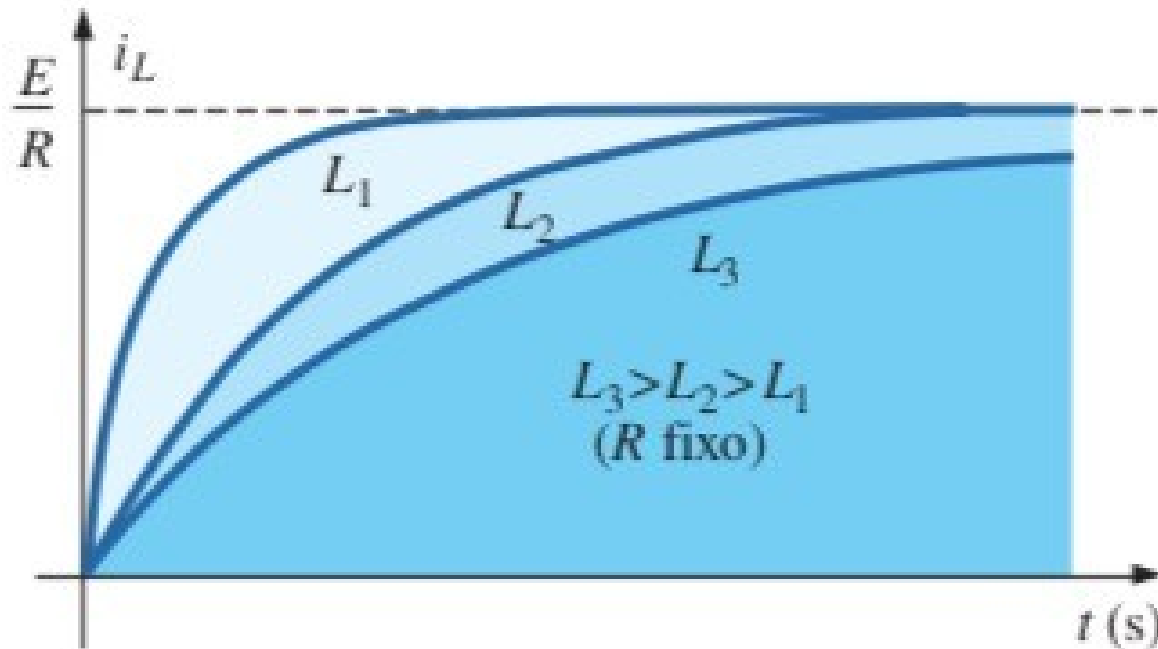
TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R - L : FASE DE ARMAZENAMENTO

$$i_L = \frac{E}{R}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{ampères, A})$$

$$v_L = Ee^{-t/\tau} \quad (\text{volts, V})$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (\text{segundos, s})$$

$$v_R = E(1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{volts, V})$$



TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R - L : FASE DE ARMAZENAMENTO (TENSÃO)

1

Fase de armazenamento passou, e as condições de estado estacionário foram estabelecidas assim que um período de tempo igual a cinco constantes de tempo ocorreu.

2

Corrente não pode variar instantaneamente em um circuito indutor.

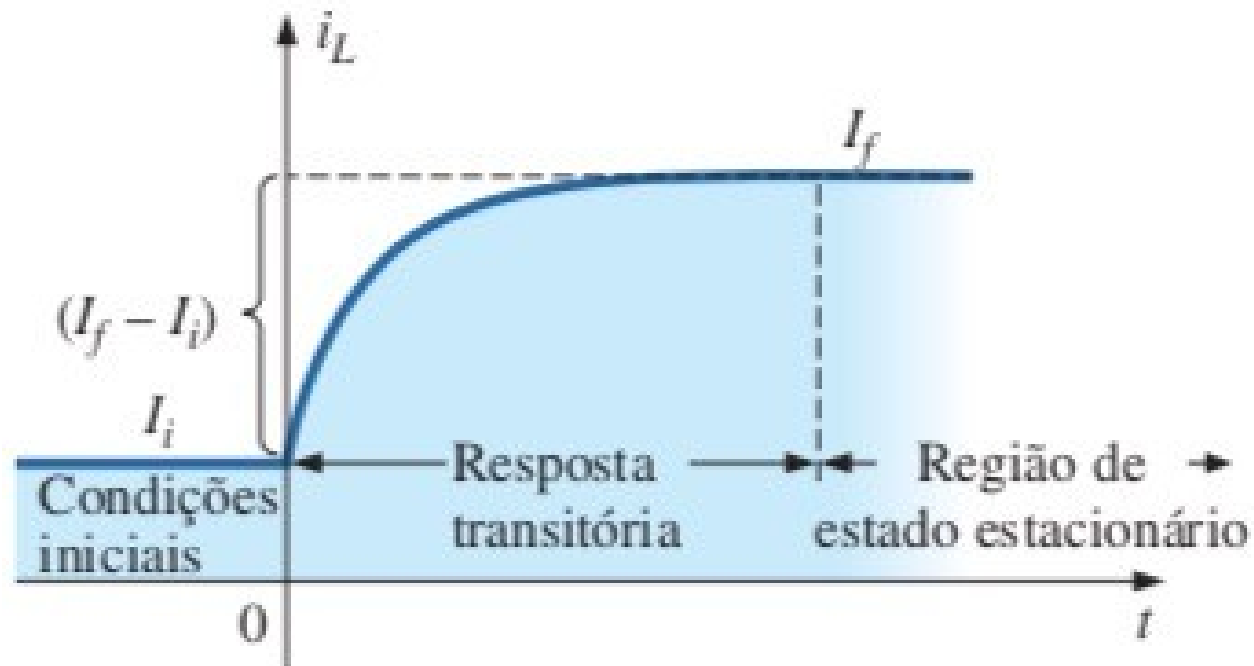
3

Indutor assume as características de um circuito aberto no instante em que a chave é fechada.

4

Indutor assume as características de um curto-circuito quando as condições de estado estacionário são estabelecidas.

- **VALORES INICIAIS**

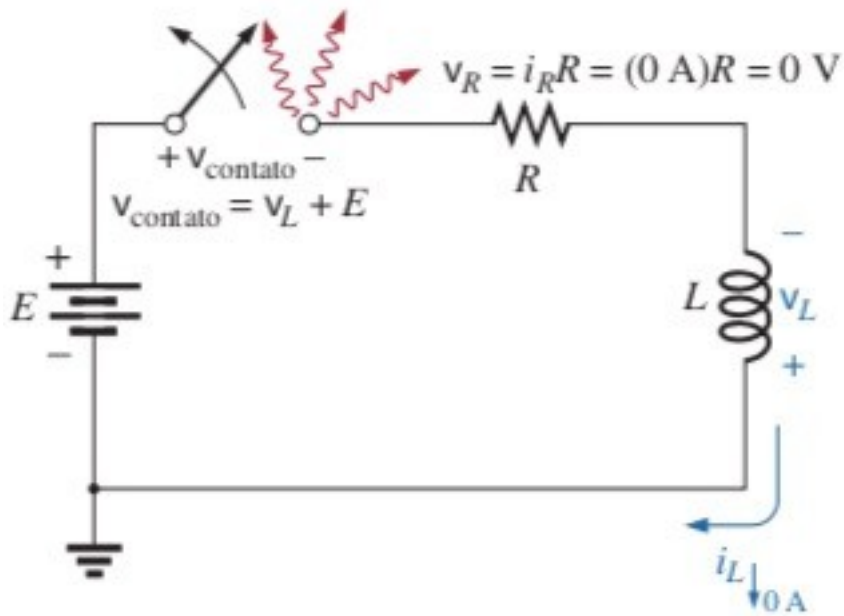


$$i_L = I_i + (I_f - I_i)(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\begin{aligned} i_L &= I_i + I_f - I_f e^{-t/\tau} - I_i - I_i e^{-t/\tau} \\ &= I_f - I_f e^{-t/\tau} + I_i e^{-t/\tau} \end{aligned}$$

$$i_L = I_f + (I_i - I_f)e^{-t/\tau}$$

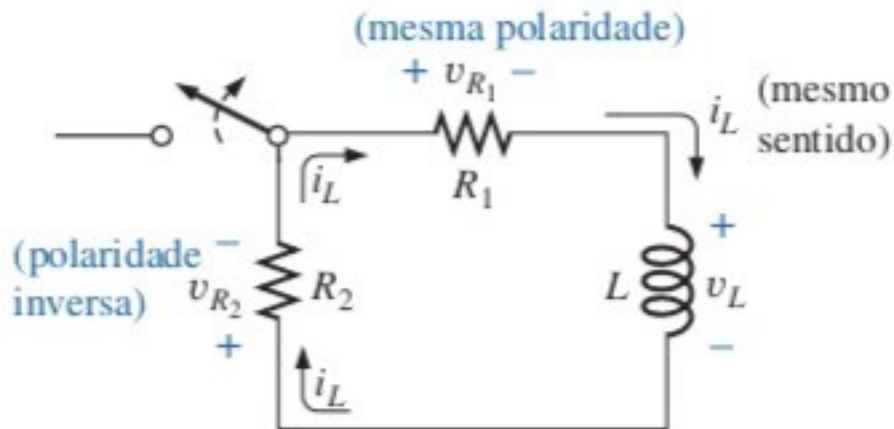
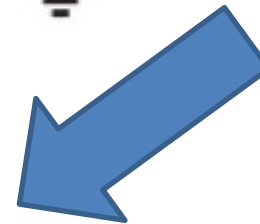
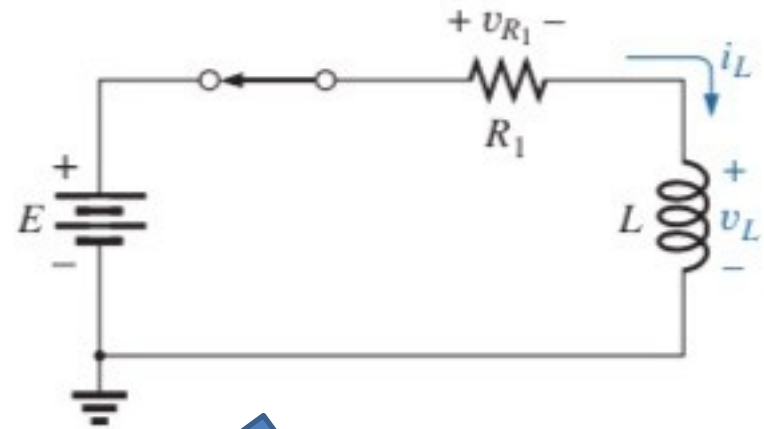
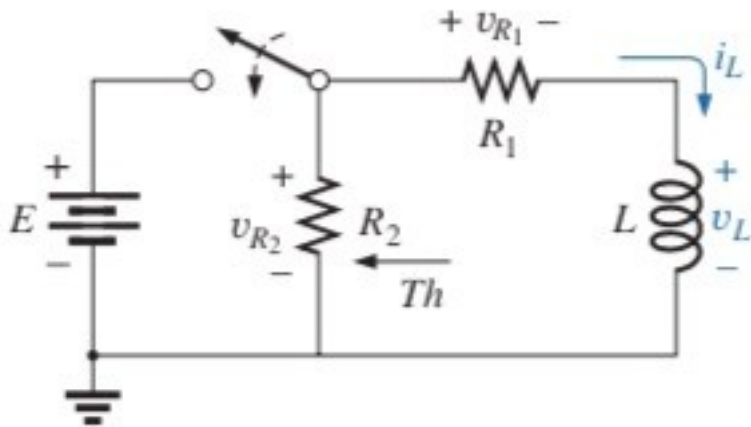
- TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R - L : FASE DE DECAIMENTO



Um indutor isolado **não** pode reter a energia armazenada, pois a ausência de um circuito fechado faz com que a corrente caia para zero e perca toda a energia armazenada no campo magnético.

Se o circuito R - L , tivesse chegado ao estado estacionário e a chave fosse rapidamente aberta, provavelmente ocorreria uma centelha entre os contatos, pois a corrente cairia do máximo E/R para zero ampère muito rapidamente.

- TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS *R-L*: FASE DE DECAIMENTO



$$v_L = -(v_{R_1} + v_{R_2})$$

TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R-L: FASE DE DECAIMENTO (TENSÃO)

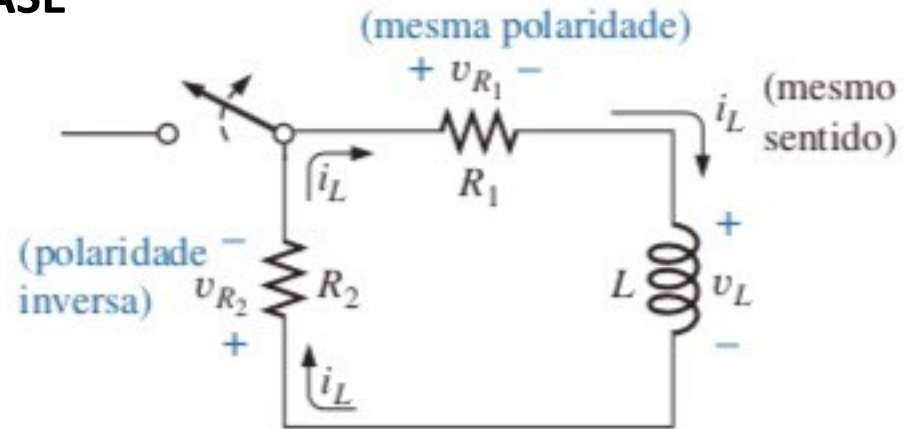
$$v_L = -(v_{R_1} + v_{R_2})$$

$$v_L = -(v_{R_1} + v_{R_2}) = -(i_L R_1 + i_L R_2)$$

$$= -i_L(R_1 + R_2) = -\frac{E}{R_1}(R_1 + R_2) = -\left(\frac{R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right)E$$

$$v_L = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)E$$

carga aberta

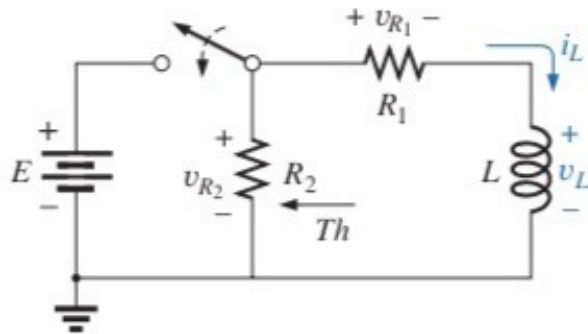


$$v_L = -V_i e^{-t/\tau'}$$

$$V_i = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)E$$

$$\tau' = \frac{L}{R_T} = \frac{L}{R_1 + R_2}$$

TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R-L: FASE DE DECAIMENTO (CORRENTE)

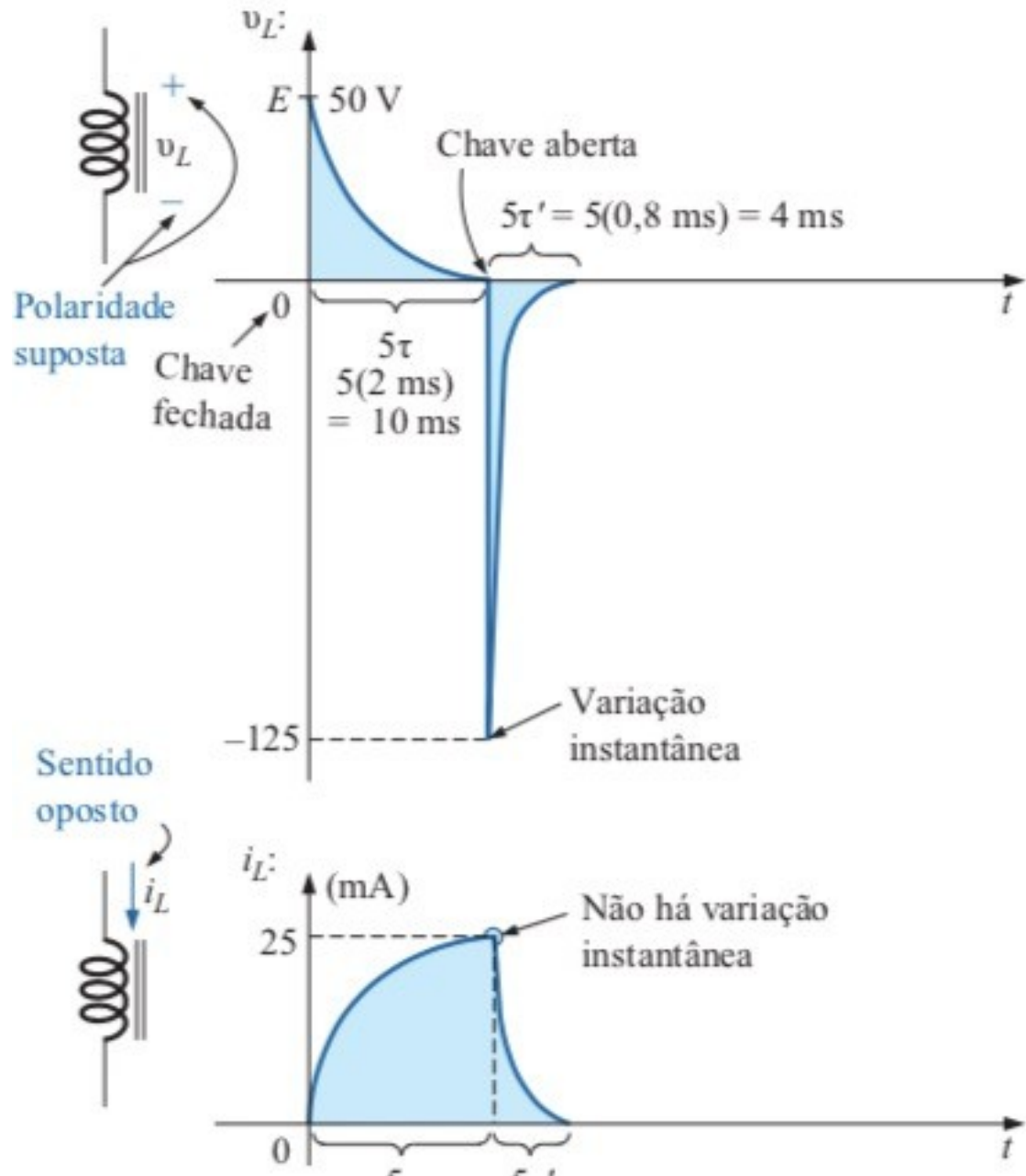


$$I_i = \frac{E}{R_1} \quad I_f = 0 \text{ A}$$

$$i_L = I_f + (I_i - I_f)e^{-t/\tau'} \\ = 0 \text{ A} + \left(\frac{E}{R_1} - 0 \text{ A} \right) e^{-t/\tau'}$$

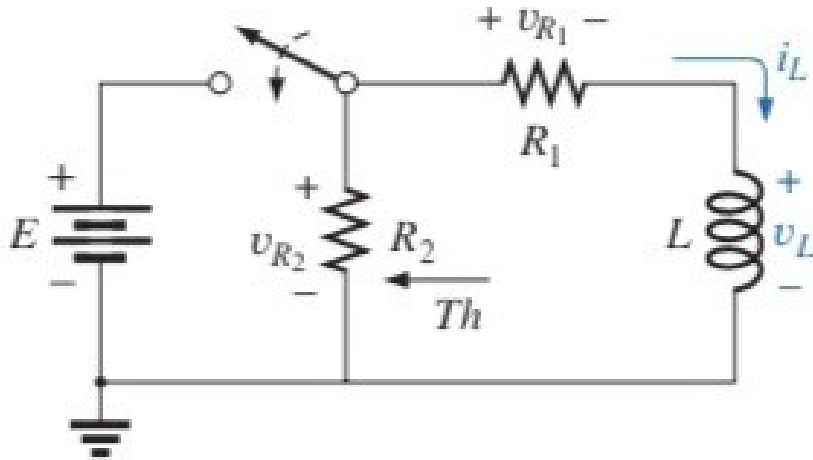
$$i_L = \frac{E}{R_1} e^{-t/\tau'}$$

$$\tau' = \frac{L}{R_1 + R_2}$$



- **TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS R - L : FASE DE DECAIMENTO**

- Se chave do circuito for aberta antes de i_L alcançar o seu valor máximo, a equação para o decaimento da corrente do circuito visto na é:



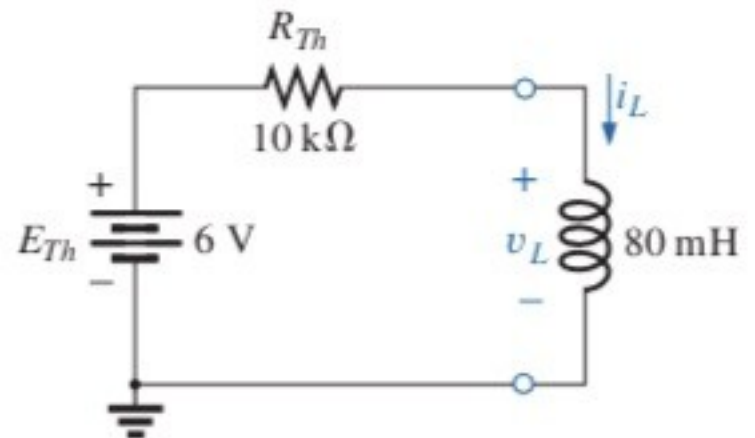
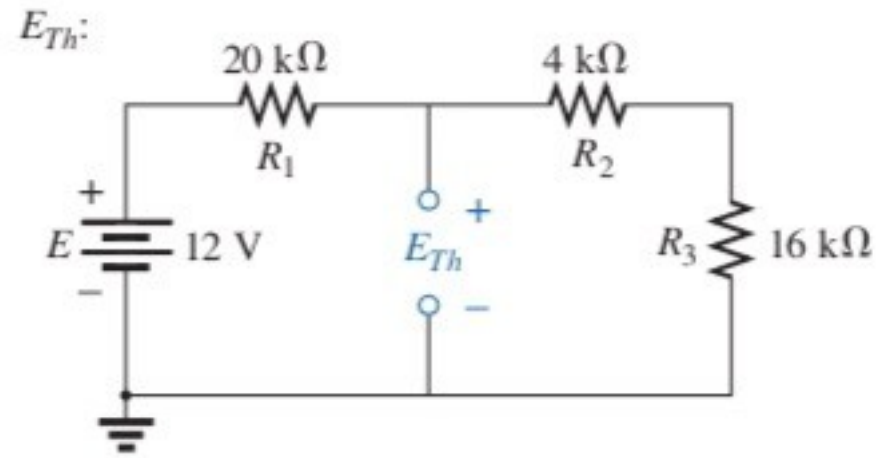
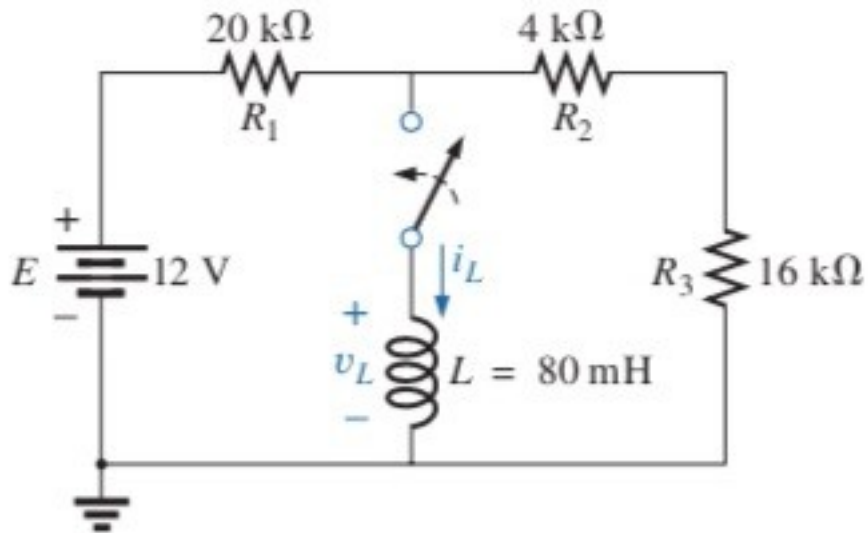
$$i_L = I_i e^{-t/\tau'}$$

$$v_L = -V_i e^{-t/\tau'}$$

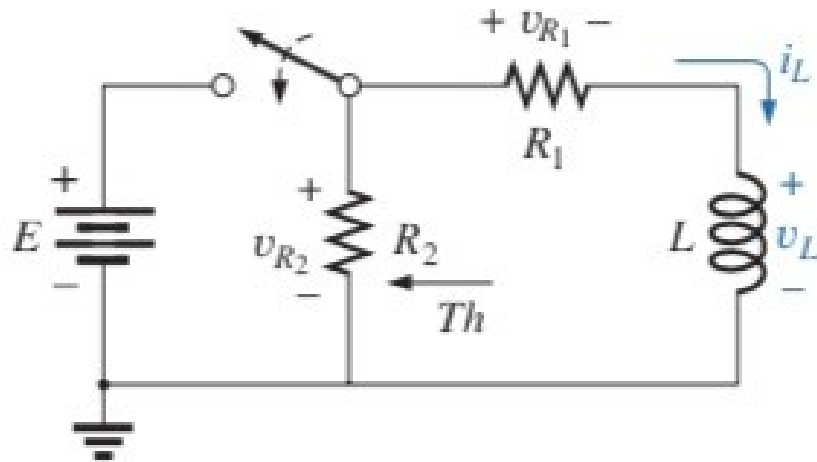
$$V_i = I_i(R_1 + R_2)$$

- Outras configurações de circuito

- Equivalente de Thévenin: $\tau = L/R_{Th}$



- VALORES INSTANTÂNEOS



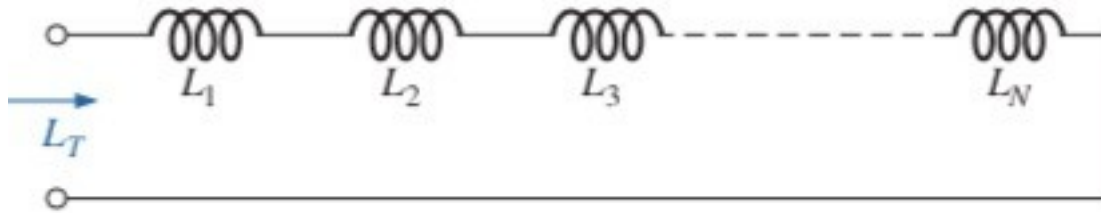
$$t = \tau \log_e \frac{(I_i - I_f)}{(i_L - I_f)} \quad (\text{segundos, s})$$

$$t = \tau \log_e \frac{V_i}{v_L} \quad (\text{segundos, s})$$

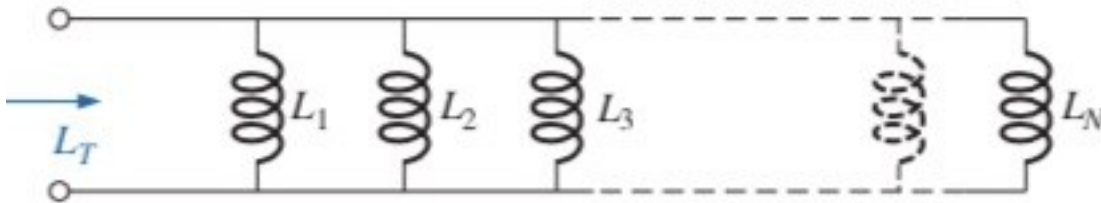
$$t = \tau \log_e \left(\frac{E}{E - v_R} \right)$$

$$t = \tau \log_e \left(\frac{V_f}{V_f - v_R} \right) \quad (\text{segundos, s})$$

- **INDUTORES EM SÉRIE E EM PARALELO**



$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_N$$



$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_N}$$

- **ENERGIA ARMAZENADA POR UM INDUTOR**

