

## Laboratório 8

### Circuito RL

#### Objetivo

Observar o comportamento de um indutor associado em série com um resistor e determinar a constante de tempo do circuito.

#### Material utilizado

- Gerador de função
- Osciloscópio
- Multímetro digital
- Placa para circuitos
- 1 resistor de 1 k $\Omega$
- 1 indutor de 1 mH

#### 1. Indutores

Um indutor é um componente eletrônico passivo feito de uma bobina de fio enrolada em torno de um núcleo, que pode ser ar, ferro ou ferrita. Os indutores também são conhecidos como bobinas, eletroímãs e solenoides, dependendo de como são usados no circuito.

Quando uma corrente elétrica atravessa um indutor, um campo magnético é criado ao longo dele. Se você mudar o valor da corrente, o fluxo magnético através da bobina será modificado, e uma voltagem será **induzida** através do indutor. Essa voltagem, as vezes chamada de *tensão de retorno*, causa um fluxo de corrente **oposto** à corrente principal. Essa propriedade dos indutores é conhecida como *autoindutância*, ou simplesmente *indutância*, simbolizada por  $L$ . A voltagem  $V_L$  induzida no indutor está relacionada a indutância  $L$  por

$$V_L = -L \frac{di}{dt} \quad (8.1)$$

onde  $(di/dt)$  é a taxa de variação da corrente no circuito. A unidade de indutância no sistema internacional de unidades é o **henry** (H) ( $1 \text{ H} = 1 \text{ V.s/A}$ ).

O valor da indutância de um indutor comercial geralmente está marcado no mesmo, e utiliza o mesmo código de cores dos resistores.

#### Aplicações dos Indutores

Os indutores são usados basicamente em circuitos ressonantes para selecionar ou rejeitar sinais de frequência específicas, e para bloquear sinais de alta frequência, como eliminar interferências de radiofrequência em transmissões de cabo. Em aplicações de áudio, os indutores também são comumente usados para remover o ruído (chiado) a 60 Hz.

## 2. Circuito RL

A figura abaixo mostra uma fonte de tensão DC aplicada a um resistor em série com um indutor. Esse circuito é conhecido como **circuito RL**. Se não houvesse indutor no circuito, uma corrente igual  $V_B/i$  fluiria “instantaneamente” assim que a fonte fosse ligada. A presença do indutor afeta a corrente que flui no circuito.

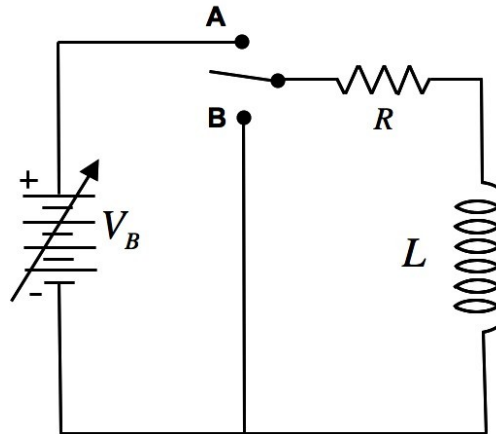


Figura 8.1 – Circuito RL

Quando uma voltagem DC é inicialmente ligada, a corrente que começa a fluir induz um campo magnético no indutor. Conforme a corrente aumenta, a intensidade do campo magnético aumenta proporcionalmente. Como o campo magnético está variando, ele induz uma tensão de retorno que, por sua vez, induz uma corrente no fio da bobina da direção **oposta** à corrente da fonte. A corrente então demora um certo tempo (chamado transiente) para alcançar um valor estável.

Conforme a corrente no circuito continua aumentando, a intensidade do campo continua a aumentar, mas a uma taxa cada vez menor. Quando a corrente no circuito alcança o valor estável, não há mais corrente induzida no indutor (veja Eq. 8.1), o efeito de indutância desaparece e ele se comporta apenas como um fio condutor (então  $V_L = 0$ ). O tempo necessário para que a corrente no circuito se estabilize depende, como verificaremos, das características do indutor e do resistor do circuito.

O indutor sempre possui uma resistência ôhmica, mas um circuito RL pode ser sempre modelado como tendo um indutor ideal (resistência nula) em série com um resistor de resistência  $R$ , onde  $R$  pode ter qualquer valor a partir do valor da resistência interna do indutor.

No caso do circuito representado na Figura 8.1, quando a chave é ligada na posição “A”, a relação entre as voltagens será:

$$V_B = V_R + V_C \quad (8.2)$$

Como  $V_R = Ri(t)$ , e  $V_L = L (di/dt)$  onde  $i(t)$  é a corrente elétrica dependente do tempo, temos a seguinte equação diferencial para o circuito durante o regime transiente

$$V_B = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (8.3)$$

A solução da equação acima, assumindo que para  $t = 0$  a corrente é zero,  $i(0) = 0$ , é

$$i(t) = \frac{V_B}{R} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \right] \quad (8.4)$$

A Eq. (8.4) mostra que a evolução da corrente no circuito depende da razão  $R/L$ . O inverso dessa razão tem unidade de tempo, e é chamada *constante de tempo do circuito*, denotada por  $\tau$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (8.5)$$

Análogo ao caso do capacitor,  $\tau$  representa o tempo necessário para que a corrente atinja 63% do seu valor máximo quando a voltagem da fonte passa de zero para  $V_B$ . Utilizando a Eq. (8.4), podemos obter também as expressões para as voltagens do resistor e indutor

$$V_R = Ri(t) = V_B \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (8.6)$$

$$V_L = V_B - V_R = V_B \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (8.7)$$

As equações (8.6) e (8.7) mostram que para pequenos intervalos de tempo acima de zero, a voltagem no resistor é próxima de zero, enquanto a voltagem no indutor é próxima a voltagem da fonte. Após um intervalo de tempo muito maior que  $\tau$ ,  $V_L$  cai a zero e a voltagem no resistor é  $V_B$ .

No momento em que corrente no circuito estiver estável, se ligarmos a chave na posição “B”, a equação diferencial que governa o comportamento do circuito é dada pela Eq. (8.3) com  $V_B = 0$ . Nessa situação, a condição inicial passa a ser  $i(0) = V_B/R$ , e as soluções para  $V_R$  e  $V_L$  são:

$$V_R = Ri(t) = V_B \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (8.8)$$

$$V_L = -V_R = -V_B \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (8.9)$$

Neste experimento, para chavear o circuito da posição “A” para a posição “B”, e vice-versa, utilizaremos o gerador de funções, escolhendo a forma de onda quadrada. Nesse caso, em vez de termos a voltagem variando de 0 a  $V_B$ , a voltagem variará de  $-V_0$  a  $V_0$ , o que altera a condição inicial, mas não a constante de tempo do circuito.

A constante de tempo  $\tau$  pode ser determinada experimentalmente através da medida do tempo de meia-vida do sistema,  $t_{1/2}$ . De maneira análoga ao circuito RC, o tempo de meia-vida e a constante de tempo estão relacionados por

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} . \quad (8.10)$$

A constante de tempo também pode ser determinada pela Eq. (8.5). Suponha que tenhamos um indutor de indutância  $L = 2 \text{ mH}$  e um resistor de  $1 \text{ k}\Omega$ . O valor de  $\tau$  será:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{2 \times 10^{-3} \text{ H}}{1 \times 10^3 \Omega} = 2 \times 10^{-6} \text{ s} = 2 \mu\text{s}$$

### Procedimento Experimental

1. Com o multímetro, faça a medida da resistência do resistor e da indutância do indutor que serão usados no experimento. Calcule a constante de tempo do circuito.
2. Com o material disponível sobre a bancada, monte o circuito abaixo. Note que o resistor está ligado em série com o indutor.

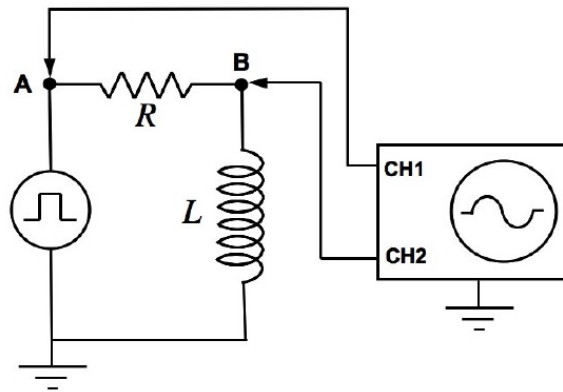


Figura 8.2 – Montagem do circuito para a medida de  $V_L$

3. Ligue o gerador de funções e o ajuste de forma a produzir uma onda quadrada de freq.  $\sim 100 \text{ kHz}$ .
4. Ajuste a amplitude do gerador de funções para  $V_0 = 2.0 \text{ V}$  e ligue o osciloscópio.
5. Ajuste as chaves de deflexão vertical e horizontal do osciloscópio. Você deve observar no visor um sinal semelhante ao da figura abaixo.

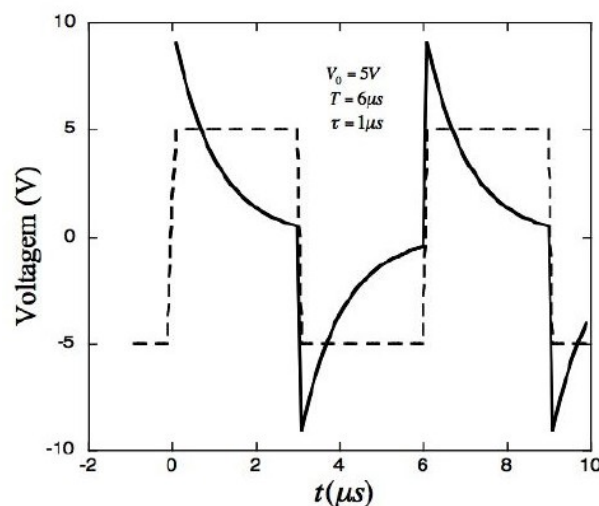


Figura 8.3 – Voltagem do indutor observada na tela do osciloscópio.

6. Ajuste as escalas do osciloscópio de modo a colocar na tela apenas um patamar de onda quadrada, de forma a ocupar o maior espaço possível.

7. Complete a tabela abaixo indicando a medida de  $t_{1/2}$  em divisões, a escala utilizada e o valor de  $t_{1/2}$  em  $\mu\text{s}$ , bem como o seu erro. Calcule a constante de tempo do circuito ( $\tau$ ) e o seu erro.

$t_{1/2} \pm \sigma_{t_{1/2}}$ (DIV)	Escala ( $\mu\text{s}/\text{DIV}$ )	$t_{1/2} \pm \sigma_{t_{1/2}}$ ( $\mu\text{s}$ )

8. Para cada intervalo de tempo correspondente a uma divisão horizontal, faça a medida de voltagem correspondente e complete a tabela abaixo. Não esqueça de anotar os valores das escalas de tempo e voltagem utilizadas nas medidas.

Escala de tempo: ( )  $\mu\text{s}/\text{DIV}$

Escala de voltagem: ( )  $\text{V}/\text{DIV}$

$t$ (DIV)	$V_L$ (DIV)	$t$ ( $\mu\text{s}$ )	$V_L$ (V)	$\ln(V_L)$
0				
1				
2				
3				
4				
5				

9. Determine o valor de  $\tau$  e o seu erro através de um ajuste linear (linearize a Eq. 8.7)