

# Trabalho 7: Circuitos de corrente alternada

Introdução à Física Experimental - 2017/18

Cursos: Lic. Física e M. I. Eng. Física

Departamento de Física - Universidade do Minho

Este trabalho laboratorial tem por objetivo estudar os circuitos RC, RL e RLC série em corrente alternada sinusoidal e determinar as suas impedâncias. Pretende-se também determinar a frequência de ressonância do circuito RLC série. Faz-se uso da tensão e intensidade de corrente eficazes e da notação complexa para lidar com a corrente alternada sinusoidal. As medidas são realizadas recorrendo ao osciloscópio e ao multímetro.

## Objectivos deste trabalho laboratorial:

- Estudar circuitos de corrente alternada sinusoidal sinusoidal usando o osciloscópio
- Observar tensões sinusoidais nos terminais de resistências, condensadores e bobinas.
- Determinar impedâncias em circuitos de corrente alternada sinusoidal.
- Determinar a frequência de ressonância de um circuito RLC série.

## I. Introdução

### I.1. Corrente alternada sinusoidal: notação complexa

As fontes de tensão contínua, como o nome indica, são preparadas para manterem uma diferença de potencial constante entre os seus terminais. Deste modo, para caracterizarmos totalmente a tensão fornecida ao circuito só precisamos de medir o seu valor.

Quando a tensão fornecida é variável, a medição do seu valor não é só por si suficiente, uma vez que esse valor é função do tempo. Mais do que o seu valor num dado instante, precisamos de saber qual a sua forma ao longo do tempo, ou seja, a maneira como varia ao longo do tempo.

Neste trabalho apenas vamos utilizar tensões alternadas sinusoidais, e, neste caso, precisamos de conhecer a sua amplitude, a sua frequência e a sua fase para determinar a forma como a tensão ( $V(t)$ ) e a intensidade de corrente ( $I(t)$ ) variam com o tempo ( $t$ ):

$$V(t) = V_{\max} \cos(\omega t + \alpha_V) \quad (1)$$

$$I(t) = I_{\max} \cos(\omega t + \alpha_I) \quad (2)$$

em que:

- $V_{\max}$  e  $I_{\max}$  são as amplitudes da tensão ( $= V_{pp}/2$ ) e da intensidade, respectivamente
- $\omega$  é frequência angular comum a todas as funções do circuito ( $= 2\pi f$ )
- $\alpha_V$  é a fase inicial de tensão (ângulo de fase quando  $t=0$ )
- $\alpha_I$  é a fase inicial da corrente (ângulo de fase quando  $t=0$ )

Utilizando a notação de números complexos e a fórmula de Euler ( $e^{jx} = \cos x + j \sin x$ , onde  $j$  é a unidade imaginária,  $j^2=-1$ ) estas funções passam a escrever-se:

$$\begin{aligned} V(t) &= V_{\max} \cos(\omega t + \alpha_V) \\ &= V_{\max} \operatorname{Re}(e^{j(\omega t + \alpha_V)}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I(t) &= I_{\max} \cos(\omega t + \alpha_I) \\ &= I_{\max} \operatorname{Re}(e^{j(\omega t + \alpha_I)}) \end{aligned} \quad (4)$$

Nestes circuitos, onde a frequência é comum a todas as funções (tensão e corrente), é suficiente indicar a amplitude e a fase para identificar cada sinal. A expressão (3) pode ser escrita:

$$V(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re}\left(\frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} e^{j\alpha_V} e^{j\omega t}\right) \quad (5)$$

onde o fator  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  é destacado por assim convir para cálculos que envolvam energia ou potência,

passando somente a interessar determinar:

$$\bar{V} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}} e^{j\alpha_V} \quad (6)$$

Analogamente, para a expressão (4)

$$I(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left( \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}} e^{j\alpha_I} e^{j\omega t} \right) \quad (7)$$

com:

$$\bar{I} = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}} e^{j\alpha_I} \quad (8)$$

em que  $\frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}$  e  $\frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$  são, respectivamente, tensão eficaz e intensidade de corrente eficaz, e são os valores da média quadrática da respectiva função. Podem ser obtidos por medição directa nos multímetros e correspondem aos valores que teriam de ser usados num circuito de tensão contínua para que este libertasse a mesma energia, por efeito Joule.

## I.2. Lei de Ohm em corrente alternada sinusoidal

Contrariamente aos circuitos de corrente contínua (DC), nos circuitos de corrente alternada (AC) existem outros componentes ativos além das resistências. Como pudemos observar em trabalhos anteriores, os condensadores são componentes capazes de armazenar energia eléctrica e cuja tensão aos seus terminais varia com o tempo até atingir uma tensão igual à da fonte. A partir desse momento, se a fonte for de corrente contínua (DC), o condensador comporta-se como um circuito aberto, deixando de haver corrente no circuito. De modo similar, uma bobine só produz algum efeito num circuito enquanto houver variação da corrente que a percorre. Deste modo, num circuito AC, o condensador e a bobina são componentes ativos.

Num circuito AC, composto apenas por componentes lineares (resistências, bobinas e condensadores), a relação entre a tensão e a corrente é dada por uma expressão equivalente à lei de ohm para circuitos DC, e traduz-se por:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} \quad (15)$$

onde  $\bar{Z}$  representa a impedância do circuito. Quando a impedância é mínima, a corrente é máxima.

Por se tratar de um número complexo, a impedância total do circuito é da forma:

$$\bar{Z} = R + jX \quad (16)$$

sendo  $R$  a resistência total do circuito (componente

real da impedância) e  $X$  a sua reatância (componente imaginária da impedância).

Ou, usando a notação de números complexos:

$$\bar{Z} = |\bar{Z}| e^{j\alpha_Z} \quad (17)$$

com:

$$\alpha_Z = \operatorname{arctg} \frac{X}{R} \quad \text{e} \quad |\bar{Z}| = \sqrt{(R^2 + X^2)}$$

Então, a Lei de Ohm ( $\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}}$ ) vem

$$\frac{V_{ef} e^{j\alpha_V}}{I_{ef} e^{j\alpha_I}} = |\bar{Z}| e^{j\alpha_Z} \quad (18)$$

onde  $\alpha_Z = \alpha_V - \alpha_I$ .

$$\frac{V_{ef}}{I_{ef}} = |\bar{Z}|$$

ou

$$\frac{|\bar{V}|}{|\bar{I}|} = |\bar{Z}| \quad (19)$$

Logo:

$$\frac{\sqrt{2}V_{ef}}{\sqrt{2}I_{ef}} = |\bar{Z}| \quad \text{ou} \quad \frac{|V_{máx}|}{|I_{máx}|} = |\bar{Z}| \quad (20)$$

O efeito de cada um dos componentes (resistências, bobinas e condensadores) sobre o circuito é dado pela sua **impedância** que se traduzirá para cada um por:

Impedância resistiva	$\bar{Z}_R = R$	(puramente real)
Impedância indutiva	$\bar{Z}_L = j\omega L$ ou $\bar{Z}_L = \omega L e^{j\frac{\pi}{2}}$	(puramente imaginário)
Impedância capacitiva	$\bar{Z}_C = \frac{1}{j\omega C}$ ou $\bar{Z}_C = \frac{1}{\omega C} e^{-j\frac{\pi}{2}}$	(puramente imaginário)

em que:

$L$  é a indutância da bobine

$C$  é a capacidade do condensador.

Em corrente alternada, as leis de associação de impedâncias são similares às leis de associação de resistências em corrente contínua:

- associação em série:

$$\bar{Z}_{total} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 + \dots \quad (24)$$

- associação em paralelo:

$$\frac{1}{\bar{Z}_{total}} = \frac{1}{\bar{Z}_1} + \frac{1}{\bar{Z}_2} + \frac{1}{\bar{Z}_3} + \dots \quad (25)$$

O ângulo de desfasamento, ou fator de potência, é dado por:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(\bar{Z})}{\text{Re}(\bar{Z})}\right). \quad (26)$$

Por exemplo, num circuito em que a resistência, condensador e bobine estão em série (circuito RLC série) a impedância do circuito é dada por

$$\begin{aligned} \bar{Z} &= R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \\ &= R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \end{aligned} \quad (27)$$

e a diferença de fase entre a corrente e a tensão vem

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) \quad (28)$$

### I.3. Ressonância num circuito RLC

Como foi referido, as impedâncias dos condensadores e das bobinas dependem da frequência angular ( $\omega$ ) da tensão aplicada ao circuito. Também foi visto que são imaginárias e que os sinais algébricos dessas impedâncias são opostos; as impedâncias das bobinas e dos condensadores estão em oposição de fase (diferença de fase de  $180^\circ$ ).

Num circuito RLC série haverá um valor de  $\omega$  para o qual a componente imaginária da sua impedância se anula. Essa frequência é denominada “**frequência de ressonância**”. Nessa situação a tensão e a corrente estão em fase e a impedância do circuito é apenas real e é mínima. Consequentemente, para essa frequência e para esse valor de tensão aplicada, a intensidade de corrente é máxima.

De facto, em ressonância, a equação (27) reduz-se a  $\bar{Z} = R$ . Neste caso a frequência para a qual isso acontece ( $\omega_0$ , frequência de ressonância), será tal que

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0,$$

de onde se conclui que

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (29)$$

Utilizando a expressão (28) para a situação de ressonância vem

$$\phi_{reson} = \arctan(0) = 0.$$

Isto é, em ressonância a tensão e a corrente no circuito estão em fase.

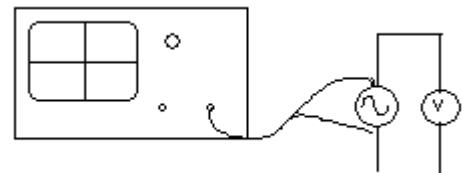
## II. Procedimento experimental

### II.1. Material:

- Osciloscópio
- Bobine de 39 mH
- Condensador de  $4,7\mu\text{F}$
- Resistência de  $\sim 330\Omega$
- Multímetro
- Gerador de funções
- Fios de ligação

### II.2. Análise de uma tensão sinusoidal

Ligue em paralelo o multímetro e o osciloscópio ao seu gerador de funções como se indica na figura seguinte e, usando o osciloscópio, regule o último para um sinal sinusoidal com uma frequência de 500 Hz e uma tensão  $V_{pp} = 3\text{ V}$ .



Meça os seguintes valores de tensão aos terminais do gerador de funções utilizando o osciloscópio ou o voltímetro.

$$V_{máx} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$V_{pp} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$V_{ef} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$T = \underline{\hspace{2cm}}$$

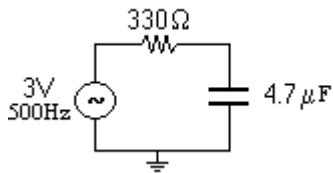
Verifique se os valores experimentais da tensão confirmam a relação esperada.

$$V_{ef} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}$$

g) A partir das características do condensador e do sinal de tensão, calcule o valor da impedância do condensador e compare com os valores obtidos em d) e f).

### II.3. Estudo de um circuito RC série

a) Monte o circuito RC seguinte:



b) Meça a tensão aos terminais do condensador e o seu desfasamento em relação à tensão da fonte, usando o osciloscópio.

$$|\bar{V}_c| = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Arg}(\bar{V}_c) = \underline{\hspace{2cm}}$$

c) Meça a corrente no circuito e o seu desfasamento em relação à tensão da fonte, usando o osciloscópio.

Note que:

- a corrente no circuito pode ser determinada a partir da medida da tensão aos terminais da resistência (na resistência a corrente e a tensão estão em fase);
- para observar simultaneamente no osciloscópio a tensão na resistência e a tensão no gerador (com as terras do gerador e dos dois canais do osciloscópio em comum) é necessário mudar a posição da terra indicada na figura.

$$|\bar{I}| = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Arg}(\bar{I}) = \underline{\hspace{2cm}}$$

d) Calcule a impedância do condensador usando a lei de Ohm.

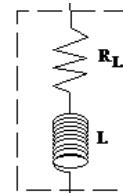
e) Usando o multímetro meça a tensão aos terminais do condensador,  $|\bar{V}_c|$ , a intensidade de corrente que atravessa o circuito,  $|\bar{I}|$ , e compare com os valores obtidos nas alíneas b) e c).

$$|\bar{V}_c| = \underline{\hspace{2cm}}$$

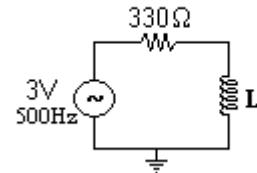
$$|\bar{I}| = \underline{\hspace{2cm}}$$

### II.4. Estudo de um circuito RL série

a) Meça a resistência da bobine com o ohmímetro. Note que a bobine real é equivalente a uma bobine ideal de indutância  $L$  em série com a resistência  $R_L$  do fio que a constitui:



b) Monte o circuito seguinte (círculo RL série):



c) Meça a tensão aos terminais da bobine ( $L$ ) e o seu desfasamento em relação à tensão da fonte.

$$|\bar{V}_L| = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Arg}(\bar{V}_L) = \underline{\hspace{2cm}}$$

d) Meça a corrente no circuito e o seu desfasamento em relação à tensão da fonte.

$$|\bar{I}| = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Arg}(\bar{I}) = \underline{\hspace{2cm}}$$

e) Calcule a impedância da bobine usando a lei de Ohm.

$$|\bar{Z}_L| = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Arg}(\bar{Z}_L) = \underline{\hspace{2cm}}$$

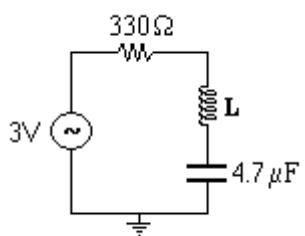
f) A partir das características do condensador e do sinal de tensão, calcule o valor da impedância da bobine e compare com os valores obtidos em e).

f) Usando os valores obtidos na alínea anterior calcule a módulo da impedância do condensador.

$$|\bar{Z}_c| = \underline{\hspace{2cm}}$$

## II.5. Estudo de um circuito RLC série

a) Monte o circuito (RLC) seguinte:



b) Visualize no osciloscópio a tensão aos terminais da resistência e a tensão aos terminais do gerador.

c) Determine a frequência de ressonância do circuito, variando a frequência do gerador até que a corrente no circuito (proporcional à tensão nos terminais da resistência) passe por um máximo.

$$f_{\text{ressonância}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

d) Determine a frequência de ressonância usando o desfasamento entre a corrente no circuito e tensão no gerador.

$$f_{\text{ressonância}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

d) Compare os valores obtidos em c) e d) com o valor teórico.

## Referências

- [1] *Física Experimental - Uma introdução*, M. C. Abreu, L. Matias, L. F. Peralta, Presença (1994)

# Exercício A - ACII

Henrique Lopes A85953

Abril 2020

## Informações iniciais do circuito

Fonte de tensão: 100V

Resistência:  $10 \Omega$

*Bobine* :  $31,8mH$

*Condensador* :  $318\mu F$

## Para a frequência de 5Hz:

As reatâncias tanto capacitiva como reativa são:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 5 \times 31,8 \times 10^{-3} \approx 1\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 5 \times 318 \times 10^{-6}} \approx 100\Omega$$

Então, temos que:

$$Z_L = 1\Omega | 90^\circ$$

$$Z_C = 100\Omega | -90^\circ$$

$$R = 10\Omega | 0^\circ$$

Podemos agora calcular as correntes em cada ramo:

$$I_R = \frac{100V | 0^\circ}{10\Omega | 0^\circ} = 10A | 0^\circ$$

$$I_C = \frac{100V | 0^\circ}{100\Omega | -90^\circ} = 1A | 90^\circ$$

$$I_L = \frac{100V | 0^\circ}{1\Omega | 90^\circ} = 100A | -90^\circ$$

Para o calculo da corrente total:

$$\begin{array}{r} 10 + j0 \\ 0 - j100 \\ 0 + j1 \\ \hline 10 - j99 \end{array}$$

$$I = 10 - j99$$

$$C = \sqrt{10^2 + 99^2} \approx 99,5$$

$$tg\theta = -\frac{99}{10} \Leftrightarrow \theta = arctg(-\frac{99}{10}) \Leftrightarrow \theta = -84,2^\circ$$

Assim temos que:

$$I = 99,5A \angle -84,2^\circ$$

Para a impedância total temos:

$$Z = \frac{100 \angle 0^\circ}{99,5 \angle -84,2^\circ} \approx 1\Omega \angle 84,2^\circ$$

Na resistência:

$$P_R = R \times (I_R)^2 = 10 \times 10^2 = 1000W$$

$$Q_R = 0VAR$$

$$S_R = 1000VA$$

Na bobine:

$$P_L = 0$$

$$Q_L = X_L \times (I_L)^2 = 1 \times 100^2 = 10000VAR$$

$$S_L = 10000VA$$

No condensador:

$$P_C = 0$$

$$Q_C = X_C \times (I_C)^2 = 100 \times 1^2 = 100VAR$$

$$S_C = 100VA$$

Potência ativa total:

$$P = P_T = P_R = 1000W$$

Potência reativa total:

$$Q = Q_T = Q_L - Q_C = 10000 - 100 = 9900VAR$$

Potência aparente total:

$$S = S_T = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1000^2 + 9900^2} \approx 9950VA$$

## Para a frequência de 50HZ

Acontece que 50Hz é a frequência de ressonância. Sabemos que em frequência de ressonância as secções onde se encontram a bobine e o condensador entram em curto-círcuito, ou seja, temos a intensidade de corrente mínima e impedância total máxima.

$$\text{Frequência de ressonância : } \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{31,8 \times 10^{-3} \times 318 \times 10^{-6}}} \approx 50Hz$$

$$Z=R=10\Omega|0^\circ$$

$$I = I_R = \frac{100V|0^\circ}{10\Omega|0^\circ} = 10A|0^\circ$$

$$P = P_R = R \times (I_R)^2 = 10 \times 10^2 = 1000W$$

$$S = S_R = 1000VA$$

## Para a frequência de 500Hz:

As reatâncias tanto capacitiva como reativa são:

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 500 \times 31,8 \times 10^{-3} \approx 100\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 500 \times 318 \times 10^{-6}} \approx 1\Omega$$

Então, temos que:

$$Z_L = 100\Omega|90^\circ$$

$$Z_C = 1\Omega|-90^\circ$$

$$R = 10\Omega|0^\circ$$

Podemos agora calcular as correntes em cada ramo:

$$I_R = \frac{100V|0^\circ}{10\Omega|0^\circ} = 10A|0^\circ$$

$$I_C = \frac{100V|0^\circ}{1\Omega|-90^\circ} = 100A|90^\circ$$

$$I_L = \frac{100V|0^\circ}{100\Omega|90^\circ} = 1A|-90^\circ$$

Para o calculo da corrente total:

$$\begin{array}{r} 10 + j0 \\ 0 - j1 \\ 0 + j100 \\ \hline 10 + j99 \end{array}$$

$$I = 10 + j99$$

$$C = \sqrt{10^2 + 99^2} \approx 99,5$$

$$tg\theta = \frac{99}{10} \Leftrightarrow \theta = arctg(\frac{99}{10}) \Leftrightarrow \theta = 84,2^\circ$$

Assim temos que:

$$I = 99,5A|84,2^\circ$$

Para a impedância total temos:

$$Z = \frac{100|0^\circ}{99,5|84,2^\circ} \approx 1\Omega|-84,2^\circ$$

Na resistência:

$$P_R = R \times (I_R)^2 = 10 \times 10^2 = 1000W$$

$$Q_R = 0VAR$$

$$S_R = 1000VA$$

Na bobine:

$$P_L = 0$$

$$Q_L = X_L \times (I_L)^2 = 100 \times 1^2 = 100VAR$$

$$S_L = 100VA$$

No condensador:

$$P_C = 0$$

$$Q_C = X_C \times (I_C)^2 = 1 \times 100^2 = 10000 \text{ VAR}$$

$$S_C = 10000 \text{ VA}$$

Potência ativa total:

$$P = P_T = P_R = 1000 \text{ W}$$

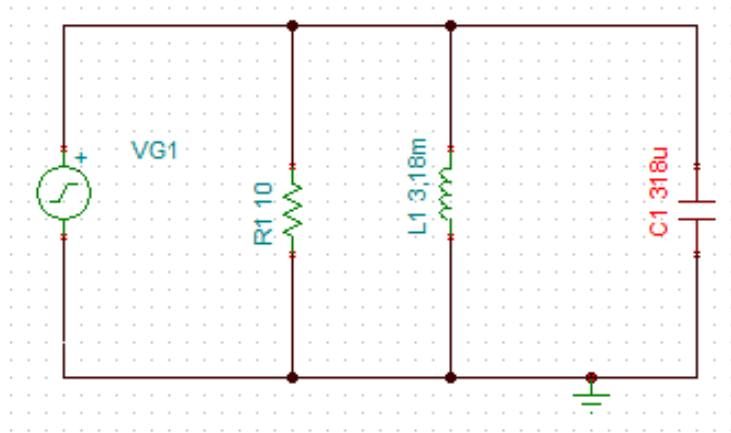
Potência reativa total:

$$Q = Q_T = Q_L - Q_C = 100 - 10000 = -9900 \text{ VAR}$$

Potência aparente total:

$$S = S_T = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1000^2 + 9900^2} \approx 9950 \text{ VA}$$

## Simulação no TINA



### Tabela final

Valores	5Hz	50Hz	500Hz
$I_R$	10A	10A	10A
$I_L$	100A	0	1A
$I_C$	1A	0	100A
$I$	99,5A	10A	99,5A
$Z_R$	10Ω	10Ω	10Ω
$Z_L$	1Ω	0	100Ω
$Z_C$	100Ω	0	1Ω
$Z$	1Ω	10Ω	1Ω
$P_R$	1kW	1kW	1kW
$Q_R$	0	0	0
$S_R$	1kVA	1kVA	1kVA
$P_L$	0	0	0
$Q_L$	10kVAR	0	100kVAR
$S_L$	10kVA	0	100VA
$P_C$	0	0	0
$Q_C$	100kVAR	0	10kVAR
$S_C$	100VA	0	10kVA
$P$	1kW	1kW	1kW
$Q$	9,9kVAR	0	-9,9kVAR
$S$	9,95kVA	1kVA	9,95kVA

# Trabalho 5: Carga e descarga de condensadores

Introdução à Física Experimental - 2017/18

Cursos: Engenharia Física e Física

Departamento de Física - Universidade do Minho

Neste trabalho laboratorial introduz-se o condensador. O objetivo é estudar associações de condensadores, a carga e descarga de um condensador e o tempo característico (ou constante de tempo) de um circuito com uma resistência e um condensador (RC) em série. Assim, pretende-se que os alunos construam circuitos com vários condensadores, em diferentes configurações de associação. Pretende-se também que se registem medidas, em função do tempo, da tensão aos terminais do condensador em várias situações de carga e de descarga.

## I. INTRODUÇÃO

### A. O que é um condensador?

Um condensador é um dispositivo elétrico que permite acumular carga elétrica a um certo potencial elétrico (e, assim, acumular energia). O condensador mais simples que se pode imaginar consiste apenas em duas placas metálicas paralelas, à distância  $d$  uma da outra, separadas por um meio dielétrico que pode ser apenas ar. Se imaginarmos que, por uma qualquer razão, uma das placas tenha mais eletrões do que a outra, então estabelece-se um campo elétrico  $E$  entre as placas, havendo então uma diferença de potencial  $V_C = Ed$  entre essas placas. Quanto maior for a diferença do número de eletrões nas duas placas maior será  $E$ , e assim, maior  $V_C$ . Diz-se neste caso que o condensador está carregado. Mas como se pode criar esta diferença de carga entre as duas placas? Se ligarmos um condensador, por hipótese inicialmente descarregado, a um circuito externo com uma fonte de tensão (ver Fig.1a), o que deverá acontecer? É importante relembrar que as placas do condensador são construídas com material condutor. Atraídos pelo terminal positivo da fonte, os eletrões livres na placa do condensador ligado a este terminal vão começar a deslocar-se em direção à fonte, deixando essa placa carregada positivamente. Isto cria um campo elétrico dentro do condensador que acaba por atrair eletrões do terminal negativo da fonte, que se alojam na segunda placa do condensador (Fig.1b). Note que, no decorrer deste processo, o número de eletrões que fluem da fonte para o condensador é igual ao número daqueles que fluem do condensador para a fonte. Ou seja, um condensador de placas paralelas (e, em geral, qualquer outro condensador) é, em qualquer instante no processo de carga, electricamente neutro: a quantidade de eletrões que se acumulam numa das placas é igual à quantidade que é removida da outra. É de esperar que o condensador na Figura 1b não carregue indefinidamente. De facto, à medida que o condensador vai carregando, a ddp aos seus terminais,  $V_C$ , também aumenta aproximando-se da ddp aos terminais da fonte de tensão,  $V$ . Quanto maior for a diferença entre  $V$  e  $V_C$ , maior é a intensidade da corrente  $I$  que carrega o condensador. Com  $V_C \rightarrow V$ , então  $I \rightarrow 0$  e o condensador deixa de carregar. Neste trabalho verificar-se-á isto mesmo.

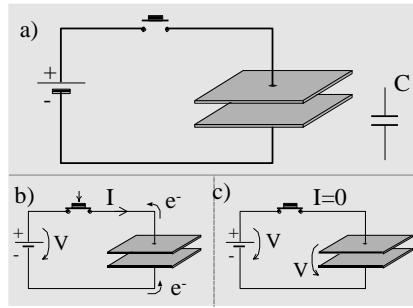


Fig. 1 a) Um condensador elementar pode ser fabricado simplesmente justapondo duas placas metálicas paralelamente uma à outra, separadas de uma determinada distância. O símbolo elétrico de um condensador, mostrado no lado direito da figura, reflete esta geometria simples; b) Ao ligar um condensador a um circuito externo com uma fonte de tensão, estabelece-se uma corrente elétrica; c) esta corrente diminui à medida que o condensador carrega e é zero logo que a diferença de potencial aos terminais da fonte seja igual à diferença de potencial entre os terminais do condensador (ver texto).

### B. Capacidade e carga armazenada

Se se esperar o tempo suficiente, um condensador ligado a uma fonte de tensão com uma ddp  $V$ , ficará com uma ddp aos seus terminais  $V_C$  igual a  $V$ . Neste caso, qual é a carga armazenada no condensador? Evidentemente, a carga armazenada no condensador deverá depender da sua capacidade ( $C$ ). Esta é medida na unidade S.I. designada por farad ([F]). A carga  $Q$ , em coulomb, acumulada num condensador de capacidade  $C$  com uma ddp  $V_C$  estabelecida entre as suas armaduras é igual a

$$Q = V_C C \quad (1)$$

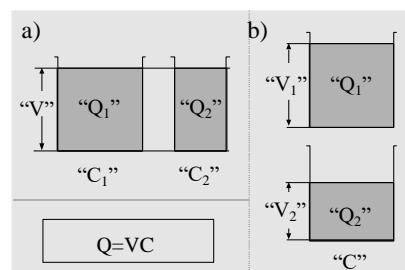


Fig. 2 – Analogia entre o condensador e o reservatório de água: a) Os dois reservatórios de água têm diferentes capacidades " $C_1$ " e " $C_2$ ". Se enchermos ambos os reservatórios com colunas de água de altura " $V$ ", é claro que o reservatório de capacidade " $C_1$ " armazenará mais água. b) Se os reservatórios forem iguais, com uma capacidade " $C$ ", e os enchermos com colunas de água de alturas diferentes " $V_1 > V_2$ ", claramente um terá mais água que o outro. Ou seja, quanto maior for " $C$ " e " $V$ ", maior será a carga de água armazenada. Num condensador, a quantidade de carga elétrica  $Q$  acumulada é, de facto, dada por  $Q = CV_C$ , onde  $C$  é a capacidade do condensador e  $V$  a ddp aos seus terminais.

### C. Associação de condensadores

Tal como com as resistências, também se podem associar condensadores em série ou em paralelo (ver Fig.3).

#### C.1. Associação de condensadores em paralelo

Numa associação em paralelo de condensadores (Fig. 3a), as ddp aos terminais de um e do outro condensador são iguais entre si e também iguais à do circuito equivalente,

$$V_T = V_1 = V_2$$

A carga total acumulada na associação é igual à soma da carga acumulada num e no outro condensador,

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

Como  $Q = CV$ , dividindo esta última expressão por  $V_T$ ,

$$C_T = C_1 + C_2 \quad (2)$$

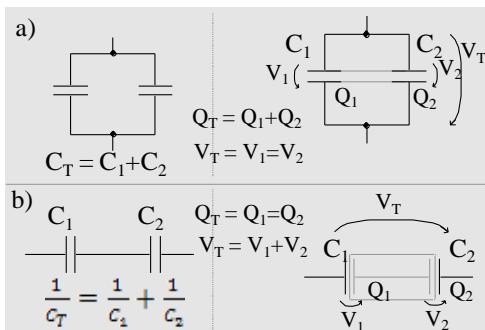


Fig. 3 - a) Esquema da associação em paralelo de condensadores. Dois condensadores em paralelo podem ser vistos como apenas um único condensador, onde a placa carregada positivamente (negativamente) estende-se pelas duas placas carregadas positivamente (negativamente) dos dois condensadores (esquema do lado direito). Assim, é claro que a carga total deve ser igual à soma das cargas parciais,  $Q_T = Q_1 + Q_2$ . Como a ddp aos terminais de cada um dos condensadores é igual e, igual à ddp aos terminais da associação, então a capacidade total desta é igual a  $C_T = C_1 + C_2$ . b) Esquema da associação em série de dois condensadores. Neste caso, a carga de um dos condensadores é transferida para o outro e a associação dos dois tem uma carga equivalente igual à carga de cada um deles. Pode-se imaginar que as placas ligadas internamente na associação se anulam (ver esquema da esquerda), pois tem exatamente a mesma carga mas de sinal oposto. No fim, apenas as placas das pontas têm real importância para a associação. Assim,  $Q_T = Q_1 = Q_2$ . Como neste caso as ddp se somam, i.e  $V_T = V_1 + V_2$ , vem que:  $1/Q_T = 1/Q_1 + 1/Q_2$ .

#### C.2. Associação de condensadores em série

Numa associação em série (Fig.3b), a ddp aos terminais da associação é igual à soma das ddp aos terminais de cada um dos condensadores,

$$V_T = V_1 + V_2 \quad (3)$$

A carga acumulada na associação é igual à carga acumulada num e no outro condensador (Fig.3b),

$$Q_T = Q_1 = Q_2.$$

Neste caso, dividindo a eq.3 por  $Q_T$ , obtém-se

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (4)$$

### D. Carga e descarga de um condensador

A expressão que descreve a variação da carga num condensador ao longo do tempo é a solução de uma equação de taxa, uma equação diferencial linear de primeira ordem.

#### D.1. Equação de taxa para a carga de um condensador num circuito RC

Considere o circuito esquematizado na Fig. 4a. Considere que o condensador está inicialmente descarregado, i.e.,  $Q(t=0s) = 0$ . Neste circuito, a intensidade da corrente que carrega o condensador é igual à variação da quantidade de carga que é armazenada no condensador por intervalo de tempo, que é a habitual definição de  $I$ :

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (5)$$

onde  $Q(t)$  é a carga acumulada no instante  $t$  no condensador. Por outro lado, temos que:

$$V_C(t) = \frac{Q(t)}{C} \quad (6)$$

Escrevendo a lei das malhas para o circuito da Figura 4a, chega-se à equação

$$\frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{RC} = \frac{V}{R} \quad (7)$$

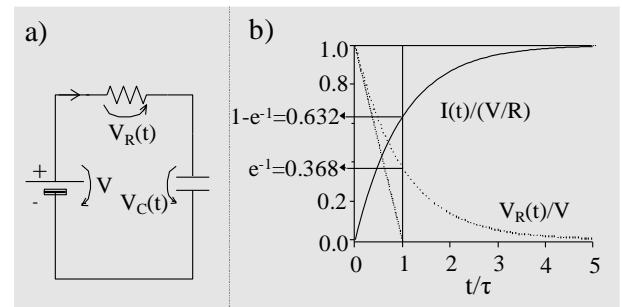


Fig. 4 - a) Circuito RC com uma fonte de tensão; b) Curvas de carga do condensador onde o eixo do tempo é medido em unidades de  $\tau$ . A curva a cheio representa a ddp aos terminais do condensador, e a curva a tracejado corresponde à intensidade da corrente ou à ddp aos terminais da resistência.

Toda a informação que se pode obter sobre o funcionamento deste circuito está incluída nesta equação e na condição inicial, dada atrás,  $Q(t=0s) = 0$ . Há duas conclusões que se podem retirar imediatamente, mesmo sem resolver a equação:

- no regime estacionário, i.e. quanto  $t \rightarrow \infty$ ,  $dQ/dt=0$  e então  $Q(t=\infty) = CV$ , que é o valor assimptótico para o qual tende a curva de carga;
- como inicialmente  $Q = 0$ , então em  $t = 0$  s,  $dQ(t)/dt = V/R$ , e então  $I(t=0\text{ s}) = V/R$
- o condensador, quando completamente descarregado, comporta-se como um condutor perfeito.

## D.2. Expressão para a carga; tempo característico RC

Para se obter o comportamento transitório da carga do condensador é necessário resolver a Eq.7. A solução para esta equação é (pode ser verificado usando a substituição direta);

$$Q(t) = VC[1 - e^{-t/\tau}] \quad (8)$$

onde  $\tau = RC$ , é uma constante comumente designada por tempo característico  $RC$  ou contante de tempo do circuito  $RC$ . Repare que  $\tau$  tem dimensão física de tempo: um ohm vezes um farad é um segundo. Derivando a expressão na Eq. 8, obtém-se a corrente de carga,

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{V}{R} e^{-t/\tau} \quad (9)$$

Na Figura 4b, o gráfico mostra curvas de carga de um circuito RC. A curva a cheio representa a ddp aos terminais do condensador (proporcional à carga acumulada no condensador) e a curva a tracejado, a corrente de carga (que é proporcional à ddp aos terminais da resistência). Destas curvas de crescimento ou decrescimento exponencial, pode-se extrair o valor de  $\tau$ : numa curva de carga, a ddp aos terminais do condensador aumenta de zero até  $1 - 1/e \approx 63\%$  do valor máximo num intervalo de tempo igual a  $\tau$ ; na curva da intensidade de corrente, um decréscimo exponencial,  $I(t)$  cai do máximo em  $t = 0$  s para  $1/e \approx 0.37\%$  desse valor em  $t = \tau$ .

Um método alternativo para determinar  $\tau$  é traçar a reta tangente às curvas em  $t=0$  s e determinar a sua intersecção com o eixo dos  $xx$ , na curva decrescente (Fig.4b), ou com a assimptota, na curva com um crescimento exponencial.

## D.3. Descarga de um circuito RC

Finalmente, falta apenas descrever a descarga de um condensador sobre uma resistência. O circuito correspondente está esquematizado na Fig. 5a. A lei das malhas para este circuito é:

$$RI(t) = \frac{Q(t)}{C}$$

Neste caso, a intensidade de corrente elétrica promove a descarga do condensador e é, então, igual a:

$$I(t) = -\frac{dQ(t)}{dt}$$

Se combinarmos as duas últimas expressões chega-se à equação de taxa de crescimento:

$$\frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{\tau} = 0 \quad (10)$$

A solução para esta equação é apenas

$$Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau} \quad (11)$$

onde  $Q_0$  é a carga inicial armazenada no condensador. A intensidade de corrente,  $I(t) = dQ(t)/dt$  é neste caso igual a

$$I(t) = \frac{Q_0}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (12)$$

As representações gráficas de  $V_C(t) = Q(t)/C$  e de  $I(t)$  são mostradas na Figura 5b.

Finalmente, note que na descarga do condensador no circuito RC um gráfico de  $\ln(V_C)$  em função do tempo é uma recta cujo

declive é igual ao inverso da constante de tempo.

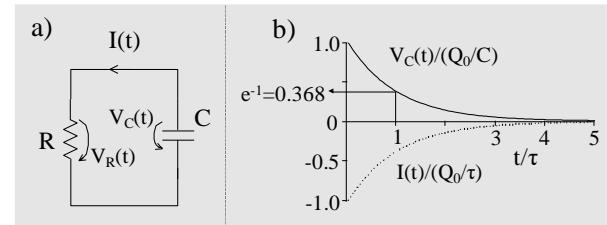


Fig.5 - a) descarga de um condensador através de um circuito RC simples; b) curvas de descarga de um circuito RC com o eixo do tempo medido em unidades de  $\tau$ . A curva a cheio é a ddp aos terminais do condensador e a curva a tracejado corresponde à intensidade da corrente.

## II. TRABALHO LABORATORIAL

### A. Material necessário

O equipamento necessário para este trabalho laboratorial é o seguinte:

- uma fonte de tensão contínua
- dois multímetros
- fios de ligação com banana
- módulo de montagem contendo dois condensadores e duas resistências (note que a resistência  $R_A$  está ligada em série com o condensador  $C_2$ ), um comutador que permite ligar electricamente o ponto  $O$  ao ponto  $X$  ou ao ponto  $Y$  e um LED ligado a um botão que, quando pressionado, fecha o circuito.

### B. Procedimento Experimental

#### 1. Parte 1: Associação de condensadores

Estabeleça a sequência de montagens apresentada nas figuras seguintes e anote os resultados. Seja cuidadoso: o resultado da experiência depende da correta execução de todos os pormenores. Nas medidas de tempo use o cronómetro do telemóvel. Deve compreender o objetivo de cada um dos passos e saber interpretar os resultados; em particular deve saber explicar:

- qualitativamente as diferenças de tempos medidas nos passos 7, 8, 11 e 13 da experiência 1;

- quantitativamente os valores de tensão medidos nos passos 5 e 9 da experiência 2.

Seguidamente apresentam-se alguns cuidados a ter para garantir uma boa realização da experiência.

Cuidados a ter:

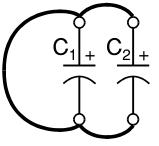
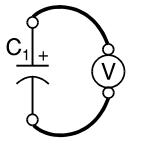
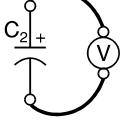
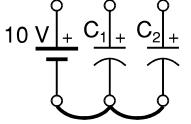
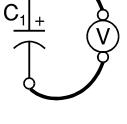
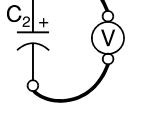
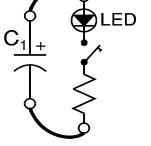
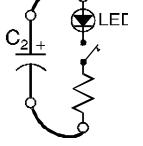
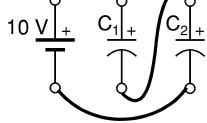
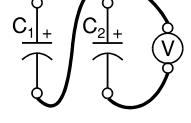
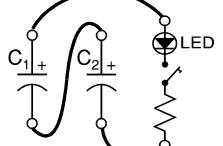
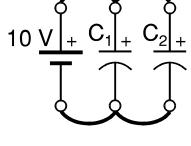
- Ao fazer as ligações tenha em consideração que os condensadores usados nesta experiência têm polaridade. Por exemplo, quando ligar o condensador à fonte para o carregar, deve ligar entre si os terminais da fonte e do condensador que tenham mesma cor: preto com preto e vermelho com vermelho.

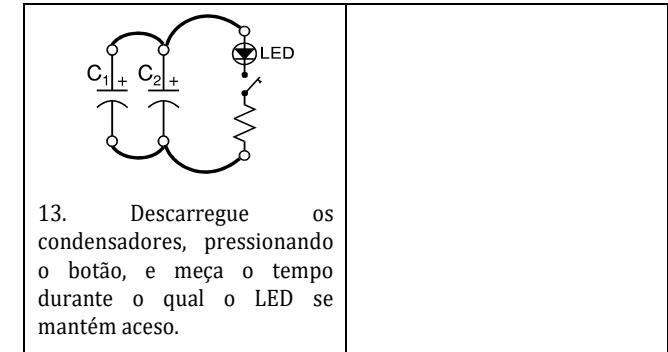
- Terminada a carga do condensador, a primeira coisa a fazer (antes mesmo de desligar a fonte), é desligar os cabos com cuidado de modo a garantir que os seus dois terminais não contactem entre si e assim, inadvertidamente, provoquem a descarga do condensador.

- Sempre que se realiza uma medida da tensão aos terminais do condensador com o voltímetro, o condensador descarrega-se através do aparelho de medida. Por isso, estas medidas devem ser feitas de forma muito rápida: basta fechar o circuito de medida (encostando o fio de ligação a um dos terminais) durante a pequena fração de tempo que permite a leitura do valor apresentado no voltímetro.

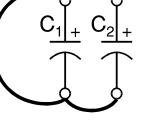
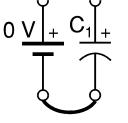
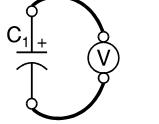
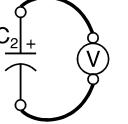
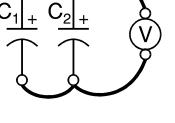
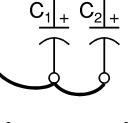
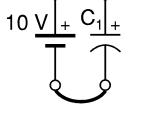
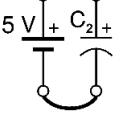
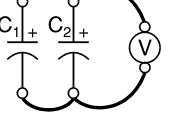
- Sempre que suspeitar que as medidas possam estar afetadas de um erro decorrente da descarga total ou parcial do condensador, deve repetir o procedimento de carga do condensador antes de tornar a fazer a medida.

### Experiência 1: Estudo qualitativo do tempo de descarga em circuitos RC e associação de condensadores

	
1. Espere alguns segundos para garantir que os condensadores ficam descarregados	2. Confirme que a tensão é praticamente nula.
	
3. Confirme que a tensão é praticamente nula..	4. Espere alguns segundos.
	
5. Qual o valor da tensão?	6. Qual o valor da tensão?
	
7. Descarregue o condensador, pressionando o botão, e meça o tempo durante o qual o LED se mantém aceso.	8. Descarregue o condensador, pressionando o botão, e meça o tempo durante o qual o LED se mantém aceso.
	
9. Espere alguns segundos.	10. Qual o valor da tensão?
	
11. Descarregue os condensadores, pressionando o botão, e meça o tempo durante o qual o LED se mantém aceso.	12. Espere alguns segundos



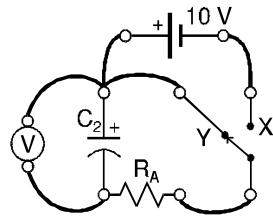
### Experiência 2: Relação entre as tensões aos terminais de dois condensadores separados e a tensão aos terminais dos mesmos condensadores depois de associados em paralelo

	
1. Espere alguns segundos para garantir que os condensadores ficam descarregados	2. Espere alguns segundos.
	
3. Qual o valor da tensão?	4. Qual o valor da tensão?
	
5. Qual o valor da tensão?	6. Espere alguns segundos para garantir que os condensadores ficam descarregados
	
7. Espere alguns segundos.	8. Espere alguns segundos.
	
9. Qual o valor da tensão?	

## 2. Parte 2: Carga e descarga de condensadores; constante de tempo do circuito RC

Pode utilizar a folha de registo de dados que se apresenta no final deste guia. No final da experiência deve representar graficamente a tensão aos terminais do condensador ( $V_C$ ) em função do tempo para as três situações estudadas. Utilize o processo de descarga para determinar a constante de tempo de cada circuito (note que o gráfico de  $\ln(V_C)$  em função do tempo deve ser linear) e compare com os valores esperados.

- Monte o circuito esquematizado na figura seguinte: coloque o comutador na posição  $Y$ , regule a fonte de tensão para 10V e certifique-se que o condensador  $C_2$  está descarregado.



- Use o cronómetro do telemóvel. No instante  $t = 0\text{ s}$  mude o comutador para a posição  $X$ . De cinco em cinco segundos tome nota da tensão lida no multímetro. No instante  $t = 60\text{ s}$  mude novamente o comutador para a posição  $Y$  e continue a ler a tensão até  $t = 120\text{ s}$ .

- Repita o procedimento anterior usando a resistência  $R_B$  no lugar de  $R_A$ .

- Repita o procedimento anterior usando  $C_1$  no lugar de  $C_2$ .

## Registo de dados da carga e descarga no circuito RC

$R_A = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $R_B = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $C_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $C_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

$t(s)$	$V_{C(0)}(C_2; R_A)$	$V_{C(0)}(C_2; R_B)$	$V_{C(0)}(C_1; R_B)$	Notas
0				Comutar para $X$
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				Comutar para $Y$
65				
70				
75				
80				
85				
90				
95				
100				
105				
110				
115				
120				

# **Plano de características de alto nível da aplicação SafeGuard (HPF)**

Henrique Lopes UP202308657

José Magalhães UP201809097

Junho 2024

## **Funcionalidade 1: Integração de dados do sensor**

A integração de dados de vários sensores, tais como sismógrafos, radares meteorológicos e estações de monitorização oceânica, tem como objetivo fornecer uma base de dados robusta e precisa para a previsão de desastres naturais.

Objectivos futuros:

- Implementar a integração de múltiplos tipos de sensores.
- Desenvolver um painel de visualização interativo.
- Realizar testes de integração e recolher feedback dos utilizadores.

## **Funcionalidade 2: Aprendizagem automática para previsão**

Uso de algoritmos de aprendizado de máquina para analisar dados de sensores e identificar padrões que precedem diferentes tipos de desastres naturais.

Objectivos futuros:

- Desenvolver modelos de aprendizagem automática utilizando dados históricos.
- Testar a precisão dos modelos.
- Incorporar o feedback dos utilizadores sobre as previsões.

## **Funcionalidade 3: Sistema de alerta e notificação**

Emissão de alertas automáticos às autoridades e à população quando é detetado um risco de desastre natural.

Objectivos futuros:

- Desenvolver um sistema de alerta multiplataforma (SMS, correio eletrónico, notificações push).
- Testar a eficácia dos alertas em diferentes cenários.
- Personalizar as opções de alerta de acordo com o feedback dos utilizadores.

## **Funcionalidade 4: Plataforma de informação e preparação**

Disponibilização de informação sobre medidas de segurança e procedimentos de evacuação, acessível a partir da plataforma.

Objectivos futuros:

- Desenvolver uma base de dados de informação de segurança.
- Testar o acesso e a atualização da informação.
- Adicionar recursos educativos com base no feedback dos utilizadores.

## **Funcionalidade 5: Monitorização e avaliação pós-desastre**

Monitorização da situação após a ocorrência de uma catástrofe natural, com actualizações sobre os danos e as operações de resposta em curso.

Objectivos futuros:

- Implementar um sistema contínuo de monitorização pós-desastre.
- Testar a precisão e as actualizações das informações fornecidas.
- Adicionar ferramentas para avaliar os danos e as operações de resposta de acordo com o feedback dos utilizadores.

## **Funcionalidade 6: Simulações e formação**

Oferecer simulações interactivas e formação para a preparação e resposta a catástrofes naturais.

Objectivos futuros: - Desenvolver módulos de simulação interactiva.

- Implementar formação baseada em cenários reais.

- Recolher feedback dos utilizadores para melhorar a experiência de aprendizagem.

Estas seis funcionalidades foram concebidas para proporcionar uma experiência abrangente e intuitiva, utilizando diferentes tipos de suportes para facilitar a visualização e a compreensão dos processos envolvidos. Cada funcionalidade é essencial para garantir a eficácia da aplicação SafeGuard na previsão, alerta, preparação, resposta e recuperação de desastres naturais.

## **Testes de Sistema:**

- Avaliação da integração com outros sistemas de emergência e fontes de dados externas.

- Testes de usabilidade da interface de usuário e recursos educacionais para diferentes públicos-alvo.

## **Avaliação de Campo:**

- Treinamentos e simulações com equipes de resposta de emergência para avaliar fluxos de trabalho.

- Pesquisas com moradores locais sobre a experiência de uso e utilidade percebida dos recursos.

## **Feedback dos Usuários:**

As simulações foram elogiadas como ferramentas educacionais valiosas para aumentar a conscientização.

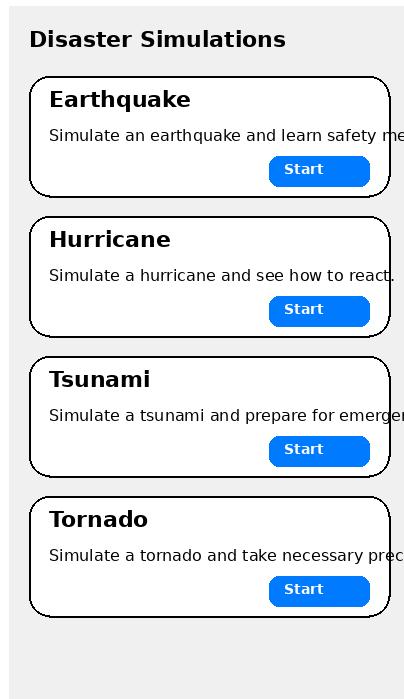
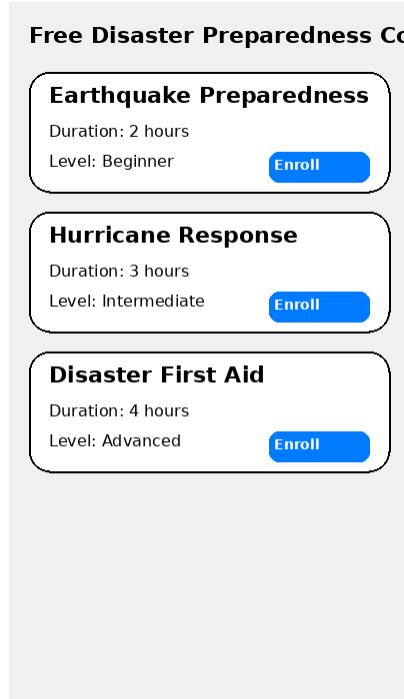
- Alguns usuários relataram dificuldades iniciais em navegar pela interface, mas a experiência melhorou após treinamento.
- Houve demanda por mais recursos personalizados por região e integração com sistemas existentes.

## **Análise Geral:**

O sistema SafeGuard demonstrou um bom desempenho geral nos testes e na avaliação inicial. Algumas áreas para melhoria foram identificadas, como refinamento dos modelos de previsão, escalabilidade aprimorada e maior personalização regional. Recomenda-se prosseguir com uma implementação mais ampla e coleta contínua de feedback do usuário para impulsionar melhorias futuras.

# Nota Importante

As imagens que se referem à Tela de Simulações de Desastres e à Tela de Cursos e Formações (mockup7.png e mockup8.png) ainda estão em estado de MockUp , ou seja, ainda não foram implementadas na aplicação (App).



# Trabalho 4: Leis de Kirchhoff; associação de resistências.

Introdução à Física Experimental - 2017/18

Cursos: Engenharia Física e Física

Departamento de Física - Universidade do Minho

Este trabalho laboratorial tem por objectivo confirmar experimentalmente a validade das Leis de Kirchhoff num circuito de três resistências com duas malhas. Dá-se ênfase, do ponto de vista da análise de resultados, à comparação de valores numéricos obtidos experimentalmente e calculados algebricamente. Introduz-se o diodo emissor de luz (LED) e faz-se uso deste dispositivo como uma ddp fixa e independente da corrente. Um objectivo complementar é a observação por parte dos alunos do comportamento não ohmico de uma junção p-n, e da medida da respectiva tensão de polarização.

## Leituras

Ao longo deste guia far-se-á referência a alguns textos das seguintes referências:

- §28.2 3 §28.3 do *Serway* (1)
- Leitura 4 do *Física Experimental* (2)
- Capítulo 2 do *Taylor* (3)

## Objectivo deste trabalho laboratorial:

- verificar experimentalmente as Leis de Kirchhoff em circuitos com resistências
- verificar experimentalmente as Leis de Kirchhoff num circuito que inclui um diodo polarizado directamente.
- medir a tensão de polarização de um diodo
- verificar a não condução do diodo quando polarizado inversamente.

## Registo de resultados

No final deste trabalho laboratorial, deverão ser registados os seguintes dados:

- três conjuntos de 4 valores de ddp (na fonte e aos terminais de três resistências) e 3 valores de corrente (em três resistências), para três experiências diferentes.
- $V_0$ , a tensão de polarização de um diodo emissor de luz (LED)

## I. INTRODUÇÃO

### A. Associação de resistências

Recomenda-se a leitura atenta da Secção §28.2 do Serway. Aqui apenas resumimos os resultados.

#### Associação de resistências em série

Se montarmos  $N$  resistências tal como se esquematiza na parte superior da Figura 1, onde uma dada resistência  $R_{i-1}$  é ligada, por um dos seus terminais, a apenas uma outra resistência  $R_i$  com esta, por sua vez, ligada a uma outra resistência  $R_{i+1}$  e assim sucessivamente, dizemos ter uma associação em série de resistências.

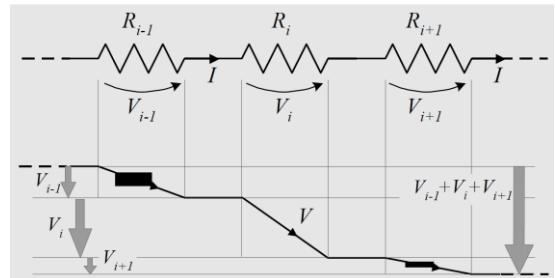


Figura 1 - Associação em série de resistências (em cima): a intensidade da corrente é a mesma em qualquer uma das resistências; no diagrama de potencial (em baixo), põe-se em evidência que a queda de potencial que resulta da associação de resistências em série é igual à soma das quedas de potencial em cada uma delas individualmente.

Numa associação em série de resistências, a corrente que passa em qualquer uma das resistências é a mesma<sup>1</sup>:

$$I = \dots = I_{i-1} = I_i = I_{i+1} = \dots \quad (1)$$

Contrariamente à intensidade da corrente, a ddp aos terminais das várias resistências é diferente: o potencial elétrico que cai aos terminais de uma resistência depende do seu valor óhmico. A soma de todas as quedas de potencial nas sucessivas resistências é igual à ddp total entre as duas extremidades da associação (tal como se indica no diagrama na parte inferior da Figura 1.). Ou seja, num circuito série de resistências, as quedas de potencial somam-se:

$$V_T = \dots + V_{i-1} + V_i + V_{i+1} + \dots \quad (2)$$

Dividindo os termos desta expressão pela intensidade de corrente elétrica e usando a lei de Ohm, chega-se facilmente ao

<sup>1</sup> Trata-se de aplicar o princípio de conservação da carga elétrica. Não existe qualquer evidência experimental que mostre que a carga elétrica não é conservada. De facto, é a conservação da carga que garante a estabilidade do mundo físico, que depende do equilíbrio electrostático entre cargas positivas e negativas. Assim, se não se perdem nem se ganham electrões em parte alguma de um circuito de resistências em série, a quantidade de carga que

passa por unidade de tempo, ou seja, a intensidade da corrente elétrica, deve ser sempre a mesma em qualquer ponto desse circuito. Vale a pena chamar a atenção que o efeito da resistência é fazer diminuir a intensidade da corrente em todo o ramo de circuito onde essa resistência está incluída e não apenas na parte depois dela!

resultado, para  $N$  resistências:

$$R_T = \sum_{i=1}^N R_i \quad (\text{associação em série}), \quad (3)$$

ou seja:

O valor ohmico total de uma associação série de resistências é igual à soma dos valores de cada uma delas

### Associação de resistências em paralelo

Se montarmos  $N$  resistências tal como se indica no lado esquerdo da Figura 2, unindo uma das extremidades das  $N$  resistências num nó e a outra num outro nó, temos um circuito de resistências *associadas em paralelo*.

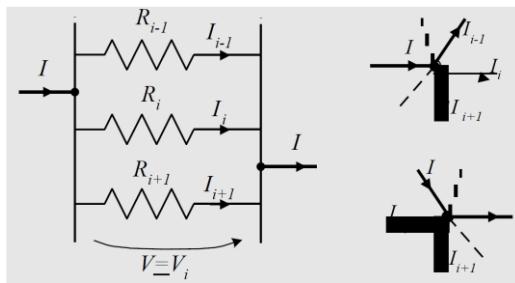


Figura 2 - Numa associação em paralelo de resistências, a ddp aos terminais das resistências é igual em todas as resistências e igual à ddp entre os dois nós da associação. A intensidade de corrente que entra num nó é igual à soma das intensidades de corrente que saem (esquema do lado direito).

Neste caso, como todas as resistências têm as suas extremidades ligadas a um mesmo ponto, a ddp aos terminais de uma qualquer resistência é igual à ddp aos terminais de qualquer outra e igual a  $V_T$ , a ddp entre os dois nós, i.e.,

$$V_T = \dots = V_{i-1} = V_i = V_{i+1} = \dots \quad (4)$$

Por outro lado, como se ilustra no esquema no lado direito da Figura 2, a soma das correntes que saem (entram) num nó é igual à intensidade total da corrente que chega (parte) desse nó. Ou seja

$$I = \dots + I_{i-1} + I_i + I_{i+1} + \dots \quad (5)$$

Se dividirmos esta expressão por  $V_T$  e usarmos a lei de Ohm, vemos que

$$\frac{1}{R_T} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} \quad (\text{associação em paralelo}). \quad (6)$$

Ou seja:

O inverso do valor ohmico de uma associação de resistências em paralelo é igual à soma dos inversos dos valores de cada uma das resistências.

No caso simples (mas muito frequente) em que se tem apenas duas resistências em paralelo, a equação 6 simplifica-se para<sup>2</sup>

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (7)$$

### Simplificação de circuitos com resistências usando as expressões para a associação em série e em paralelo

Se quisermos saber qual é a intensidade de corrente total que percorre um determinado circuito de resistências ligado a uma fonte de tensão com uma determinada ddp, podemos usar a lei de Ohm; mas, primeiro, é necessário calcular  $R_T$ , a resistência total do circuito. Para se calcular  $R_T$  de um circuito com várias resistências (associadas em várias configurações diferentes) deve-se começar sempre por substituir as associações série ou paralelo elementares do circuito por resistências equivalentes. Tomemos como exemplo o esquema da Figura 3: um circuito com duas resistências em paralelo ( $R_2$  e  $R_3$ ) em série com uma terceira ( $R_1$ ).

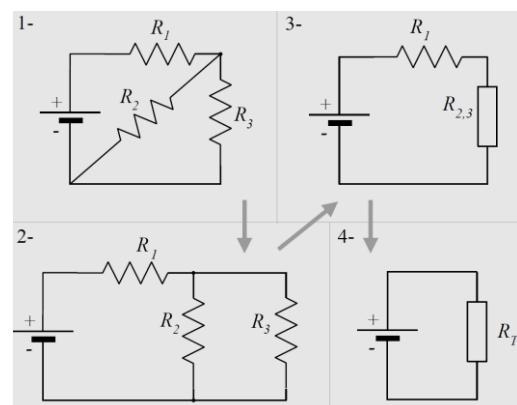


Figura 3 - Exemplo do modo de proceder para simplificar em passos sucessivos um circuito com várias resistências. Num primeiro passo, havendo necessidade disso, deve-se redesenhar o circuito numa forma equivalente que evidencie as associações série e paralelo (no esquema, este é o passo 1 → 2). Neste caso concreto, é fácil ver que se trata de um circuito com duas resistências em paralelo, em série com uma terceira. No segundo passo e demais passos subsequentes, deve-se substituir todos os conjuntos de resistências associadas em série ou em paralelo por uma resistência equivalente. O processo acaba quando se consegue obter apenas uma resistência equivalente para todo o circuito,  $R_T$ , a resistência total do circuito.

Aqui, o procedimento a seguir para simplificar o circuito é começar por substituir as resistências associadas em paralelo por uma resistência equivalente,  $R_{2,3}$ . O circuito resultante fica reduzido a apenas um circuito série de duas resistências,  $R_1$  e  $R_{2,3}$ . Num passo seguinte, substitui-se esta associação em série de resistências por uma outra resistência equivalente que, neste caso simples, é já a resistência total do circuito,  $R_T$ .

Algebricamente, este procedimento traduz-se da seguinte forma: primeiro calcula-se a resistência equivalente do paralelo de  $R_2$  com  $R_3$

$$R_{2,3} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3},$$

e, depois, a resistência equivalente da série  $R_1$  e  $R_{2,3}$ :

$$R_T = R_1 + R_{2,3}$$

<sup>2</sup> Note que a dimensão física do termo do lado direito desta expressão é,

obviamente,  $[\Omega]$ . Esta verificação pode evitar escrevermos mal esta expressão com o produto em vez da soma em denominador.

Ou seja:

$$R_T = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

## B. Leis de Kirchhoff

(Para completar a leitura desta secção, recomenda-se a leitura da secção §28.3 do *Serway*.)

As Leis de Kirchhoff sistematizam as regras usadas na secção anterior que, juntamente com a lei de Ohm, permitiram deduzir as expressões para as associações de resistências. Estas regras, que podemos aceitar resultarem de apenas bom senso, foram as seguintes: i) a intensidade da corrente que passa num circuito série de resistências é igual em todas as resistências. Estas regras, que podemos aceitar resultarem de apenas bom senso, foram as seguintes: i) a intensidade da corrente que passa num circuito série de resistências é igual em todas as resistências; ii) a soma das intensidades de corrente que saem dum (entram num) nó é igual à intensidade de corrente que entra nesse (sai desse) nó; iii) a ddp aos terminais de varias resistências em paralelo é a mesma em qualquer uma delas e, finalmente; iv) a queda de potencial total numa associação em série é igual à soma das várias quedas de potencial individuais.

No essencial, estas regras são (estão contidas) no enunciado das Leis de Kirchhoff:

- Lei dos nós:

A soma das intensidades das correntes que entram num nó é igual à soma das intensidades das correntes que saem desse nó:

$$\sum I_{\text{entrar}} = \sum I_{\text{sair}}$$

- Lei das malhas:

A soma algébrica das ddp ( $V$ ) numa malha (fechada) de um dado circuito é igual zero:

$$\sum_{\text{malha}} V_i = 0$$

Pode-se provar formalmente estes dois enunciados usando leis mais gerais da Electrodinâmica<sup>3</sup>: não resultam, portanto, de apenas bom senso!

### O que é uma malha fechada?

Uma malha fechada é uma parte do circuito, constituída por componentes dispostos num percurso fechado. Um exemplo de uma malha está representado no lado direito da Figura 4.

Para analisar uma malha temos que convencionar um sentido (o dos ponteiros do relógio ou o sentido contrário), ao longo do qual se vão somar as várias quedas de potencial. Com o sentido da malha escolhido, as quedas de potencial podem ser positivas ou negativas dependendo do sentido no qual o potencial cai em relação ao sentido da malha (ver Figura 4).

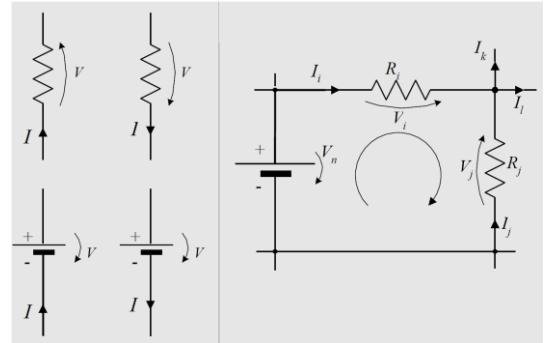


Figura 4 - No lado esquerdo da figura esquematiza-se como indicar as quedas de potencial em resistências e fontes de tensão: nas resistências as quedas de potencial são sempre no sentido da corrente elétrica; nas fontes de tensão, são sempre e independentemente do sentido da corrente, do maior para o menor potencial. Lado direito: exemplo de uma malha onde se escolheram os sentidos das correntes  $I_i$ ,  $I_j$ ,  $I_k$  e  $I_l$ . Para o sentido de análise da malha arbitrou-se o sentido dos ponteiros do relógio (ver texto).

Evidentemente que o sentido de uma queda de potencial é sempre do maior para o menor potencial. Numa resistência o sentido da queda de potencial é no mesmo sentido da da corrente; numa fonte de tensão, o sentido da queda de potencial é independente da corrente e é sempre do terminal positivo para o negativo<sup>4</sup>.

### Escolher o sentido das correntes na malha

No caso geral, o sentido da corrente em cada um dos componentes de uma malha é, inicialmente, desconhecido. Por outro lado, é esse sentido que determina como cai o potencial nas resistências, sendo esta uma informação necessária para se poder usar a lei das malhas. Este aparente problema é resolvido, escolhendo arbitrariamente um sentido para a corrente em cada um dos ramos da malha.

Se se escolher o sentido no qual a corrente realmente flui, depois de feitas as contas, obteremos um valor positivo para o valor calculado para a intensidade dessa corrente; escolhendo o outro sentido para a corrente resultaria num valor calculado negativo: nesta altura, sabemos que escolhemos mal o sentido da corrente e então, teremos que trocar o sentido da seta da corrente correspondente no esquema e tomar para a sua intensidade o módulo do valor calculado.

No exemplo da malha que se mostra na Figura 4 convencionou-se o sentido da malha no sentido dos ponteiros de um relógio. Escolheram-se também os sentidos das correntes nas resistências tal como se mostra na Figura. Para este caso, a lei das malhas escreve-se como

$$-\Delta V_n + R_i I_i - R_j I_j = 0$$

Há dois componentes, a fonte de tensão e a resistência  $R_i$ , que têm uma queda de tensão ao contrário do sentido convencionado para a malha. Isto faz com que na Equação 8, os respectivos termos venham afectados de um sinal negativo. No terceiro componente, a resistência  $R_j$ , a queda de potencial é no sentido da malha e, logo, é um termo aditivo na Equação 8.

Note que, se se considerasse esta malha separadamente (com

<sup>3</sup> Essencialmente, a lei dos nós resulta da conservação da carga discutida na nota de rodapé 1 e, a lei das malhas reflecte a conservação da energia, i.e., que o trabalho realizado pelo conjunto das fontes de tensão deve ser igual à energia dissipada nas várias resistências

<sup>4</sup> De facto, numa fonte real, existe sempre uma resistência interna na qual o potencial cai, também, no sentido da corrente. Para sermos mais exactos, deveríamos falar sempre de fonte de força eletromotriz em vez de fonte de tensão.

$I_k = I_l = 0$ ), o valor calculado para a corrente  $I_j$  seria negativo (e igual, em módulo, a  $I_j$ ). No entanto, se esta malha é apenas uma parte de um circuito maior com outras malhas, tanto  $I_i$  como  $I_j$  podem ser valores calculados positivos ou negativos. O que se pode dizer, apenas, é que, para os sentidos das correntes escolhidos,

$$I_i + I_j = I_k + I_l$$

Esta expressão não é mais do que a lei dos nós aplicada ao nó no canto superior direito do circuito.

*Quantas malhas e quantos nós independentes existem num circuito?*

Num circuito qualquer com  $N$  nós e  $M$  malhas, nem todas as  $N+M$  equações que resultam das Leis de Kirchhoff são linearmente independentes, i.e., algumas equações resultam de uma combinação das outras. Por outro lado, num circuito que inclua apenas fontes de tensão<sup>57</sup>, o número de incógnitas pode ser contado como o número de intensidades de corrente desconhecidas. Claro que, sabendo a intensidade de corrente numa determinada resistência, pode-se também calcular a respectiva queda de potencial. Assim, se  $n$  for o número de correntes desconhecidas,  $n$  deve ser o número de equações a considerar!

Outra forma de contar o número de equações linearmente independentes, válida para qualquer tipo de circuito, é usando a regra seguinte:

- escrever  $N-1$  equações para a lei dos nós, sendo  $N$  o número total de nós;
- escrever tantas equações para a lei das malhas quantas malhas não sobrepostas houver no circuito.

Nos exemplos dos circuitos mostrados na Figura 5, há 3 correntes desconhecidas, logo teremos que considerar 3 equações. Nestes exemplos os circuitos têm dois nós e duas malhas. Usando a regra enunciada em cima, vemos que precisamos escrever:

- uma equação da lei dos nós para apenas um dos nós do circuito; a expressão para lei dos nós para o outro nó é linearmente dependente desta (aqui, é mesmo igual!)
- duas equações que resultam da lei das malhas para duas das três malhas do circuito; a terceira malha é linearmente dependente das outras duas.

Assim, para o circuito a) da Figura 5, o sistema de três equações que resultam das Leis de Kirchhoff, pode ser escrito, por exemplo, como:

$$\begin{cases} 0 = -V + R_1 I_{1,2} + R_2 I_{1,2} \\ 0 = -V + R_3 I_3 \\ I = I_{1,2} + I_3 \end{cases}$$

Finalmente, para o circuito b) da Figura 5, podia-se escrever, por exemplo, o sistema de equações

$$\begin{cases} 0 = -V + R_1 I_1 + R_2 I_2 \\ 0 = -R_2 I_2 + R_3 I_3 \\ I_1 = I_2 + I_3 \end{cases}$$

Mais à frente, no desenvolvimento do *modelo teórico* para a análise de resultados, será necessário resolver um destes sistemas de equações ou, alternativamente, usar a simplificação de circuitos descrita na Secção I.A, para se calcularem as correntes e as ddp nos circuitos montados.

## II. TRABALHO LABORATORIAL

### A. Material necessário

O equipamento necessário para este trabalho laboratorial é o listado a seguir:

- uma fonte de tensão contínua
- dois multímetros
- placa de furos
- fios de ligação com banana (5 unifilares)
- fios unifilares simples
- três resistências de  $330\ \Omega$ ,  $470\ \Omega$  e  $1.2\ k\Omega$ .
- um diodo emissor de luz (LED: acrônimo inglês de Light Emitting Diode )

O diodo emissor de luz é descrito de forma breve no Apêndice A. Informação mais detalhada sobre este dispositivo pode ser encontrada na Secção Díodo na Leitura 4 do livro *Física Experimental* (ref. 2) ou na *Wikipedia* (ref. 4).

### B. Procedimento Experimental

Consulte o professor após efectuadas cada uma das etapas propostas para este trabalho. Desligue sempre a fonte de tensão antes de desmontar um circuito. Sempre que tiver dúvidas sobre o bom funcionamento do circuito que montou, consulte o professor antes de ligar a fonte. Se precisar de ligar ou desligar a fonte, reduza primeiro até zero a tensão aos seus terminais. Quando ligar a fonte pela primeira vez, certifique-se que esta tem a regulação de tensão e de controle de corrente no mínimo. Depois, aumente gradualmente a tensão até ao valor máximo que se pretenda (neste trabalho,  $\approx 10\ V$ ), rectificando sempre o controle de limite de corrente a fim de manter a fonte em controlo de tensão. Note que este procedimento só funciona se a fonte puder debitár alguma corrente, ou seja, deverá ter uma carga aos seus terminais. Evite aumentar em demasia o limite de corrente, mantendo-o sempre no mínimo indispensável ao bom funcionamento do circuito: evitará prejuízos maiores caso aconteça um curto-circuito. Registe convenientemente todas as observações experimentais, valores medidos e cálculos efectuados. Antes de começar o trabalho, verifique com o ohmímetro ou o *buzzer* se todos os fios a utilizar se encontram em bom estado e fazem bom contacto.

### 1. PARTE 1

Na primeira parte do trabalho pretende-se verificar experimentalmente as leis de Kirchhoff num circuito constituído

<sup>57</sup> Note-se que isto não é verdade se existirem no circuito fontes de corrente.

por três resistências de carbono, montadas em duas malhas independentes. Para isso será necessário medir as ddp e as intensidades das correntes em todos os componentes. A questão à qual queremos responder em cada um dos casos estudados é: são os valores medidos consistentes com os valores calculados tendo em consideração (claro!) as respetivas margens de erro?

### Experiência 1

1. Comece por medir o valor ohmico das três resistências que vai usar. Não se esqueça de estimar sempre a incerteza das medidas.
2. Confirme se o valor ohmico medido para cada uma das resistências é compatível com o seu código de cores.
3. Escolha um dos circuitos da Figura 5 para ser montado.

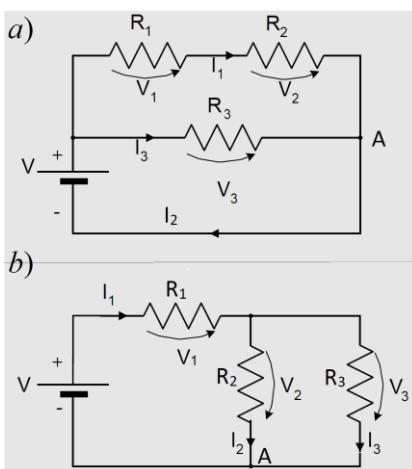


Figura 5 - Os dois circuitos possíveis com três resistências e duas malhas independentes: em cima, *duas resistências em série com uma em paralelo*; em baixo, *duas resistências em paralelo com uma em série*.

4. Faça uma estimativa rápida para a intensidade de corrente máxima que atravessa o circuito, sabendo que a tensão da fonte é  $V \approx 10$  V e que

- $R_1 = 330 \Omega$
- $R_2 = 470 \Omega$
- $R_3 = 1.2 \text{ k}\Omega$

Escolha, de acordo com a sua estimativa, a escala do amperímetro apropriada.

5. Monte o circuito, respeitando a escolha do valor das resistências do ponto anterior.

6. Ligue a fonte de tensão, certificando-se primeiro que o controle de corrente está no mínimo. Após ligada a fonte, aumente lentamente os controles de tensão e de corrente até ao valor de tensão de  $V = 10$  V. Registe o valor desta tensão medida com o multímetro.

7. Registe os valores de  $I$  e  $V$  em cada uma das resistências e o  $V$  da fonte. Não se esqueça de estimar a incerteza de cada um dos valores registados.

Nota: Sempre que pretenda inserir o amperímetro no circuito, desligue a fonte de tensão reduzindo primeiro o controle de corrente até zero e não altere o valor de tensão da fonte; após ter incluído o amperímetro no circuito, volte a ligar a fonte de

tensão e aumente o controle do limite de corrente até a fonte ficar em controle de tensão; nesse momento a fonte deverá ter a mesma ddp aos seus terminais que tinha antes de ser desligada.

### 2. PARTE 2

Na segunda parte do trabalho substitui-se a resistência  $R_1$  por um LED, um componente semicondutor, que se caracteriza por ter uma dependência não linear da ddp aos seus terminais com a corrente que o atravessa (ver Apêndice A). Questões a dar resposta: a ddp aos terminais do LED varia com a corrente que o atravessa? Quanto vale  $V_p$ , a tensão de polarização do LED?

### Experiência 2

1. Substitua a resistência  $R_1$  por um LED polarizado directamente como se indica na Figura 6. Não se engane na resistência a mudar e tenha atenção ao modo como monta o diodo (consulte a Figura 7 no Apêndice A). Repita todos os procedimentos anteriores com uma ddp na fonte igual  $V = 10$  V e, uma outra vez, para  $V = 5$  V.

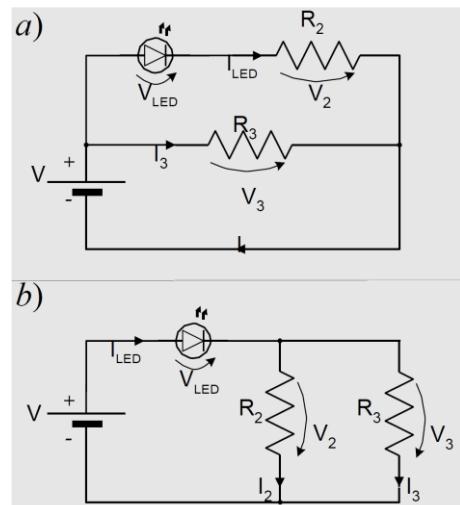


Figura 6 - Circuitos semelhantes aos mostrados na Figura 1, mas com a resistência  $R_1$  substituída por um diodo emissor de luz (LED) polarizado directamente.

2. Compare a luminosidade do LED no caso em que  $V = 10$  V com o caso em que  $V = 5$  V. Registe esta observação experimental.

3. Volte a montar o amperímetro em série com o LED. Coloque também o voltímetro aos terminais do LED. Desça lentamente a ddp da fonte até que o LED deixe de emitir luz e o valor da intensidade de corrente lida no amperímetro diminua de forma significativa<sup>6</sup>. Meça a tensão de polarização do LED,  $V_p$ , o valor mínimo da ddp aos terminais do LED para a qual o LED ainda conduz.

4. Desligue a fonte de tensão após reduzir até zero a ddp aos seus terminais. De seguida, troque a polarização do LED (i.e., monte o componente com as terminais trocados) e volte a ligar a fonte. Aumente lentamente a ddp da fonte e registe o que observa.

<sup>6</sup> Nesta situação, diz-se que o diodo fica *ao corte*. Num LED, a curva

característica  $I$  versus  $V$  não é tão abrupta como num diodo simples e é menos simples perceber onde exactamente o dispositivo fica *ao corte*.

## C. Análise e apresentação de resultados (ver também o Apêndice C)

### C.1. Apresentação de resultados

Pretende-se que a apresentação de resultados seja organizada em (preencher a ficha do trabalho)

- um conjunto de entradas simples com os valores ohmicos (com ohmímetro e código de cores) das três resistências usadas;
- uma tabela com os valores medidos na Experiência 1. Esta tabela deverá conter 7 valores (devidamente acompanhados pelas respectivas incertezas): a tensão da fonte,  $V$ , e as 3 intensidades de corrente  $I_i$  e as 3 ddp  $V_i$  medidos em cada uma das 3 resistências  $R_i$ .
- uma tabela com os valores medidos na Experiência 2. Esta tabela deverá ser idêntica à anterior mas com entradas de valores para as duas tensões de fonte utilizadas ( $\approx 5\text{ V}$  e  $\approx 10\text{ V}$ ). Neste caso,  $V_1$  e  $I_1$  devem figurar como  $V_{\text{LED}}$  e  $I_{\text{LED}}$ , respectivamente.
- Um parágrafo com a descrição da comparação da luminosidade do LED para  $V \approx 10\text{ V}$  e  $V \approx 5\text{ V}$ .
- o valor medido para  $V_p$ , a tensão de polarização do LED.
- Um parágrafo com a descrição do que observou quando trocou a polaridade ao LED.

### C.2. Análise dos resultados

#### Experiência 1

Comece por confirmar que se verificam experimentalmente as Leis de Kirchhoff. Note que nesta análise terá, obrigatoriamente, que incluir as incertezas das medidas.

Usando os valores medidos de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $V$  (a ddp da fonte de tensão), calcule, com base nas leis de Kirchhoff e/ou com as expressões para associação de resistências, as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , e as tensões  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ , em cada uma das resistências.

Faça uma estimativa da propagação das incertezas das medidas de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $V_0$  nos valores calculados.

Represente graficamente os pares de valores medidos e calculados para  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  com as respectivas barras de erro.

#### Experiência 2

Confirme que se verificam experimentalmente as Leis de Kirchhoff para os resultados obtidos com  $V \approx 5\text{ V}$  e  $V \approx 10\text{ V}$ . Como no caso da Experiência 1, descrito atrás, deverá incluir as incertezas das medidas nesta análise.

### Apêndice A: O LED

O LED é um diodo (dispositivo semicondutor baseado numa junção PN) que quando percorrido por corrente emite luz. Para conduzir, o LED (e, qualquer outro diodo) necessita estar polarizado directamente, isto é, com o seu ânodo ligado a um potencial elétrico superior ao do cátodo (ver Figura 7).

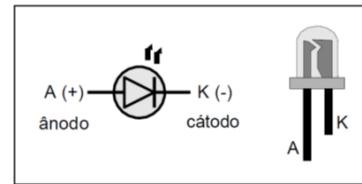


Figura 7 Símbolo elétrico do LED com indicação dos terminais cátodo e ânodo (esquerda). Desenho do encapsulamento típico de um LED (direita): o terminal ânodo distingue-se do cátodo por ser mais comprido

Este dispositivo está para os circuitos elétricos como uma válvula está para um dispositivo hidráulico: só deixa passar corrente num sentido, do ânodo para o cátodo. Ainda que bem polarizado, o diodo só comece a conduzir se a ddp aos seus terminais for superior a um valor limite chamado tensão de polarização,  $V_p$ . A resposta em corrente para uma determinada ddp aplicada ao diodo pode ser representada graficamente (ver Figura 8), sendo este tipo de representação uma curva característica de um LED.

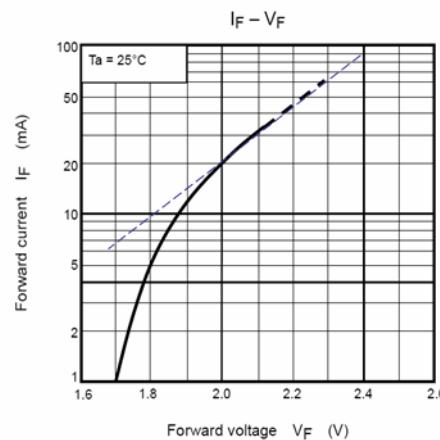


Figura 8 - Exemplo de uma curva característica  $I$  vs  $V$  de um LED (num gráfico logarítmico) em polarização direta. Neste caso específico, para tensões superiores a  $\approx 2\text{ V}$ , a corrente cresce exponencialmente e o diodo aproxima-se do comportamento de um condutor perfeito. Note, no entanto, que a escolha da tensão de polarização  $V_p \approx 2\text{ V}$  é algo arbitrária.

Neste caso a tensão de polarização é cerca de  $2\text{ V}$ . Para valores inferiores a este a resistência efetiva do diodo é muito grande; para valores superiores à tensão de polarização, o diodo conduz com uma resistência efectiva muito baixa.

### Apêndice B: Placas de montagem

As placas de montagem (ou placas de teste) foram concebidas para montar e testar circuitos elétricos e eletrônicos de forma expedita. Na Figura 9 apresenta-se uma fotografia de uma placa de montagem típica. Na Figura 10 apresenta-se um esquema dessa placa.



Figura 9 - Placa de montagem de circuitos de eletrónica.

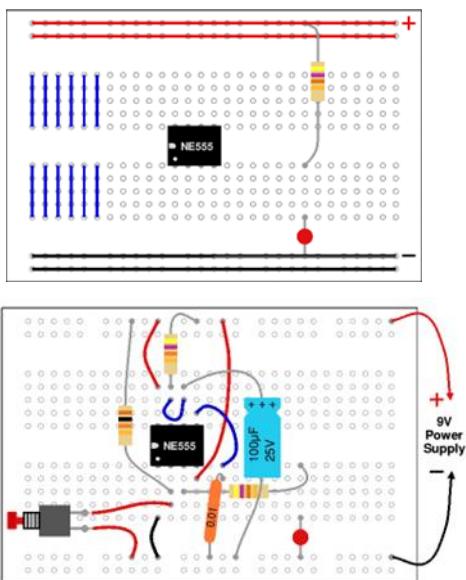


Figura 10 - Esquema de uma placa de montagem (em cima) e exemplo de montagem de um circuito sobre a placa de teste (em baixo).

Cada um dos buracos das placas de teste tem associado um sistema de mola que permite um bom contacto elétrico com o fio de ligação. Certos grupos de buracos estão internamente ligados entre si. Por exemplo, no caso da placa mostrada na parte superior da Figura 10 os cinco buracos das linhas verticais estão ligados internamente como se indica no esquema com traços contínuos. Os buracos que formam linhas horizontais (em cima e em baixo na placa) estão também interligados (linhas contínuas horizontais). A ligação entre buracos pode ser sempre confirmada recorrendo a um ohmímetro ou ao *buzzer*. Note-se ainda que a zona central tem um espaçamento entre buracos que permite montar directamente circuitos integrados. Na parte de baixo da Figura 10 apresenta-se um exemplo de montagem de um circuito numa placa de montagem. Constitui um bom hábito de trabalho a ligação dos terminais da fonte de tensão às linhas horizontais, que atravessam toda a placa tal como se indica nas duas imagens da Figura 10.

**Apêndice C: Registo e discussão de resultados**

**Parte 1**

Tabela 1

$R_1 =$ _____	$; R_2 =$ _____	$; R_3 =$ _____
---------------	-----------------	-----------------

$$(I_{\max})_{\text{estimado}} = \underline{\hspace{10cm}}$$

Tabela 2

$V_1$	$V_2$	$V_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$

**Parte 2**

Tabela 3 ( $V = 10$  V)

$V_{\text{LED}}$	$V_2$	$V_3$	$I_{\text{LED}}$	$I_2$	$I_3$

Tabela 4 ( $V = 5$  V)

$V_{\text{LED}}$	$V_2$	$V_3$	$I_{\text{LED}}$	$I_2$	$I_3$

Comentário à luminosidade do LED: \_\_\_\_\_

$$V_p = \underline{\hspace{10cm}}$$

Polarização inversa:

Na análise dos resultados deve ter em consideração os seguintes pontos.

### Parte 1

- 1.1 Desenhe o circuito que montou na Parte 1 da aula prática.
- 1.2 Com os valores medidos, verifique a lei dos nós para o nó A.
- 1.2 Verifique a lei das malhas para a malha que inclui as resistências  $R_2$  e  $R_3$ .
- 1.3 Verifique a lei das malhas para uma malha que inclua a fonte de tensão.
- 1.3 Usando os valores medidos de  $R_1$ ,  $R_2$ , e  $R_3$  e de  $V$ , a ddp da fonte de tensão na Experiência 1, calcule, com base nas leis de Kirchhoff e/ou com as expressões para associação de resistências, as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , e as quedas de tensão  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ , em cada uma das resistências.
- 1.4 Faça uma estimativa da propagação das incertezas das medidas de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $V$  nos valores calculados.
- 1.5 Compare os valores calculados e medidos. Calcule os desvios percentuais.
- 1.6 Calcule a resistência equivalente total do circuito.

### Parte 2

Para a tensão da fonte regulada para  $V = 10\text{ V}$  e  $V = 5\text{ V}$ .

- 2.1 Com os valores medidos, verifique a lei dos nós para o nó A.
- 2.2 Verifique a lei das malhas para a malha que inclui as resistências  $R_1$  e  $R_3$ .
- 2.3 Verifique a lei das malhas para uma malha que inclua a fonte de tensão.
- 2.4 Usando os valores medidos de  $R_{\text{LED}}$ ,  $R_2$ , e  $R_3$  e de  $V$ , a ddp da fonte de tensão na Experiência 2, calcule, com base nas leis de Kirchhoff e/ou com as expressões para associação de resistências, as correntes  $I_{\text{LED}}$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , e as quedas de tensão  $V_{\text{LED}}$ ,  $V_2$  e  $V_3$ , em cada uma das resistências.
- 2.5 Faça uma estimativa da propagação das incertezas das medidas de  $R_{\text{LED}}$ ,  $R_2$ , e  $R_3$  e  $V$  nos valores calculados.
- 2.6 Compare os valores calculados e medidos. Calcule os desvios percentuais.

### **Referências**

- [1] Physics for scientists and engineers with modern physics (4th Edition), Raymond A. Serway, Saunders College Publishing (1996)
- [2] Física Experimental - Uma introdução, M. C. Abreu, L. Matias, L. F. Peralta, Presença (1994)
- [3] An introduction to error analysis (2nd Edition), Jonh R. Taylor, University Science Books (1997)
- [4] Ver página web <http://en.wikipedia.org/wiki/LED> e sítios lá referidos.

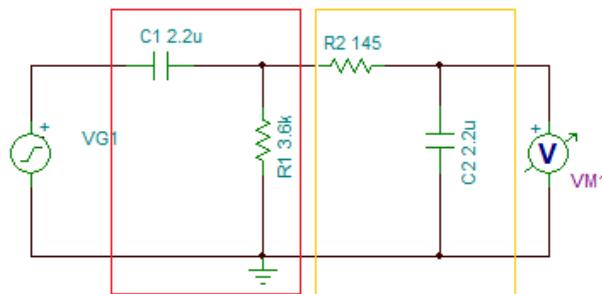
# Relatório de Introdução ao LabView

Henrique Lopes A85953 / João Basto - AE4867

## PONTO TEÓRICO

I:

A combinação de um filtro passa-alto com um filtro passa-baixo, ambos de passivos e de 1<sup>a</sup> ordem, tem o seguinte aspeto, com o retângulo vermelho a representar o filtro passa-alto e o retângulo amarelo a representar o filtro passa-baixo.



Para calcular os valores de resistências para cada filtro foram utilizadas as expressões abaixo indicadas, tendo em conta que os condensadores disponíveis na caixa de material seriam de 47nF e 2.2uF.

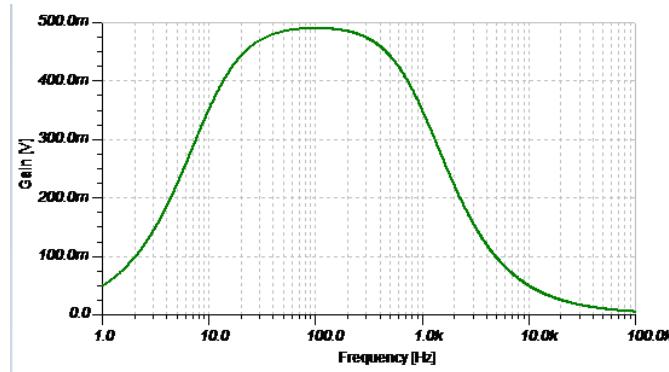
Para o filtro passa-alto a frequência de corte, neste caso frequência superior de corte ( $f_c$ ) será:

$$f_{SC} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \rightarrow 500Hz = \frac{1}{2\pi \times R_1 \times 2.2\mu F} \rightarrow R_1 = \frac{1}{500Hz \times 2\pi \times 2.2\mu F} \rightarrow R_1 \approx 145\Omega$$

Para o filtro passa-baixo a frequência de corte, neste caso frequência inferior de corte ( $f_{ic}$ ) será:

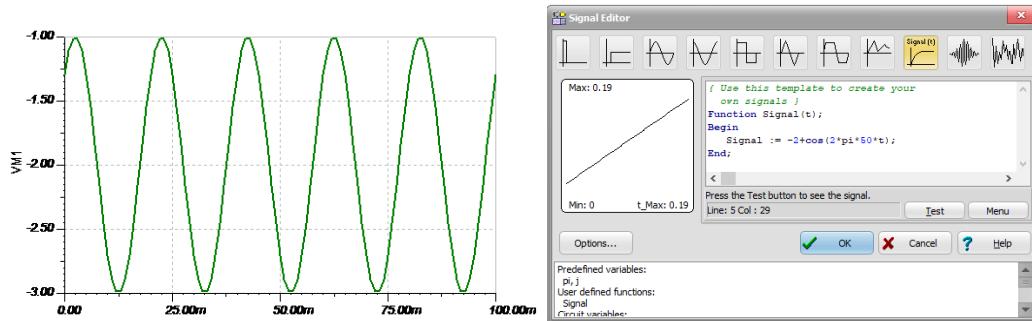
$$f_{ic} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \rightarrow 20Hz = \frac{1}{2\pi \times R_2 \times 2.2\mu F} \rightarrow R_2 = \frac{1}{20Hz \times 2\pi \times 2.2\mu F} \rightarrow R_2 \approx 3.6k\Omega$$

O módulo da resposta em frequência assimptótica do filtro passa-banda resultante da combinação entre os dois filtros anteriormente dimensionados está ilustrado na figura seguinte.



## II:

Colocando o sinal no TINA através da função Signal(t) do Signal Editor (figura da direita) a onda de saída no domínio do tempo é a seguinte.



Tal como seria de esperar pela análise da própria expressão  $x(t) = -2 + \cos(2\pi \cdot 50 \cdot t)$  a onda é uma sinusóide de amplitude 1V e frequência 50Hz mas com uma componente DC de -2V.

Como todos os sinais podem ser transformados numa soma de sinusoides a melhor maneira de chegar a um gráfico do sinal  $x(t)$  no domínio da frequência é transformá-lo nesse conjunto de sinusoides, pelo que teremos:

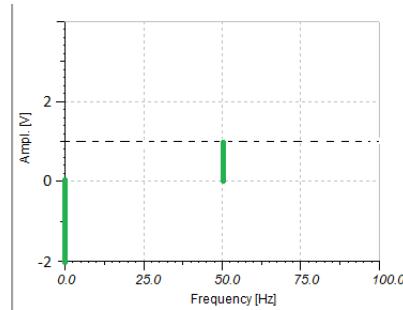
$$x(t) = -2 + \cos(2\pi \times 50 \times t) = -2 \sin(2\pi \times 0 \times t) + \sin\left(2\pi \times 50 \times t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Ao obtermos o sinal  $x(t)$  em função de ondas seno (o cosseno apenas foi alterado por uma questão de coerência, pois também é uma onda sinusoidal e o desfasamento que o distingue da função seno em nada altera a análise no domínio da frequência do sinal  $x(t)$ ) podemos observar que existe uma amplitude para a primeira função e para a segunda função. Podemos afirmar isto pois sabemos também que uma função seno se decompõe da seguinte forma:

$$y(t) = A \sin(\omega \cdot t) = A \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

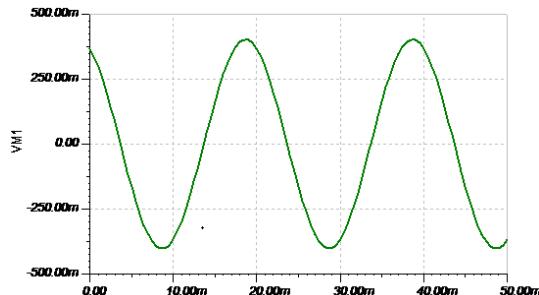
Sendo que A é a amplitude do sinal e f a frequência do mesmo.

O gráfico do sinal representado no domínio da frequência tem o seguinte aspeto.



### III:

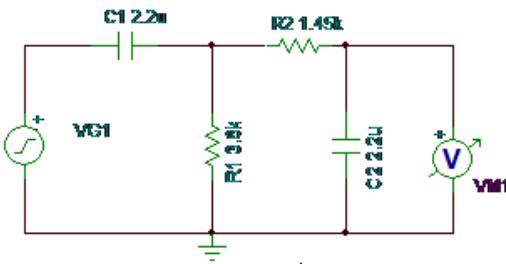
O gráfico do sinal, no domínio da frequência, após passagem num filtro passa-banda com largura de banda 50Hz-500Hz, tem o seguinte aspeto.



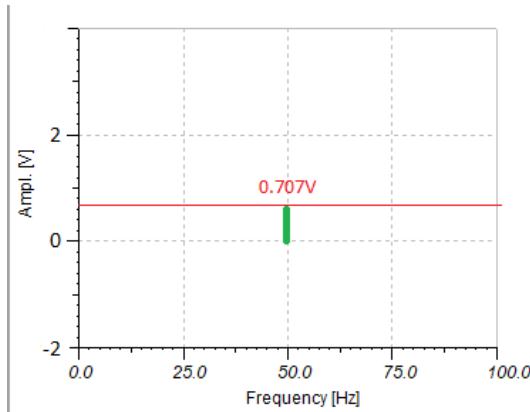
Para fazer o filtro passa-banda foi preciso alterar o valor de  $R_2$ :

$$\text{Para } f_{ic} = 50\text{Hz} \Rightarrow R_2 = \frac{1}{2\pi \times 50\text{Hz} \times 2.2\mu\text{F}} = 1.45k\Omega$$

Mantendo-se o restante circuito da alínea 1) inalterado ficamos com o seguinte circuito.



No domínio da frequência, ao fazer análise do gráfico no domínio do tempo, podemos verificar que a componente DC foi eliminada pois o filtro eliminou as componentes nas frequências de 0Hz-50Hz onde estava contida a componente  $DC \rightarrow A_1 = -2V$ , para as restantes componentes na frequência de 50Hz a onda tem uma atenuação de 3dB pois tem um valor de frequência igual à frequência de corte do filtro passa-baixo, pelo que  $A_2(2) = A_1(1) \times 0,707 = 1V \times 0,707 = 0.707V$ . No domínio da frequência o gráfico tem o seguinte aspeto.

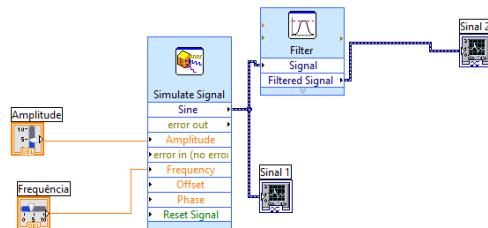


## IV:

O olho humano, da mesma maneira que uma câmara de vídeo, não processa as imagens correntemente. Ao invés disso, o olho capta e processa uma imagem individualmente de x em x tempo. A roda ao girar com frequência maior do que aquela em que o olho capta cada imagem vai fazer com que após captar a “primeira” imagem, ao captar a “segunda” o ponto da roda onde o olho estava a focar já vai estar mais à frente, ou pode até já ter dado quase a volta completa e, assim, para quem está a olhar, a roda andou para trás e não para a frente quando na realidade está sempre a rodar no mesmo sentido. Ao fazer a junção dessas imagens, como se de um vídeo stop-motion se tratasse, para quem está a observar a roda vai sempre andando para trás. Claro que isto irá depender da frequência com que a roda gira, se a frequência for igual à frequência com que o olho humano capta cada imagem a roda vai aparecer parada.

## Pergunta 1

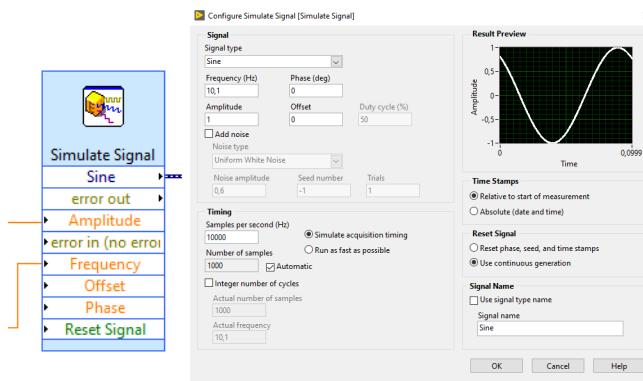
Na definição de Block Diagram do LabVIEW deste programa “bio.vi” podemos ver, na imagem abaixo, os diferentes blocos contidos neles.



- a) Os comutadores de amplitude e frequência, que como o próprio nome indica servem para alterar os valores de amplitude e frequência que queremos que entrem no bloco seguinte, que é o bloco “Simulate Signal”.

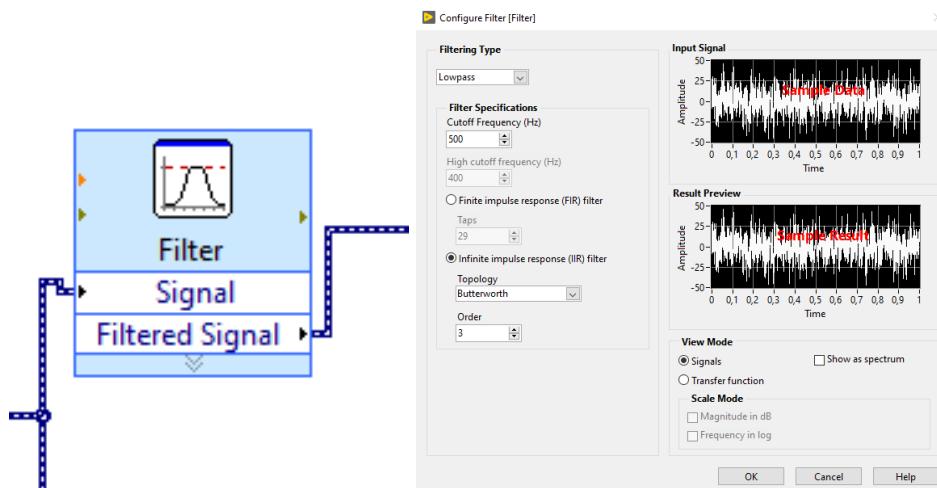


b) O bloco “Simulate Signal” faz o efeito que o gerador de sinais faria ao utilizarmos um digital lab, ou seja, cria o sinal (com a amplitude e frequência anteriormente dadas) que pretendemos analisar.



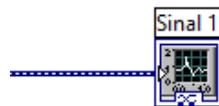
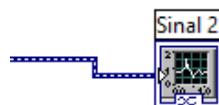
Esta função permite-nos escolher o tipo de sinal que queremos (onda sinusoidal, onda quadrada...), a frequência e amplitude, desfasar a onda, acrescentar ruído ao sinal (neste caso o que estaremos a acrescentar será interferência visto que são ondas programadas e o ruído é aleatório), etc. Os valores pré-definidos podem ser encontrados na imagem acima.

c) O bloco “Filter” , em português “Filtro”, como o nome indica vai filtrar, ou atenuar, o sinal para as frequências desejadas pelo utilizador, tal como o filtro utilizado nas alíneas anteriores.



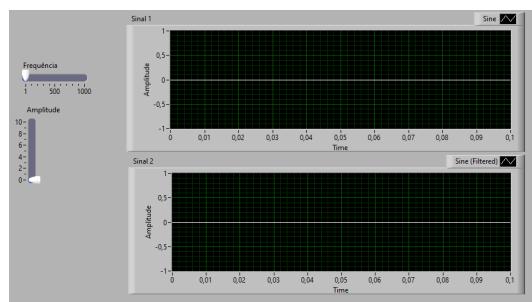
Como pode ser visto na imagem acima o filtro está definido como passa-baixo de frequência de corte 500Hz, mas pode ser alterado para passa-alto, passa-banda ou rejeita-banda.

- d) Os dois blocos de saída funcionam como as pontas de prova do osciloscópio e vão captar e mostrar o sinal no “Front Panel” da onda onde a entrada de cada bloco de sinal está ligado.



## Pergunta 2

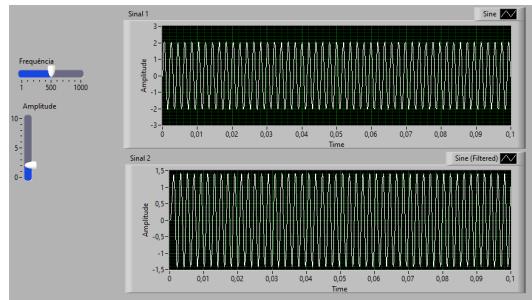
Quando o programa é executado, sem ser feita qualquer alteração, os gráficos apresentam uma onda de amplitude 0V pois os comutadores estão ambos no mínimo possível. O que visualiza no programa é o seguinte:



Ainda assim é possível saber que o sinal1 representa a saída direta do gerador de sinais ou “Simulate Signal”, sem qualquer alteração, enquanto que o sinal2 representa o sinal na saída do filtro, ou seja, representa o sinal criado pelo gerador de sinais mas desta vez já alterado pelo filtro.

## Pergunta 3

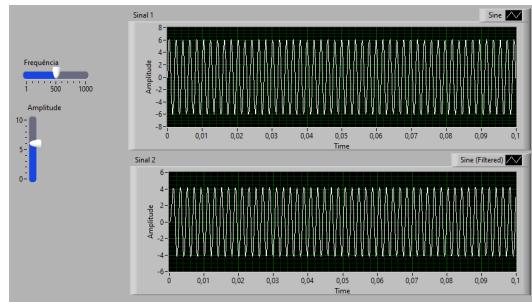
O primeiro valor de amplitude escolhido foi , sendo que para o gráfico obtido em LabVIEW foi o seguinte:



Os gráficos relativos às diferentes frequências e amplitudes destas derivadas demonstram o que já seria de esperar, que o sinal2 representa o sinal1 após uma passagem por um filtro passa-baixo com frequência de corte 500Hz. Como podemos ver no gráfico para uma frequência de 500Hz a amplitude do sinal2 é 1.4V que é 70% do valor inicial de 2V, indicador de que a frequência de corte do filtro é 500Hz.

Sinal1 (2V)		Sinal2 (2V)	
Frequência (Hz)	Amplitude (V)	Frequência (Hz)	Amplitude (V)
10	2	10	2
50	2	50	2
100	2	100	2
500	2	500	1.4
1000	2	1000	0.2

O segundo valor de amplitude escolhido foi V=6V, sendo que para f=500Hz o gráfico obtido em LabVIEW foi o seguinte:



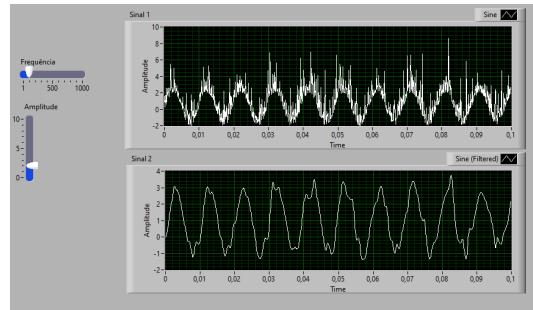
Tal como para a amplitude anteriormente escolhida o mesmo acontece para sendo que para uma frequência de 500Hz o valor de amplitude do sinal2 é 4V, que mais uma vez representa 70% do valor inicial, comprovando ainda mais que se trata de um filtro passa-baixo com frequência de corte de 500Hz. Os gráficos abaixo representados indicam o valor de cada sinal para diferentes frequências.

Sinal1 (6V)		Sinal2 (6V)	
Frequência (Hz)	Amplitude (V)	Frequência (Hz)	Amplitude (V)
10	6	10	6
50	6	50	6
100	6	100	6
500	6	500	4
1000	6	1000	0.7

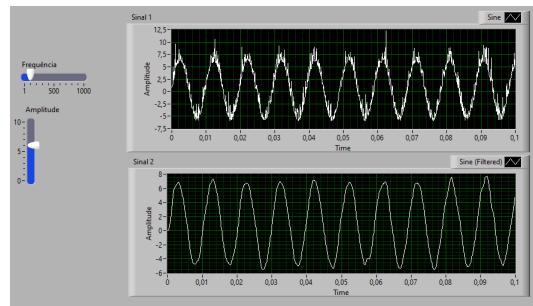
## Pergunta 4

O primeiro ruído escolhido foi o Gamma Noise.

Para  $V = 2V$  e  $f = 100Hz$ :

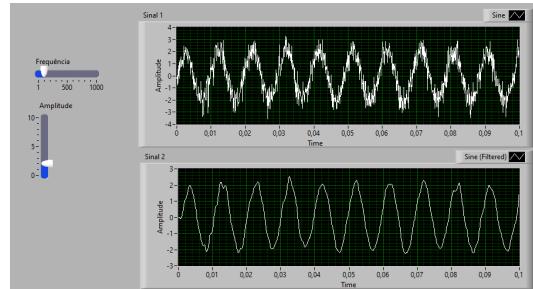


Para  $V = 6V$  e  $f = 100Hz$ :

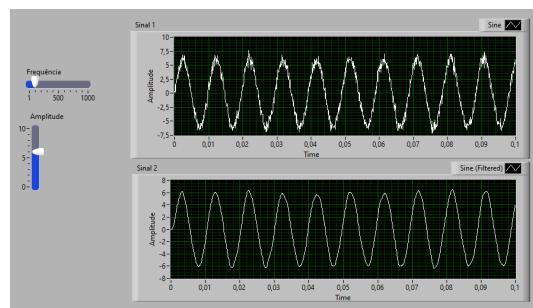


O segundo ruído escolhido foi o Gaussian White Noise.

Para  $V = 2V$  e  $f = 100Hz$ :

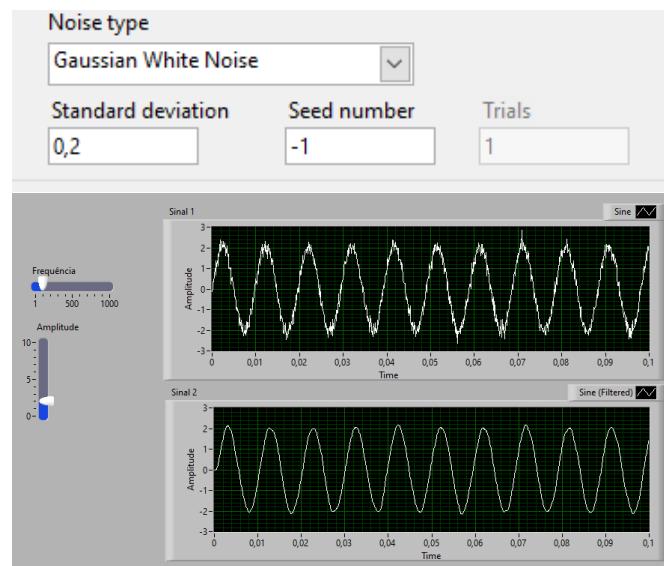


Para  $V = 6V$  e  $f = 100Hz$ :

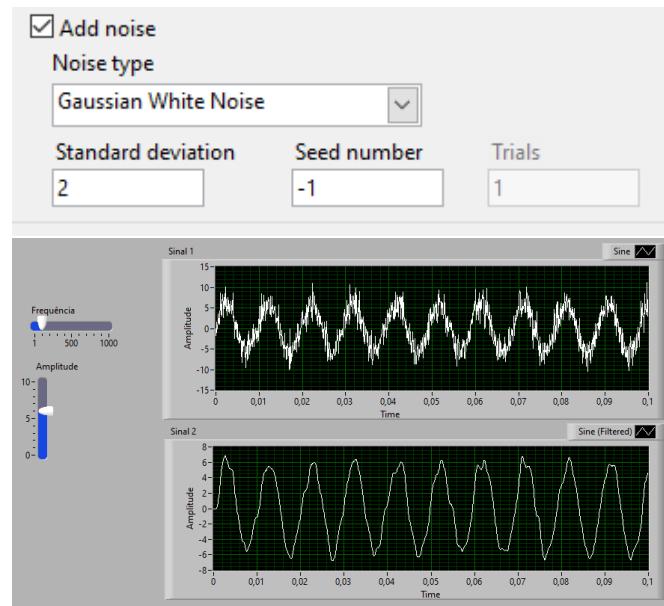


Podemos verificar que apesar de os dois ruídos serem diferentes ambos são eliminados, ou atenuados, notando-se mais a atenuação para sinais de maior amplitude. Visto que são dois ruídos de elevada frequência, como se pode ver pelas características dos sinais do sinal1, é de esperar que o filtro atenua as componentes existentes nessa gama de frequências (pois trata-se de um filtro passa-baixo) mostrando assim um sinal mais “puro” na saída do sinal2. O facto de esta atenuação se notar mais em sinais de maior amplitude deve-se ao facto de certas frequências mais baixas do ruído não terem sido filtradas e se forem de amplitude baixa só vão ser notadas em sinais de amplitude mais baixa devido à semelhança entre o “tamanho” do ruído e da onda pura.

Se diminuirmos essa amplitude de ruído podemos observar que mesmo para uma amplitude de sinusóide mais baixa o sinal de saída se comporta mais como uma sinusóide pura do que quando a amplitude é maior.

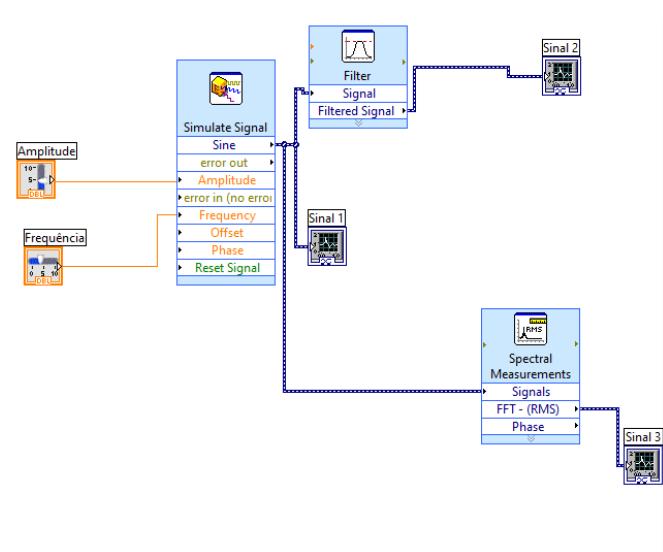


Se fizermos o contrário e aumentarmos a amplitude do ruído para amplitude sinusoidal também mais alta, podemos reparar que mesmo para alta amplitude a onda de saída não é tão pura como nos gráficos para os quais a amplitude do ruído era menor.



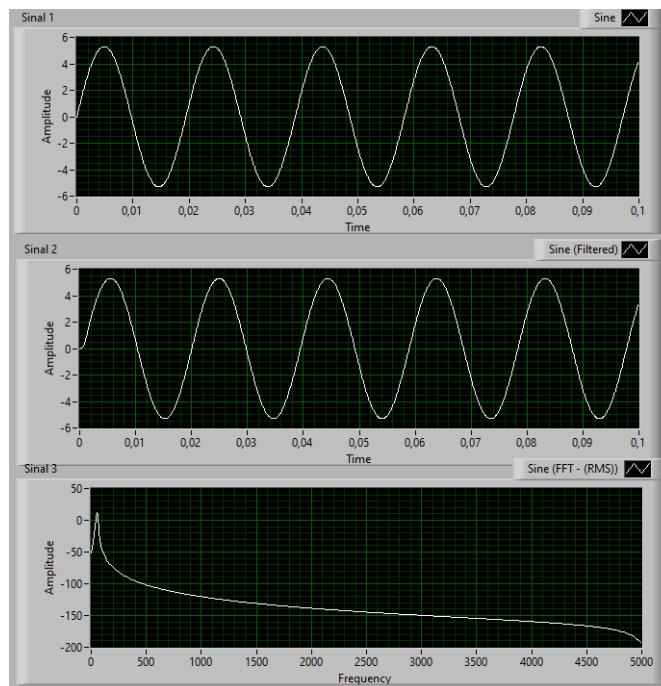
## Pergunta 5

Sendo o sinal 3 aquele que está ligado ao Spectral Measurements temos:

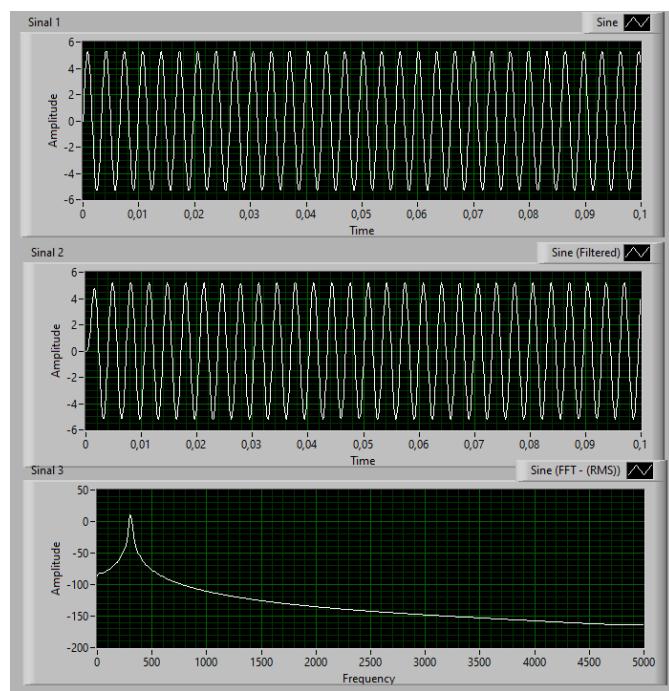


Podemos assim ver o comportamento do espectro com a variação da frequência.

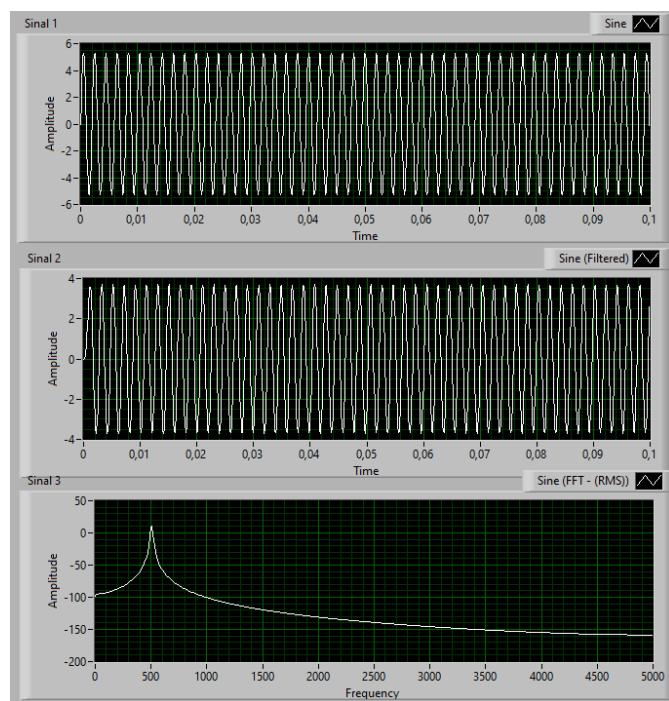
Para 50Hz:



Para 300Hz:

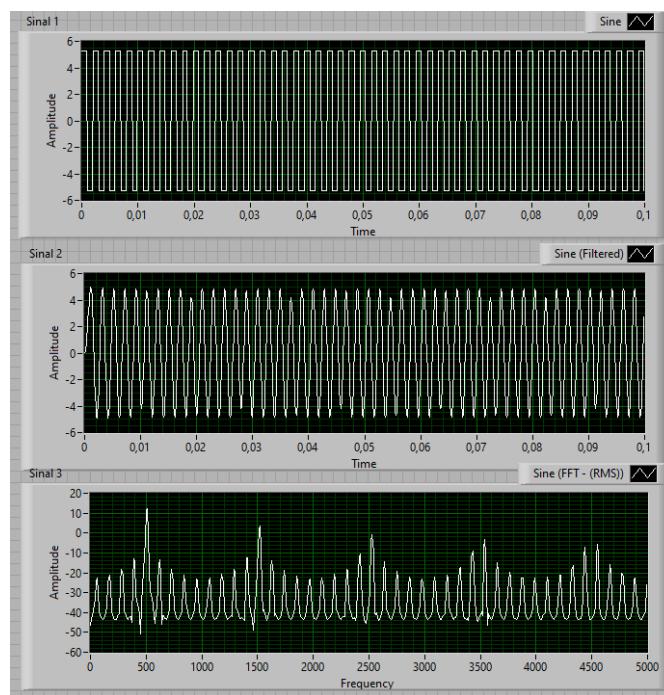


Para 500Hz:



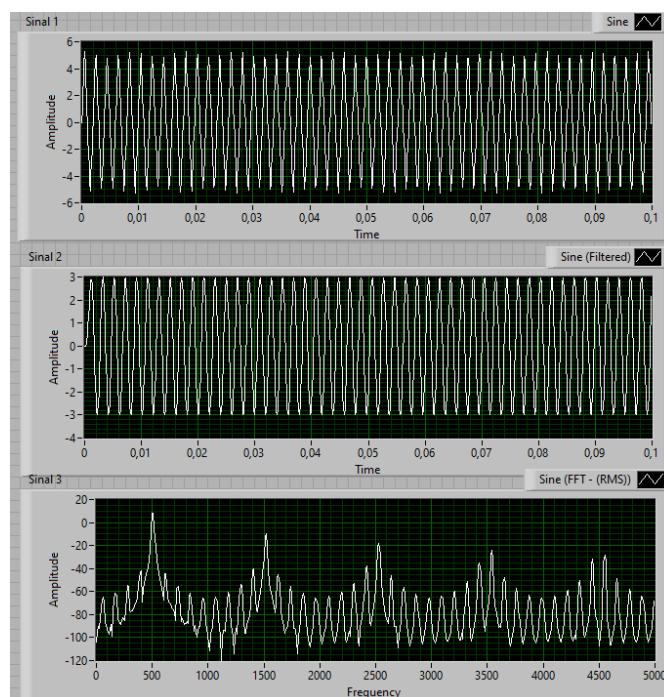
## Pergunta 6

Agora com uma onda quadrada.



## Pergunta 7

Agora com uma onda triangular.



## Pergunta 8

Os espectros que observamos são distintos para cada onda diferente o que seria de esperar. Isto deve-se principalmente ao facto das ondas quadradas e triangulares serem resultado da soma de várias sinusoides com diferentes frequências.

# Trabalho 3: Lei de Ohm e Multímetro

Introdução à Física Experimental - 2017/18

Cursos: Engenharia Física e Física

Departamento de Física - Universidade do Minho

Este trabalho laboratorial tem por objectivo fornecer evidência experimental para a Lei de Ohm e para o efeito Joule. Pretende-se que os alunos sejam confrontados com a medida de grandezas físicas como Intensidade de Corrente Eléctrica, Diferença de Potencial e Resistência Eléctrica. Introduz-se o multímetro como aparelho de medida de grandezas eléctricas em circuitos de corrente contínua, a fonte de tensão e seu uso em segurança. Faz-se uso do código de cores de resistências. Finalmente, é dado grande ênfase aos cuidados a ter num laboratório de electricidade e às medidas de segurança que devem ser adoptadas tendo em vista evitar acidentes pessoais e a danificação do equipamento.

## Leituras

Ao longo deste guia far-se-á referência a alguns textos das seguintes referências:

- Ref. [1], capítulo 27
- Ref. [2], Leitura e Apêndices 2 e 3.

## Objectivo deste trabalho laboratorial:

- verificar experimentalmente a Lei de Ohm
- medir o valor ohmico de uma resistência de carbono
- estudar a dependência da resistividade de um metal com a temperatura

## Registo de resultados

No final deste trabalho laboratorial, os alunos deverão ter registado os seguintes dados:

- 1 série de 10 resultados  $\{I, V\}$  para a lei de Ohm com resistência, usando o amperímetro dentro do circuito do voltímetro.
- 1 série de 10 resultados  $\{I, V\}$  p/ a lei de Ohm com resistência, usando o amperímetro fora do circuito do voltímetro.
- 1 série de 10 resultados  $\{I, V\}$  p/ a lei de Ohm/efeito Joule com uma lâmpada incandescente.

## I. INTRODUÇÃO

### A. Diferença de Potencial Eléctrico

Sabemos da mecânica que a variação de energia potencial é igual ao trabalho necessário para deslocar, sem atrito, um objecto de uma posição para outra, num campo gravitacional. De modo análogo, a energia potencial eléctrica varia quando se realiza trabalho para deslocar uma carga eléctrica de um ponto para outro num campo eléctrico. Define-se *diferença de potencial eléctrico* (ddp) como a variação de energia potencial eléctrica entre dois pontos por unidade de carga. A unidade do *sistema internacional* (S.I.) para ddp é, assim, o Joule/Coulomb<sup>1</sup> [J/C]. Dada a sua importância na Física, assim como no nosso dia-a-dia, esta unidade tem um nome específico, o volt [V].

Tal como no caso do campo gravitacional, também num campo eléctrico a ddp entre dois pontos não depende do caminho percorrido mas apenas da localização relativa desses pontos<sup>2</sup>. Assim, no caso de termos um campo eléctrico constante  $E$ , a ddp entre dois pontos distanciados de uma distância  $d$ , será igual a<sup>3</sup>  $V = Ed$ . A ddp é também usualmente designada por *tensão eléctrica* e representada pela letra  $V$ <sup>4</sup>.

### B. Corrente eléctrica

A aceleração de um feixe de electrões (no vácuo) numa região onde existe um campo eléctrico uniforme é o exemplo mais simples do efeito de um campo eléctrico sobre uma partícula carregada. Neste caso, os

<sup>1</sup> Aqui, Joule [J] é a unidade S.I. de trabalho/energia e Coulomb [C] a unidade S.I. de carga eléctrica.

<sup>2</sup> A energia potencial de um grane à altura  $h$  é, na aproximação do campo gravitacional constante, igual a  $mgh$ . Esta quantidade não depende da forma como o grane percorreu o trajecto entre o chão (supostamente a energia potencial nula) e a sua posição final, com uma altura  $h$ : depende apenas de  $h$ , a distância entre

o ponto de partida e o ponto de chegada. Neste tipo de situações, dizemos estar perante um campo conservativo.

<sup>3</sup> Esta expressão é usada para definir a unidade S.I. para campo eléctrico: o volt por metro [V/m].

<sup>4</sup> É também frequente o uso da letra  $U$  para referir d.d.p., especialmente nas áreas da engenharia.

electrões descrevem um movimento uniformemente acelerado<sup>5</sup>. Um outro exemplo comum é a passagem de corrente eléctrica num fio metálico quando se ligam as extremidades deste aos terminais de uma *fonte de tensão*, como por exemplo uma pilha<sup>6</sup>: a tensão aos terminais da pilha diz-nos qual é o valor da energia disponível por unidade de carga, quando estas se deslocam num circuito exterior como, por exemplo, o fio condutor. Por outro lado, um condutor apresenta, sempre, uma oposição à passagem da corrente eléctrica: o movimento ordenado dos electrões em aceleração constante que se observa acontecer no vazio é substituído, num condutor real, pelo movimento em zigzag dos electrões entre sucessivas colisões com os átomos do condutor. Ainda assim, e entre as muitas colisões pelo caminho, os electrões vão progredindo na direcção de maior potencial eléctrico. À quantidade de carga positiva<sup>7</sup> que passa por unidade de tempo numa secção recta do condutor dá-se o nome de intensidade de corrente eléctrica referida habitualmente por  $I$  (que tem em conta o valor médio da progressão dos vários electrões) é igual a (Serway: §27.1)

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

Em unidades S.I., a corrente eléctrica tem dimensão de coulomb/segundo. Tal como para a ddp, também a intensidade de corrente eléctrica *merece* ter uma unidade própria: o ampère [A]<sup>8</sup>. Assim, 1 A é a corrente eléctrica que corresponde à passagem de um Coulomb de carga num intervalo de tempo de um segundo: note que a corrente de 1 A corresponde à situação física de termos cerca de  $6 \times 10^{18}$  electrões a passar no condutor por segundo!

### C. Resistência eléctrica e Lei de Ohm

Ao contrário do caso do movimento dos electrões no vazio e num campo eléctrico uniforme, que é

<sup>5</sup> Sabemos da lei de Coulomb que a força eléctrica aplicada a uma partícula de carga  $q$  num campo eléctrico uniforme  $E$  é igual a  $F = qE$ . Assim, se a massa da partícula for  $m$ , a aceleração devida ao campo eléctrico é constante e igual a  $eE/q$ .

<sup>6</sup> Na gíria electrotécnica, ligar um fio condutor entre os terminais de uma fonte chama-se fazer um *curto-circuito* pois, normalmente, a resistência eléctrica de um condutor é muito pequena, dando origem a correntes eléctricas muito elevadas. No mundo real assim como no laboratório, **deve-se evitar sempre esta situação**.

<sup>7</sup> Aqui vale a pena chamar à atenção que o *sentido convencional* da corrente eléctrica, do maior para o menor potencial, é o sentido contrário ao do movimento de progressão dos electrões que são, de facto, os responsáveis pela condução eléctrica nos materiais condutores. Diz-se habitualmente que este sentido, o dos electrões, é o *sentido real* da corrente eléctrica (ver §27.1 do Serway).

<sup>8</sup> Na realidade é o Ampère que é uma unidade básica do sistema S.I. e define o Coulomb. Um ampère é definido como a corrente

caracterizado por ser um movimento com uma aceleração constante, na maioria dos condutores, os electrões, se sujeitos também a um campo eléctrico uniforme, progridem a uma *velocidade média* constante, a *velocidade de deriva* (em inglês, *drift speed*)<sup>9</sup>. Sendo esta velocidade constante, também o é a corrente eléctrica  $I$ . Como a velocidade de deriva é proporcional à ddp aplicada entre as extremidades do condutor então temos que  $I$  é directamente proporcional a  $V$ . Ou seja, (Serway:§27.2; *Física Experimental: Lei de Ohm* na Leitura 4)

$$V = RI \quad (2)$$

onde  $R$ , a constante de proporcionalidade, é a *resistência eléctrica* do condutor, independente da tensão aplicada<sup>10</sup>. À expressão da Eq.2 dá-se o nome de lei de Ohm. A unidade S.I. de resistência eléctrica é o ohm e é representado pela letra grega  $\Omega$ . Assim, se se aplicar uma d.d.p de 1 V aos terminais de um condutor com uma resistência eléctrica de 1  $\Omega$ , teremos uma corrente eléctrica de 1 A a percorrer esse condutor.

No contexto do estudo da dinâmica de fluidos a **lei de Poiseuille** assemelha-se bastante à lei de Ohm, relacionando a *intensidade de fluxo*, ou caudal, de um fluido através de um tubo, em [ $m^3/s$ ], com a diferença de pressão entre as extremidades do tubo e a *resistência* oferecida por esse à passagem do fluido. Esta semelhança dá origem à analogia hidráulica de circuitos eléctricos.

A resistência eléctrica de um condutor depende não só do material de que é feito como também das suas características geométricas, tais como o seu comprimento e a sua secção recta: de facto, quanto **maior e mais fino for o condutor, maior será a sua resistência** (Serway:§27.2). Se quisermos separar a influência da geometria do condutor da do material de que é feito é necessário introduzir a noção de resistividade. Esta grandeza é usualmente representada pela letra grega  $\rho$ , e relaciona-se com a resistência  $R$  pela expressão

necessária para produzir uma força atractiva, de origem magnética, de  $2 \times 10^{-7}$  newton por metro de comprimento entre dois condutores infinitos e de secção transversal desprezável dispostos paralelamente a 1 metro de distância entre si (ver '[http://en.wikipedia.org/wiki/International\\_System\\_of\\_Units](http://en.wikipedia.org/wiki/International_System_of_Units)' para uma revisão sobre as unidades base do sistema S.I.)

<sup>9</sup> A velocidade de deriva num condutor de cobre, por exemplo, é de apenas  $200 \mu m/s$  (ver Exemplo 27.1 do Serway). Esta velocidade contrasta fortemente com a velocidade de transmissão de informação num cabo de cobre que se aproxima da velocidade da luz no vazio, i.e.  $\approx 3 \times 10^8 m/s$ . Este aparente paradoxo, é facilmente resolvido se não se confundir a velocidade com que as cargas progridem no condutor com a velocidade de propagação do campo eléctrico nesse mesmo condutor. (Ver §27.3 do Serway sobre o *modelo de Drude* para a condução eléctrica.)

<sup>10</sup> Esta é a definição de *material ohmico*: um material com uma resistência eléctrica que não depende da ddp aplicada aos seus terminais.

$$R = \rho l/A \quad (3)$$

onde  $l$  e  $A$  são o comprimento e a secção transversal do condutor, respectivamente. A unidade S.I. da resistividade é o ohm-metro [ $\Omega\text{m}$ ].

Uma característica importante de  $\rho$  é que varia fortemente com a temperatura. Nos metais, por exemplo,  $\rho$  normalmente aumenta com o aumento da temperatura<sup>11</sup>, seguindo de forma aproximada uma lei de proporcionalidade linear com a temperatura dada por (Serway: §27.4)

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4)$$

Neste última expressão,  $T_0$  é uma temperatura de referência (normalmente igual a 20°C) e  $\alpha$  é o coeficiente (linear) térmico da resistividade.

Na última parte do trabalho verificaremos qualitativamente a variação da resistência de um filamento de tungsténio com a temperatura. Para o fazer, registaremos a dependência de  $I$  para vários valores de ddp aplicada aos terminais de uma lâmpada incandescente. Um comportamento muito diferente do da lâmpada acontece nas vulgares resistências usadas em circuitos electrónicos<sup>12</sup> que são fabricadas com o propósito específico de ter um valor ohmico que varie muito pouco com a temperatura: disso depende o bom funcionamento dos circuitos electrónicos! Na primeira parte do trabalho prático faremos uso de um destes componentes para verificar experimentalmente a lei de Ohm.

#### D. Potência eléctrica

Quando ligamos uma lâmpada incandescente, observamos que esta além de emitir luz também aquece bastante. Mas porque aquece a lâmpada? Ao se deslocarem no condutor, os electrões são sujeitos a uma espécie de força *efectiva* de atrito, fruto do elevado número de colisões com a rede cristalina<sup>13</sup>. Durante uma colisão, parte da energia cinética do electrão é transferida para a rede, sendo posteriormente dissipada para fora do condutor, ou seja, parte do trabalho realizado pelo campo sobre a carga é transformada em energia térmica. No caso da lâmpada, o filamento aquece, ficando incandescente e irradiando energia (e apenas uma pequena parte desta sob a forma de luz visível). A este fenômeno dá-se o nome de **efeito**

<sup>11</sup> Isto pode ser entendido como um aumento do número de colisões, por unidade de tempo, dos electrões com os átomos da rede cristalina do metal. Com o aumento da temperatura, dá-se um aumento da agitação térmica da rede cristalina, aumentando com isso o número de colisões por segundo. Quanto maior for esta taxa de colisões menor é a velocidade de deriva dos electrões e, logo, menor é o valor de  $I$ . Finalmente, e de acordo com a lei de Ohm, isto corresponde a um aumento do valor da resistência  $R$ .

<sup>12</sup> Note que aqui o termo 'resistência' é usado para designar um componente usado em electrónica. Esta dupla utilização da

#### Joule.

A ddp (ou tensão)  $V$  é, como vimos, igual à quantidade de trabalho realizado por unidade de carga e a corrente  $I$ ; a quantidade de carga que passa no condutor por unidade de tempo. A análise dimensional simples mostra que

$$[\text{J}/\text{C}] [\text{C}/\text{s}] = [\text{J}/\text{s}],$$

ou seja, que  $VI$  tem dimensão física de potência i.e., *trabalho por unidade de tempo*. Pode-se demonstrar de forma rigorosa que, de facto, a potência eléctrica dissipada por um condutor é igual a (Serway: §27.6)

$$P = VI = RI^2 = V^2/R \quad (5)$$

A unidade S.I. para potência é o watt [W].

#### E. Ordem de grandeza da corrente eléctrica e cuidados a ter no laboratório.

É sempre importante ter uma ideia, mesmo que apenas aproximada, sobre a magnitude das grandezas físicas envolvidas numa experiência. Este trabalho laboratorial não é excepção a esta regra, bem pelo contrário. A corrente eléctrica de 1 A é, na maior parte dos casos, considerada uma corrente elevada: por exemplo, nos equipamentos electrónicos que usamos no nosso dia a dia a corrente eléctrica que percorre os seus componentes (resistências, diodos, transístores, etc) é em geral muito inferior a 1 A. Nestes casos é usual usarem-se sub-múltiplos do ampère<sup>14</sup> como o mili-ampère [mA], igual a  $10^{-3}$  A ou mesmo o micro-Ampère [ $\mu\text{A}$ ], igual a  $10^{-6}$  A. Neste trabalho, assim como nos que se seguem, a corrente eléctrica será sempre, no máximo, de algumas centenas de mA. **Ter sempre em atenção que não se deve aumentar  $I$  muito além desta ordem de grandeza evitando portanto acidentes pessoais e a danificação de equipamento do laboratório**, em especial o amperímetro (ver Apêndice A).

O valor típico da ddp usado em circuitos electrónicos é à volta de 10 V. Assim, contrariamente ao caso da corrente, não é necessário fazer uso de sub-múltiplos para a ddp, sendo *confortável* utilizar o volt como unidade. Da lei de Ohm, vemos que para intensidades de correntes eléctricas e ddp de, respectivamente, centenas de mA e alguns volt, a resistência eléctrica deverá ser da ordem de grandeza de dezenas de  $\Omega$  ou de alguns kilo-ohm [ $\text{k}\Omega$ ] (este último igual a  $10^3 \Omega$ ). O

palavra *resistência* pode, por vezes, levar ao uso de uma linguagem confusa. Assim, é preferível dizer, p. ex., 'o valor ohmico desta resistência (o componente) é  $10 \Omega$ ' em vez de 'a resistência (grandeza física) desta resistência (o componente) é  $10 \Omega$ '.

<sup>13</sup> O tempo médio entre duas colisões, por exemplo no cobre à temperatura ambiente, é de apenas  $2.5 \times 10^{-14}$  s! (Ver Exemplo 27.5 do Serway).

<sup>14</sup> Ver também a Tabela 1.4 do Serway, para uma enumeração de todos os múltiplos e sub-múltiplos usados como prefixo das unidades S.I.

uso de resistências muito superiores a  $10\text{ k}\Omega$  dá origem a correntes eléctricas muito fracas e difíceis de medir (da ordem de  $\mu\text{A}$ ); usar resistências de alguns  $\Omega$  ou inferiores resultará, se for de forma inadvertida, em acidente! Um bom conselho é

**Estimar sempre a magnitude das várias grandezas físicas envolvidas antes de ligar a fonte de tensão!**

**Evite aumentar em demasia o limite de corrente, mantendo sempre no mínimo indispensável ao bom funcionamento do circuito: evitará prejuízos maiores caso aconteça um curto-circuito.**

## II. GUIA PARA O TRABALHO LABORATORIAL

### A. Material necessário

O equipamento necessário para este trabalho laboratorial é o listado a seguir:

- uma resistência desconhecida
- uma fonte de tensão contínua
- dois multímetros
- placa de furos
- fios de ligação com banana (5 unifilares e 5 multifilares)
- módulo com lâmpada

Uma descrição breve sobre estes equipamentos é dada nos Apêndices deste protocolo. Informação mais detalhada pode (e deve!) ser encontrada nos Apêndices 2 e 3 do livro *Física Experimental*[2].

### B. Procedimento Experimental

Consulte o professor após efectuadas as várias etapas propostas para este trabalho. Desligue sempre a fonte de tensão antes de desmontar um circuito. Sempre que tiver dúvidas sobre o bom funcionamento do circuito que montou, consulte o professor antes de ligar a fonte. Se precisar de ligar ou desligar a fonte, reduza primeiro até zero a tensão aos seus terminais. Quando ligar a fonte pela primeira vez, certifique-se que esta tem a regulação de tensão e de controle de corrente no mínimo. Depois, aumente gradualmente a tensão até ao valor máximo que se pretenda (neste trabalho,  $\approx 12\text{ V}$ ), rectificando sempre se pretenda (neste trabalho,  $\approx 12\text{ V}$ ), rectificando sempre o controle de limite de corrente a fim de manter a fonte em controlo de tensão. Note que este procedimento só funciona se a fonte puder debitá-lhe alguma corrente, ou seja, deverá ter uma carga (uma resistência) aos seus terminais.

Registe convenientemente todas as observações experimentais, valores medidos e cálculos efectuados. Antes de começar o trabalho, verifique com o ohmímetro ou o “buzzer” se todos os fios a utilizar se encontram em bom estado e fazem bom contacto.

### 1. PARTE 1

Nesta primeira parte do trabalho pretende-se verificar experimentalmente a lei de Ohm, usando uma resistência de carbono. A questão à qual queremos responder é: qual é o valor ohmico da resistência e qual a melhor forma de a medir?

#### Experiência 1

1. Comece por medir o valor ohmico da resistência que vai usar, assim como o das resistências internas do voltímetro e do amperímetro. Não se esqueça de estimar sempre a incerteza das medidas.
2. Confirme o valor ohmico da resistência, lendo o seu código de cores: compare o valor medido usando o ohmímetro com o do código de cores, tendo em atenção tanto o erro de medida devido a precisão finita do aparelho de medida como a tolerância do valor da resistência (também dado pelo código de cores).
3. Faça uma estimativa rápida de qual é a corrente máxima que vai medir, sabendo que  $V_{max} \approx 12\text{ V}$ . Escolha, de acordo com a sua estimativa, a escala do amperímetro apropriada.
4. Monte o circuito da Figura 1-a).
5. Ligue a fonte de tensão, certificando-se primeiro de que o controle de corrente está no mínimo. Após ligada a fonte, aumente lentamente o controle de tensão e de corrente até atingir o valor máximo de tensão desejado.
6. Faça variar a tensão eléctrica da fonte desde 0 V até 12 V e meça o correspondente valor da intensidade de corrente e da ddp usando dois multímetros. Registe um conjunto de 10 pares  $\{I\text{ vs }V\}$ . Não se esqueça de ir estimando a incerteza de cada um dos valores registados

#### Experiência 2

7. Depois de reduzir os controles de tensão e corrente da fonte, desmonte o circuito e monte o circuito mostrado na Figura 1 b). Repita todos

os procedimentos anteriores.

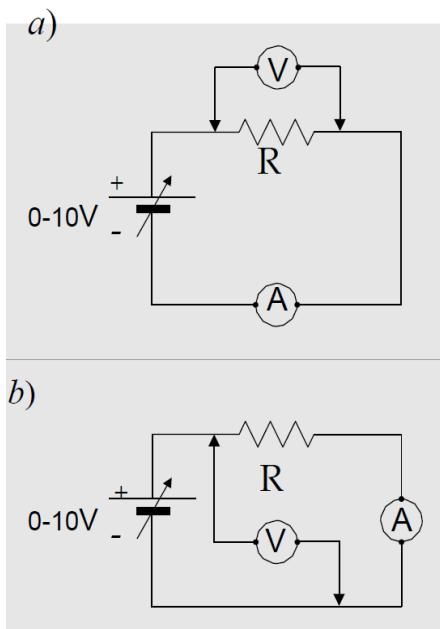


Figura 1 - Os dois circuitos a serem montados na 1<sup>a</sup> parte do trabalho laboratorial.

## 2. PARTE 2

Nesta parte do trabalho, procuraremos estudar qualitativamente a dependência da resistência do filamento de uma lâmpada com a temperatura. O aumento da temperatura do filamento acontecerá devido à passagem de corrente eléctrica, proporcional à ddp aplicada à lâmpada. O valor ohmico do filamento será calculado, para cada ddp aplicada, usando a lei de Ohm.

### Experiência 3

1. Comece por medir o valor ohmico da lâmpada a frio, i.e. à temperatura ambiente.
2. Tendo em atenção as normas de segurança descritas para as Experiências 1 e 2, monte o circuito da Figura 1.a), substituindo a resistência pela lâmpada. Use o módulo da lâmpada e os fios multifilares para montar o circuito.
3. Repita os procedimentos descritos na primeira parte do trabalho, registando a tensão e a corrente aos terminais da lâmpada.

### Apêndice A: O multímetro.

O multímetro é um aparelho de medida que, tal como o seu nome indica, é usado para medir várias grandezas eléctricas (*Física Experimental: Apêndice*

2). Dependendo da função do multímetro seleccionada, este aparelho pode ser usado (entre outras funções não especificadas aqui) como

- Voltímetro - mede a ddp (ou tensão) aos terminais de uma fonte ou condutor (normalmente referida por *queda de potencial*).
- Amperímetro - mede a intensidade de corrente eléctrica que percorre o condutor
- Ohmímetro - mede a resistência eléctrica de um condutor

Note que o nome de cada um destes aparelhos de medida deriva da unidade S.I. da respectiva grandeza física que mede.

### 1. Princípio de funcionamento do multímetro em corrente contínua.

Os multímetros analógicos baseiam o seu funcionamento num dispositivo designado por *galvanómetro*. Um galvanómetro faz uso da existência da força magnética (a força de Lorentz) que é aplicada a um condutor se for atravessado por uma corrente eléctrica e quando imerso num campo magnético (homogéneo). Medindo de forma adequada essa força magnética, e sabendo *a priori* a magnitude do campo magnético, é possível aferir da intensidade de corrente eléctrica que atravessa o condutor. A leitura da corrente eléctrica com um galvanómetro é feita observando a rotação de um ponteiro, rotação essa proporcional à força magnética e logo à corrente eléctrica (*Física Experimental: Apêndice 2*).

Para medir outras grandezas eléctricas que não uma intensidade de corrente, o multímetro faz uso da lei de Ohm! O esquema de funcionamento simplificado é mostrado na Figura A.1.

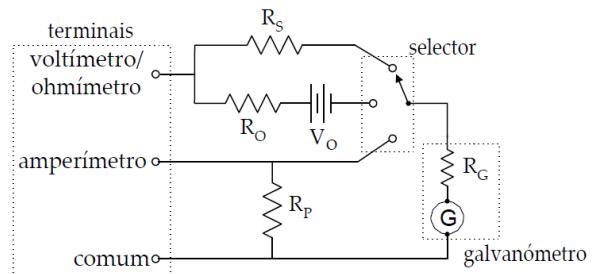


Figura A.1: Esquema de funcionamento de um multímetro baseado num galvanómetro. Ver detalhes no texto.

Assim, por exemplo, o valor  $V$  da medida de uma ddp é feita no multímetro, medindo a corrente eléctrica  $i_G$  que atravessa o galvanômetro quando os terminais *comum* e *voltímetro* são colocados em paralelo com  $V$ . Com o selector na posição do voltímetro essa corrente será igual a (ver Figura A.1)  $i_G = V/(R_S + R_G)$ , onde  $R_S$  é uma resistência ligada em série de valor ohmico elevado (da ordem de  $10\text{ M}\Omega$ ) e  $R_G$  a resistência interna do galvanômetro. Sabendo o valor destas duas resistências (normalmente, resistências de precisão!) e do valor da corrente  $I$ , o multímetro dá o valor de  $V$ .

Querendo-se medir uma corrente eléctrica, os terminais a serem usados são os *comum* e *amperímetro* da Figura A.1. Neste caso, a resistência  $R_P$  de valor ohmico reduzido, é incluída em paralelo com o galvanômetro por forma a manter a resistência interna do amperímetro reduzida: isto fará com que as características do circuito externo não sejam muito alteradas com a inclusão do aparelho de medida (ver Apêndice B). A corrente a ser medida  $I$  relaciona-se com a corrente medida pelo galvanômetro como  $i_G = (R_P/R_G)I$ .

Finalmente, o ohmímetro é conseguido incluindo uma ddp  $V_0$  em série com o galvanômetro e uma resistência de calibração  $R_O$  com o selector na posição intermédia na Figura A.1. Se se fechar este circuito com uma resistência externa  $R$  entre os terminais *comum* e *ohmímetro*, a corrente do galvanômetro será igual a  $i_G = V_0/(R + R_O + R_G)$  e, então, o valor medido para a resistência igual a  $R = V_0/i_G - R_O - R_G$ . Note que os terminais *ohmímetro* e *voltímetro* coincidem no mesmo *borne*, sem que haja conflito entre os dois circuitos. O mesmo não acontece com o amperímetro que, devido à existência da resistência  $R_P$ , necessita ter o seu terminal isolado do terminal *voltímetro/ohmímetro*.

## 2. Multímetro digital. Estimativa de erros nas medidas com o multímetro digital

Os multímetros usados no laboratório de Introdução à Física Experimental são multímetros digitais. O princípio de funcionamento de um multímetro digital é algo diferente do que descrito atrás pelo facto de o elemento central não ser um sensor de corrente (o galvanômetro), mas um Conversor Analógico-Digital (ADC): este dispositivo mede tensões (analógicas) e devolve um sinal digital. Este sinal digital é depois reconvertido adequadamente (digitalmente) para ser mostrado num ecrã, usualmente de cristais líquidos.

Tipicamente, o número de dígitos que um multímetro digital apresenta é 4. Assim, medidas possíveis de ddp são, por exemplo, 0.123 V, 12.34 V ou ainda 123.4 V.

A resolução da medida para cada um destes casos é, respectivamente, 1 mV, 10 mV e 0.1 V e corresponde à casa decimal do último dígito. É preciso ter em atenção que na maior parte dos multímetros a resolução da medida é diferente (menor) que a precisão da medida. Esta última é fornecida pelo fabricante do multímetro, descrita normalmente por uma expressão que envolve dois termos,

$$\delta X = X \cdot E_{rel} + n \cdot R \quad (\text{B.1})$$

onde  $X$  é a medida efectuada,  $E_{rel}$  é um erro relativo (normalmente fornecido em valor percentual),  $R$  a resolução da medida e  $n$  um número inteiro. Nesta expressão, o primeiro termo é proporcional ao valor medido enquanto que o segundo é um termo residual, igual a um certo número  $n$  de dígitos de resolução: esta imprecisão está sempre presente independentemente da magnitude do valor medido,  $X$ . Para valores de  $X$  pequenos, i.e., comparáveis à resolução, este segundo termo domina  $\delta X$ . Para valores grandes de  $X$ , o termo dominante é o que calcula a precisão da medida como proporcional ao valor medido.

Os parâmetros  $E_{rel}$  e  $n$  na Equação B1 variam, em geral, com a função e a escala que se escolha do multímetro. São, como se disse, fornecidos pelo fabricante do multímetro. Na Tabela I mostram-se estes parâmetros para um dos multímetros usados neste trabalho laboratorial. As tabelas para cada um dos aparelhos utilizados podem ser consultados no laboratório.

Voltímetro		
escala	resolução	precisão
40.00 mV	0.01 mV	$\pm(0.3\% + 5)$
400.0 mV	0.1 mV	$\pm(0.3\% + 1)$
4.000 V	0.001 V	$\pm(0.3\% + 1)$
40.00 V	0.01 V	$\pm(0.3\% + 1)$
Amperímetro		
escala	resolução	precisão
4.000 mA	0.001 mA	$0.5\% \pm 5$
40.00 mA	0.01 mA	$0.5\% \pm 2$
4 A	0.001 A	$0.5\% \pm 5$
Ohmímetro		
escala	resolução	precisão
40.00 kΩ	0.01 kΩ	$0.4\% \pm 1$
4.000 kΩ	0.001 kΩ	$0.4\% \pm 1$
400.0 Ω	0.1 Ω	$0.4\% \pm 2$
400.0 kΩ	0.1 kΩ	$0.4\% \pm 1$

Tabela I Tabela para o cálculo da precisão do multímetro para várias escalas das funções *voltímetro* e *amperímetro* (em corrente contínua) e ohmímetro. A precisão é referida como  $\pm(a\% + b)$ , onde  $a$  é o erro relativo em percentagem do valor medido e  $b$  a precisão mínima (absoluta) da medida em número de algarismos de resolução do aparelho.

### Incerteza na medida com um multímetro.

Será o **erro** ou **incerteza da medida** igual à **precisão** do aparelho? Não necessariamente! A **incerteza da medida** pode ser afectada, por exemplo, por outros factores como:

- flutuação do valor observado no mostrador do multímetro
- um erro sistemático devido à influência não desprezável da resistência interna do aparelho de medida.

Assim, é importante saber distinguir entre **resolução**, **precisão** e **erro de medida** ao usarmos um multímetro.

### **3. Como usar um multímetro digital**

Para seleccionar cada uma das funções do multímetro digital é necessário accionar um selector que, na maior parte das vezes, é semelhante ao mostrado no lado esquerdo da Figura A.2. Utilizar o multímetro numa determinada função envolve não só escolher adequadamente a posição do selector da função desejada, mas também (e muito especialmente!) na forma como o inserimos no circuito e na escolha dos seus terminais de ligação.

Normalmente um multímetro tem 4 terminais de ligação ou, na gíria electrotécnica, bornes (ver imagem da direita da Figura A.2).



Figura A.2 Na lado esquerdo desta figura mostra-se o comutador de um multímetro digital semelhante aos usados nas aulas laboratoriais. As funções de voltímetro e amperímetro para *corrente contínua* correspondem às posições do comutador com os símbolos *V* e *A* respectivamente (note que, neste caso, o voltímetro tem duas escalas, uma delas para medir tensões fracas até 300 mV.) Outras funções úteis neste trabalho são a do ohmímetro, símbolo  $\Omega$  no selector, e do *buzzer*, a função que se segue (no sentido da rotação dos ponteiros dum relógio) a seguir à do ohmímetro. Do lado direito da

imagem, mostra-se um (outro) multímetro digital, onde se podem observar os quatro bornes de ligação (ver texto).

Um destes bornes, tipicamente identificado com a cor preta, chama-se *borne comum* e é usado por todas as funções (i.e., deve estar sempre ligado!). As funções de voltímetro/ohmímetro usam o mesmo borne de ligação, devidamente identificado (tipicamente colocado do lado direito ou por cima do borne comum).

Uma outra função que usa o mesmo borne do voltímetro é o *medidor de continuidade*, normalmente referido por *buzzer* por fazer um ruído contínuo quando os seus terminais são ligados a um circuito de reduzida resistência eléctrica: serve, essencialmente, para ver se um determinada ligação eléctrica está bem estabelecida.

O amperímetro, além do terminal comum, tem geralmente dois terminais, um para ser usado quando se medem correntes elevadas (até 10 A) e um outro para correntes eléctricas até centenas de mA.

Ao contrário do terminal  $V/\Omega$ , estes dois terminais do amperímetro estão protegidos com fusíveis. A resistência interna de amperímetro é da ordem de apenas alguns ohm (a do voltímetro à volta de 10 M $\Omega$ !) e se, inadvertidamente, se colocar um amperímetro *em paralelo* com uma ddp (i.e., aplicar uma tensão entre os terminais do amperímetro), a corrente eléctrica resultante seria suficiente para danificar o aparelho. Assim, caso se cometa este tipo de imprudência, considerado **um dos pecados capitais neste laboratório!**, o resultado é queimar um fusível.

### **Apêndice B: Inserção do voltímetro/amperímetro em circuitos eléctricos. Resistências internas dos aparelhos.**

Como foi referido no secção anterior (§B), o voltímetro e o amperímetro têm resistências internas muito diferentes. De facto, caso fosse tecnicamente possível, o ideal seria que a resistência do voltímetro fosse infinita e a do amperímetro nula. Se assim fosse, a inserção dos aparelhos de medida num circuito não modificaria as suas características eléctricas. Na realidade isto não acontece e existe sempre uma pequena perturbação da grandeza medida devido à inclusão do aparelho de medida.

O voltímetro mede uma diferença de potencial! Assim, os seus dois terminais devem ser colocados em pontos do circuito com potenciais eléctricos diferentes. Se não quisermos modificar as propriedades do circuito (e assim também da medida), o ideal é que nenhuma corrente eléctrica flua através do voltímetro. Ou seja, seria ideal que a resistência interna do voltímetro fosse infinita!

O amperímetro mede uma corrente eléctrica que

passa instantaneamente num determinado ponto do circuito. Neste caso, e ao contrário do voltímetro, a medida é *local* e, para inserirmos o amperímetro num qualquer ponto do circuito, temos que *abrir* primeiro o circuito nesse ponto e inserir o amperímetro *em série* (ver Figura B.1)<sup>15</sup>. Neste caso, como o amperímetro é inserido em série no circuito, ele só não teria influência no circuito se a sua resistência interna fosse zero.

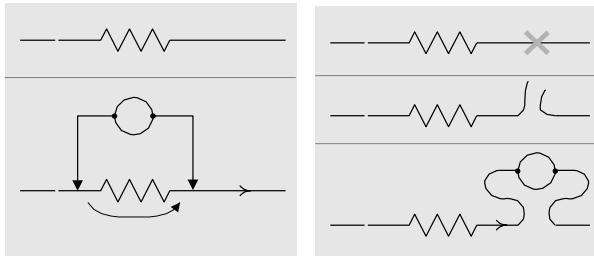


Figura B.1 Procedimento a seguir para se incluir um voltímetro (à esquerda) e um amperímetro (à direita) num circuito. A inclusão do voltímetro para medir a queda de potencial  $\Delta V$  não oferece grande dificuldade: é apenas necessário fazer ligar os seus terminais (ou pontas de prova) aos terminais da resistência. No caso da inclusão do amperímetro no circuito para medir a corrente que passa na resistência, é forçoso abrir primeiro o circuito (o que envolve, seguramente, desligar alguns dos seus fios ou cabos!).

A influência das resistências internas dos aparelhos de medida nos circuitos pode ser tomada em consideração nos cálculos que tenhamos que fazer, conhecendo os respectivos valores ohmicos e substituindo no esquema cada um dos aparelhos de medida pelo seu circuito equivalente. Assim, um voltímetro real pode ser visto como um voltímetro ideal (isto é, com resistência interna infinita) em paralelo com uma resistência  $R_V$ , a resistência interna real do aparelho (ver Figura B.2). O mesmo pode ser feito também para o amperímetro: aqui, o aparelho real é substituído pelo conjunto amperímetro ideal em série com a resistência  $r_A$ , a resistência interna do amperímetro.

Também as fontes de tensão apresentam resistências internas. Neste caso, a fonte real é formada por uma *força electromotriz* em série com uma resistência. A queda de potencial nesta *resistência interna* reduz a tensão disponível aos terminais da fonte à medida que a corrente fornecida aumenta (*Física Experimental*: Apêndice 2). Neste trabalho vamos considerar que esta resistência interna é desprezável.

<sup>15</sup> Note que o uso do voltímetro pode ser feito sem nunca ter que alterar o circuito: é apenas necessário *encostar* as pontas de prova do aparelho nos pontos onde se pretende medir a ddp. É impossível medir uma corrente eléctrica de um circuito com um

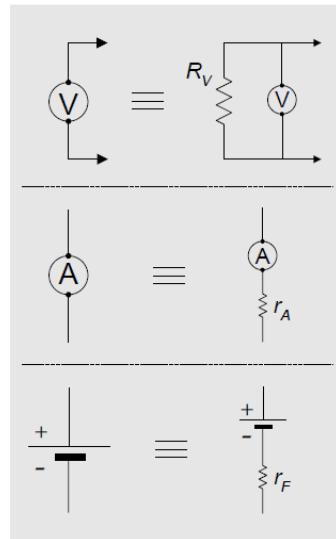


Figura B.2 Os instrumentos reais (lado esquerdo da figura) têm sempre uma resistência interna associada. Para cada um dos casos, é possível desenhar um circuito equivalente construído à custa de instrumentos ideais e as suas resistências internas. Assim, um voltímetro ideal tem uma resistência infinita; um voltímetro real deve ser visto como tendo uma resistência elevada  $R_V$  em paralelo com um voltímetro ideal.  $R_V$  é, tipicamente, da ordem de 10 MΩ. Já o amperímetro real deve ser visto como um amperímetro ideal em série com a resistência interna  $r_A$ .

### Apêndice C: Notas sobre análise dos resultados

Na análise dos resultados deve incluir os seguintes pontos.

Experiências 1 e 2 (Lei de Ohm)

- Construa os gráficos  $V$  versus  $I$ . Verifique a proporcionalidade entre  $V$  e  $I$ , ajustando uma recta ao conjunto de pontos.
- Compare o valor da resistência assim obtido com o valor lido com o multímetro. Analise aos erros de medida em ambos os casos.
- Compare os resultados obtidos nas duas experiências. Qual das montagens é a mais adequada para medir a resistência  $R$ ?

Experiências 3

- Construa o gráfico  $V$  versus  $I$ . Verifique se a relação entre  $V$  e  $I$  é linear e interprete.

### Referências

- [1] *Physics for scientists and engineers with modern physics* (4th Edition), Raymond A. Serway, Saunders College Publishing (1996)
- [2] *Física Experimental - Uma introdução*, M. C. Abreu, L. Matias, L. F. Peralta, Presença (1994)
- [3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/watcir2.html>

amperímetro sem ter de o modificar: temos sempre que incluir este aparelho de medida *dentro* do circuito, de forma que a corrente flua também através dele.

# Trabalho 6: Osciloscópio e gerador de funções

Introdução à Física Experimental - 2017/18

Cursos: Lic. Física e M. I. Eng. Física

Departamento de Física - Universidade do Minho

## Objectivos deste trabalho laboratorial:

- Familiarizar-se com os comandos dos osciloscópios (digital e analógico) e do gerador de funções.
- Utilizar o osciloscópio para visualizar diferenças de potencial (ddp) em função do tempo.
- Medir o período e a amplitude de sinais eléctricos.
- Medir a constante de tempo de um circuito RC usando o osciloscópio.

## Material necessário

- osciloscópio digital (Agilent Digital Storage Oscilloscope DSO3062A)
- osciloscópio analógico
- gerador de funções
- fonte de tensão contínua
- cabos coaxiais com entradas BNC
- fios de ligação
- placa de furos
- resistências de  $\sim 100\Omega$  e  $\sim 10\text{ k}\Omega$
- condensador de  $10\text{ nF}$

## I. O osciloscópio

O osciloscópio é um aparelho cuja principal função é a de permitir visualizar num ecrã diferenças de potencial (ddp) em função do tempo. É particularmente útil para o estudo de tensões eléctricas que variam periodicamente com o tempo.

Os primeiros osciloscópios (analógicos) eram baseados na deflexão e deteção de um feixe de electrões. Neste tipo de aparelho a deteção é realizada a visualmente quando o feixe de electrões embate num ecrã fluorescente. Nos últimos anos estes aparelhos têm vindo a ser substituídos por osciloscópios digitais, cujo princípio de funcionamento é diferente. É este segundo tipo de osciloscópio que será preferencialmente utilizado neste trabalho prático, mas deve também familiarizar-se com o osciloscópio analógico. Será útil a leitura de algumas notas sobre o funcionamento do osciloscópio analógico, que se encontram no apêndice 1 do livro "Física experimental - uma introdução" de M. C. Abreu, L. Matias e L. F. Peralta, Editorial Presença, Lisboa, 1994. Apesar do princípio de funcionamento dos dois tipos de osciloscópio ser diferente, o modo de operar com ambos os aparelhos tem muitas semelhanças.

## II. Gerador de funções

Um gerador de funções é uma fonte que fornece uma tensão variável no tempo, periódica (frequentemente designada por sinal). Um gerador de funções típico permite:

- selecionar sinais sinusoidais, quadrados ou triangulares;
- selecionar a frequência do sinal
- regular a amplitude do sinal
- acrescentar uma tensão contínua (DC) ao sinal selecionado (normalmente identificado por 'DC offset')

O gerador de funções possui normalmente duas saídas para ligação de um cabo coaxial com conector BNC. A saída principal (identificada por 'main') fornece o sinal periódico selecionado. A segunda saída, identificada por 'sync', 'aux' ou 'TTL', fornece um sinal quadrado que pode ser usado para fazer a sincronização de outro aparelho (por exemplo, um osciloscópio) com o sinal fornecido na saída principal.

## III. Exploração dos comandos básicos do osciloscópio digital

Na figura 1 apresenta-se o painel frontal do osciloscópio digital, onde é possível observar os comandos que permitem operar com o aparelho. Os procedimentos seguintes destinam-se a familiarizar-se com alguns destes comandos.

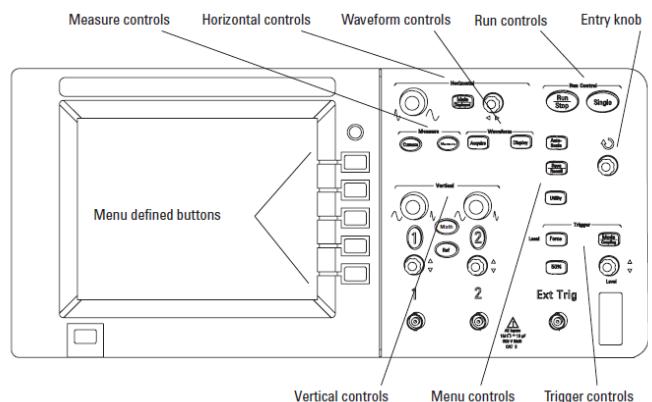
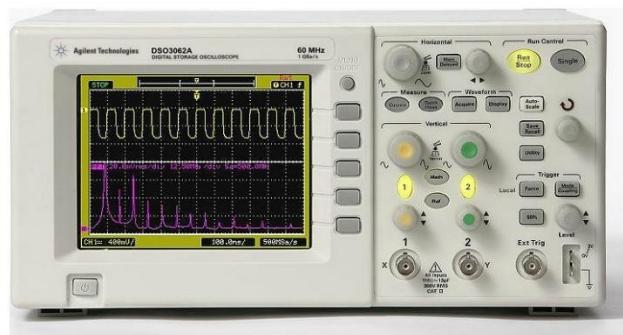


Figura 1: Fotografia (em cima) e esquema (em baixo) do painel frontal do osciloscópio Agilent Digital Storage Oscilloscope DSO3062A.

### III.1 - Modo Y-Te modo X-Y

Num osciloscópio o modo de funcionamento mais comum é o modo *Y-T*, que permite a visualização de uma tensão em função do tempo: a tensão é mostrada no eixo vertical e o tempo é mostrado no eixo horizontal. Neste modo de funcionamento é possível visualizar em simultâneo dois sinais, um em cada canal do osciloscópio. O outro modo de funcionamento, designado por modo *X-Y*, é usado para estudar uma tensão em função de outra. Neste modo de funcionamento a tensão fornecida ao canal 1 é mostrada no eixo *Y*(vertical) e a tensão fornecida ao canal 2 é apresentada no eixo *X*(horizontal).

No osciloscópio digital, prima o botão Main/Delayed e verifique que no menu apresentado é possível selecionar entre o modo *Y-T*e *X-Y* premindo o botão correspondente a Time Base. Antes de prosseguir assegure-se que selecionou o modo *Y-T*.

### III.2 - Visualização de um sinal no osciloscópio

1. Ligue o osciloscópio digital.
2. Ligue o gerador de funções, selecione um sinal quadrado com uma frequência de aproximadamente 1 kHz e regule o botão da amplitude numa posição intermédia.
3. Usando um cabo coaxial com conectores BNC em ambas as extremidades, ligue a saída do gerador ao canal 1 do osciloscópio (entrada BNC na parte inferior do painel de comandos identificada por (1) em cima e X à esquerda).
4. Prima o botão “Auto-scale” e verifique que é possível visualizar um sinal quadrado no ecrã do osciloscópio. Note que, por defeito, o osciloscópio mostra uma tensão no eixo vertical e um tempo no eixo horizontal.
5. Na parte superior do painel, à direita, existem dois botões para iniciar e parar o sistema de aquisição do osciloscópio: *Run/Stop* e *Single*

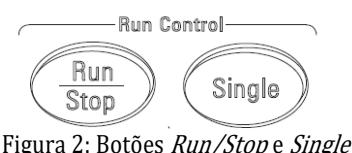


Figura 2: Botões *Run/Stop* e *Single*

Quando o botão *Run/Stop* está verde o osciloscópio está no modo de aquisição de dados. Para parar a aquisição, passando para o modo “congelado”, pressione *Run/Stop* (ao fazê-lo o botão deve ficar vermelho). Nessa altura a imagem mostrada no ecrã corresponde ao último sinal aquirido. Pressione de novo no mesmo botão para voltar ao modo de aquisição de dados. Para fazer uma única aquisição de dados, pressione o botão *Single*, (antes de atuar em *Single* o osciloscópio tanto pode estar no modo de aquisição como no modo congelado).

5. Observe o mesmo sinal mudando o cabo para o canal 2.

### III.3 - Controlos verticais

Os controlos verticais servem para definir a posição e a escala do eixo vertical, separadamente para cada um dos canais.

1. Comando de posição vertical (ver figura 3): depois de

voltar a ligar o sinal anteriormente selecionado ao canal 1, use o comando que se situa imediatamente acima da entrada do canal 1 (comando de posição vertical) para deslocar o sinal verticalmente, para cima e para baixo. Note que este procedimento apenas desvia o sinal não afetando a sua forma.

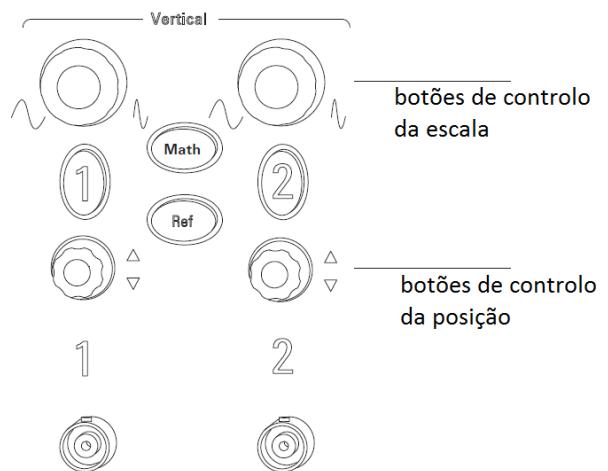


Figura 3: Controlos verticais.

2. Comando de escala vertical: rode o botão redondo acima de comando da escala vertical e verifique que a escala da tensão (por exemplo, V/div) é alterada. Note que para uma análise adequada da tensão, o sinal deve preencher o mais possível o ecrã, mas sem ultrapassar os seus limites. Note ainda que um procedimento inteiramente análogo pode ser efetuado quando o sinal é visualizado no canal 2.

### III.4 - Controlos horizontais

Os controlos horizontais são usados para definir a posição e a escala do eixo horizontal. Estas duas funções são controladas nos dois comandos redondos situados na parte superior do painel: o botão da esquerda para definir o tempo por divisão (por exemplo, s/div) e botão da direita para controlar a posição (ver Figura 4).

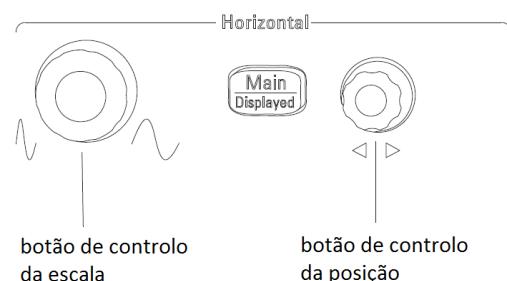


Figura 4: Controlos horizontais

Atue nos dois comandos e verifique as alterações provocadas na imagem do ecrã.

### III.5 - Controlos de disparo de sincronismo (*trigger*)

O *trigger* define quando um sinal é adquirido e armazenado em memória, sincronizando o ciclo de medida do osciloscópio com o sinal de entrada. Para isso, antes de se iniciar cada uma das medidas que permite fornecer a imagem de um sinal que preenche o ecrã, é necessário que sistema faça um tempo de espera até que o sinal atinja um nível de tensão especificado. Deste modo, as diversas imagens que são apresentadas são sempre idênticas, tornando possível apresentar uma imagem estável do sinal no ecrã.

Na figura 5 apresentam-se os botões que estão associados à função *trigger*, situados no lado direito do painel do osciloscópio.

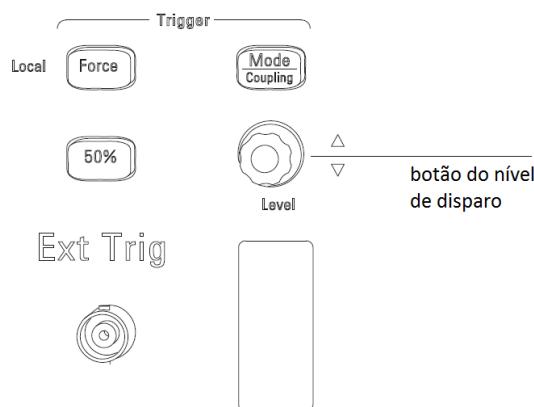


Figura 5: Controlos do *trigger*

1. Rode o botão do nível de disparo e verifique que se apresenta no ecrã: (i) o correspondente valor (no lado esquerdo, em baixo); (ii) uma linha mostrando a localização do nível de disparo. Desloque o nível do *trigger* dentro e fora da região de tensões onde está estabelecido o sinal e observe o efeito sobre a imagem apresentada.

2. Prima o botão '50%' e verifique que o nível de disparo é colocado na posição correspondente a 50% da amplitude do sinal.

3. Prima o botão 'Mode Coupling' para aceder ao menu do trigger.

4. Neste menu prima 'Mode' até selecionar a opção 'Edge'.

5. Prima 'Source' para selecionar o sinal que pretende sincronizar (canal 1, canal 2 ou externo).

6. Prima 'Slope' (declive) para selecionar se o disparo é produzido na fase ascendente (*rising edge*) ou descendente (*falling edge*) do sinal.

Nota: é possível efectuar uma aquisição mesmo numa situação em que não seja encontrado o '*trigger*', premindo o botão *Force*.

### IV. Exploração dos comandos básicos do osciloscópio analógico

Explore agora os comandos básicos do osciloscópio analógico, adaptando para este osciloscópio aquilo que já aprendeu no osciloscópio digital.

1. Comece por verificar que todas as escalas estão na posição "calibradas" (controlo CAL nos botões que seleccionam as escalas TEMPO/DIV e V/DIV)

2. Ligue o osciloscópio (POWER ON) e aguarde que aqueça (cerca de dois minutos).

3. Coloque os comandos de MODO DE ENTRADA e FONTE DE TRIGGER na posição CH1 e MODO DE TRIGGER na posição AUTO.

4. Ajuste o comando de intensidade (INTENS.) para um valor intermédio.

Nota: Nunca deixe o ponto luminoso estacionar em qualquer ponto do ecrã com demasiada intensidade. Um feixe electrónico intenso num pequeno espaço do ecrã pode danificar e inutilizar a camada fluorescente. Mantenha o feixe com baixa intensidade.

5. Ajuste o comando de focagem (FOCUS) até obter um ponto focado no ecrã.

6. Coloque o osciloscópio a funcionar em modo *X-Y* (pode selecionar os modos *Y-T* e *X-Y* rodando o botão da base de tempo (assinalado com TIME/DIV); o modo *X-Y* é selecionado quando o botão é rodado até ao fim, no sentido dos ponteiros do relógio). Ajuste o nível de tensão zero:

- coloque as entradas do canal 1 (CH1) e canal 2 (CH2) ligadas à massa, posicionando em GND os comutadores de acoplamento do sinal para esses canais.

- com os botões de deslocamento vertical (*Y*) e horizontal (*X*) coloque o ponto brilhante no centro do ecrã.

7. Coloque o osciloscópio a funcionar em modo *Y-T* (rodando o comando da BASE DE TEMPO no sentido contrário aos ponteiros do relógio) e ajuste o nível de tensão zero:

- coloque a entrada do canal selecionado (canal 1, se o MODO DE ENTRADA estiver na posição CH1, ou canal 2, se o MODO DE ENTRADA estiver na posição CH2) ligada à massa, posicionando em GND o comutador de acoplamento do sinal para esse canal;

- com o botão de deslocamento vertical, correspondente ao canal selecionado, coloque o varrimento do ponto brilhante, ou o traço contínuo, centrado no ecrã.

8. Observe o que acontece quando a BASE DE TEMPO está em 0.2s/div, 0.1s/div, 50ms/div, 1ms/div.

Nota: quando mudar a escala da base de tempo convém ajustar o nível de tensão zero (como foi descrito no ponto 7).

9. Observe um sinal quadrado com uma frequência de aproximadamente 1 kHz ligando a saída do gerador aos canais 1 ou 2 do osciloscópio (entradas BNC identificadas com CH1 - X e CH2 - Y, respetivamente). Note que pode regular as escalas do tempo (eixo horizontal) e da tensão (eixo vertical) mexendo nos botões assinalados por TIME/DIV e VOLTS/DIV, respetivamente.

Para observar uma imagem estável no ecrã é necessário que o ciclo de medida do osciloscópio esteja sincronizado com o sinal de entrada. Esta sincronização é conseguida atuando no comando do nível de disparo (TRIGGER LEVEL) e no comutador declive (SLOPE +/-).

### V – Medições com o osciloscópio

No osciloscópio digital as medidas podem ser realizadas manualmente, usando o retículo, ou automaticamente. No osciloscópio analógico apenas é possível realizar medidas com o retículo.

## V.1 – Medições usando o retículo

As medidas manuais são realizadas usando o retículo do ecrã e as escalas (tensão/div e tempo/div) escolhidas. As medidas mais precisas da amplitude do sinal são conseguidas de maneira a que este preencha o mais possível o ecrã (mas sem ultrapassar os seus limites).

A amplitude do sinal obtém-se multiplicando o número de divisões do eixo vertical correspondente à amplitude pelo fator de escala. Por exemplo:

$$\text{Amplitude} = 5 \text{ divisões} \times 1 \text{ V/div} = 5 \text{ V}$$

É mais fácil medir a tensão pico-a-pico (entre o máximo e o mínimo do sinal) e dividir por dois para obter a amplitude.

O período do sinal obtém-se de forma análoga, mas relativamente ao eixo horizontal, medindo o tempo que decorre entre, por exemplo, dois máximos:

$$\text{Período} = 5 \text{ divisões} \times 200 \mu\text{s/div} = 1 \text{ ms}$$

A frequência do sinal é igual ao inverso do período. Por exemplo:

$$\text{Frequência} = 1/(1 \text{ ms}) = 1 \text{ kHz}$$

Seguidamente propõe-se a medida das características de alguns sinais:

1. Selecione um sinal sinusoidal no gerador de funções e use o osciloscópio (digital ou analógico, ou ambos) para, fazendo as medidas adequadas, garantir que a fonte fornece um sinal de 1500 Hz com uma amplitude de 2V.
2. Repita o procedimento para um sinal triangular de 2000 Hz e amplitude de 1V. Mantenha este sinal no osciloscópio para repetir estas medidas, mas automaticamente, no próximo ponto.

## V.2 – Medições automáticas

O botão '*Measure*', situado na parte superior do painel do osciloscópio digital, entre os comandos verticais (ver figura 6), permite realizar várias medidas automaticamente.



Figura 6: botões para realizar medidas automáticas

1. Prima o botão '*Measure*'

2. No menu '*Measure*', selecione '*Source*' para escolher o canal onde se situa o sinal sobre o qual se pretende fazer as medidas.

3. Selecione '*Voltage*' (para medidas de tensão) ou '*Time*' (para medidas de tempo).

4. Prima o botão do menu para mostrar a medida da grandeza selecionada no ecrã. Na parte de baixo do ecrã aparecerá o valor das grandezas selecionadas (por exemplo, tensão pico-a-pico ( $V_{pp}$ )).

Note que é possível mostrar um máximo de três medidas no ecrã. Se selecionar uma quarta medida, esta será acrescentada à direita das anteriores, fazendo desaparecer aquela que estava mais à esquerda.

5. Usando o sinal triangular sobre o qual realizou medidas manualmente no ponto V.1, selecione as grandezas tensão pico-a-pico, período e frequência para medida automática e registe os valores.

## V.3 – Medições com os cursores

Podem ainda usar-se um ou dois cursores para ajudar a realizar medidas de tensão e tempo no osciloscópio digital.

1. Prima o botão '*Cursors*' (situado à esquerda do botão '*Measure*').
2. No menu, prima '*Mode*' até selecionar '*Track*'.
3. Prima '*Cursor A*' para selecionar o canal a que o cursor A vai estar associado (ou prima '*None*' para desativar esta função).
4. Prima '*Cursor B*' para selecionar o canal a que o cursor B vai estar associado.
5. Para deslocar os cursores selecione '*CurA*' (ou '*CurB*) e rode o seguinte botão, situado do lado direito do painel:



Os valores mostrados no ecrã são:

A -> X (valor medido pelo cursor A no eixo horizontal)

A -> Y (valor medido pelo cursor A no eixo vertical)

B -> X (valor medido pelo cursor B no eixo horizontal)

B -> Y (valor medido pelo cursor B no eixo vertical)

Quando se usam os dois cursores, também são apresentados os seguintes valores:

- DeltaX – diferença dos tempos medidos pelos cursores A e B
- 1/DeltaX – inverso do valor 'DeltaX'
- DeltaY – diferença dos valores de tensão medidos pelos cursores A e B

## VI – Observação de um sinal com componente DC

1. Monte o seguinte circuito, ligando o canal 1 do osciloscópio aos terminais da resistência (mostrado na figura 7) e o canal 2 do osciloscópio aos terminais do gerador de funções, de modo a observar os dois sinais em simultâneo. Note que é necessário colocar no mesmo ponto as terras do gerador de funções e dos dois canais do osciloscópio.

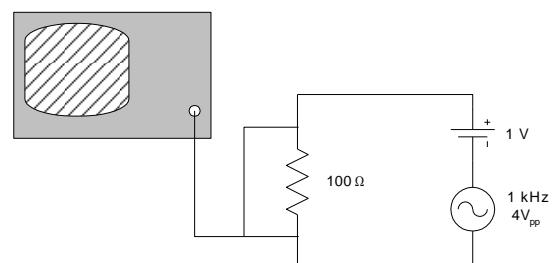


Figura 7: Circuito com fontes de tensão contínua e alternada para observação de um sinal com componente DC.

2. Coloque em DC e depois em AC o comutador de acoplamento do sinal do canal 1. Que observa?
3. Troque a polaridade na fonte de tensão contínua.
4. Coloque em DC e depois em AC o comutador de acoplamento do sinal para o canal 2. Que observa?

## VII – Medida da constante de tempo de um circuito RC

Nesta parte do trabalho irá utilizar um gerador de funções e o osciloscópio digital para determinar a constante de tempo de um circuito RC.

1. Utilizando a placa de furos, monte o circuito RC mostrado na figura 8. Use  $R=10\text{ k}\Omega$ ,  $C=10\text{ nF}$  e como tensão de entrada um sinal quadrado de frequência  $\sim 500\text{ Hz}$  e  $V_{pp}=8\text{ V}$ .

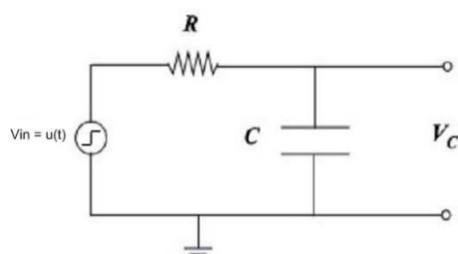


Figura 8: Circuito RC

2. Observe o sinal de entrada (do gerador) e o sinal de saída (aos terminais do condensador) nos canais 1 e 2 do osciloscópio digital, respectivamente. Não se esqueça que todas as terras têm que ser comuns. Deverá observar funções semelhantes àquelas que são apresentadas na figura 9-a.

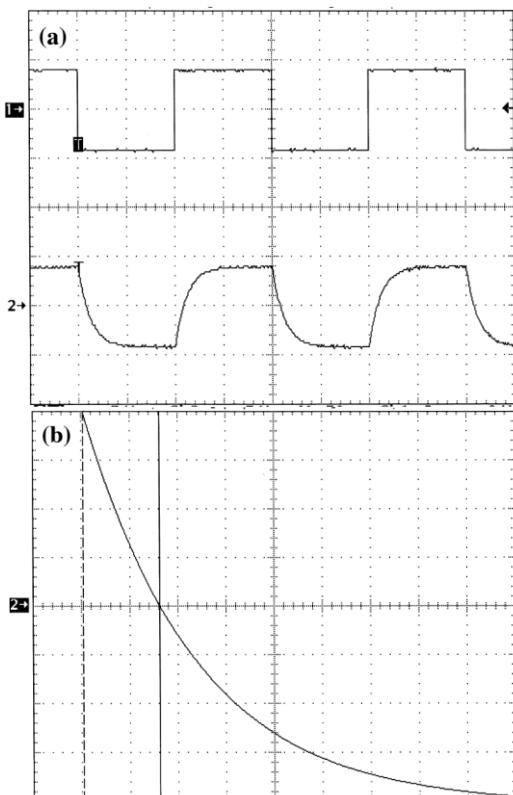


Figura 9: Medidas no osciloscópio para determinação da constante de tempo do circuito RC: (a) sinal quadrado de entrada (canal 1) e sinal de saída observado aos terminais do condensador (canal 2); (b) Ampliação das escalas do canal 2 para determinação do período de semi-descarga do condensador.

3. Desligue a visualização do canal 1 e utilize os comandos verticais e horizontais de modo a visualizar uma ampliação da tensão no processo de descarga, tal como se ilustra figura 9-b.

4. Use os cursores para medir o período de semi-descarga do condensador, isto é, o tempo que decorre até que a tensão do condensador diminua para metade do seu valor inicial (neste caso, sendo  $V_{pp}=8\text{ V}$ , a tensão correspondente ao período de semi-descarga é de  $4\text{ V}$ ).

5. Utilize o período de semi-descarga para determinar a constante de tempo e compare o valor obtido com aquele que é previsto ( $RC$ ).

Note que na descarga do condensador num circuito RC com constante de tempo  $\tau$ , a tensão varia com o tempo de forma exponencial:

$$V = V_0 e^{-t/\tau}$$

O período de semi-descarga ( $t_{1/2}$ ) corresponde a  $V=V_0/2$ :

$$V_0/2 = V_0 e^{-t_{1/2}/\tau}$$

de onde se conclui que

$$\tau = t_{1/2} / \ln 2$$

## Referências

- [1] *Física Experimental - Uma introdução*, M. C. Abreu, L. Matias, L. F. Peralta, Presença (1994)
- [2] *Agilent 3000 Series Oscilloscopes - User's and Service Guide*, Agilent Technologies, Inc., Fifth Edition (2010)

# Relatório de Amplificadores Operacionais

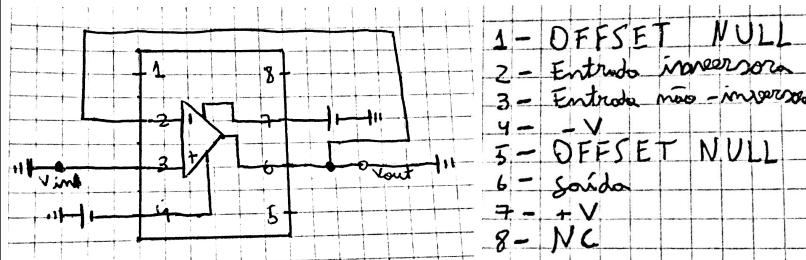
Henrique Lopes A85953 / João Basto - AE4867



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

## PONTO TEÓRICO

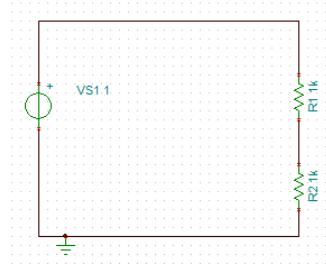
I- Apresentamos aqui em baixo a ilustração do diagrama de pinos do buffer.



II- Os ganhos que conhecemos são os de tensão, de corrente e de potência. O buffer é um amplificador de ganho unitário, não disponibiliza ganho de tensão. Contudo, visto que este teoricamente tem resistência de saída nula, leva-nos a pensar que o buffer tem um ganho de potência. O buffer tem como função manter a queda de tensão à saída igual à tensão de entrada.

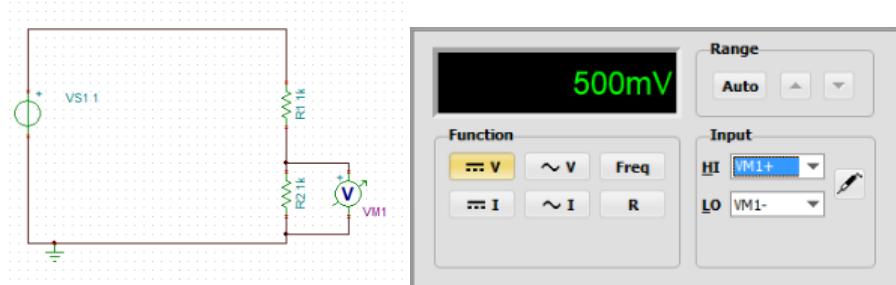
## Pergunta 1

Aqui em baixo apresentamos uma ilustração de divisor de tensão simulado no TINA.



## Pergunta 2

Como está ilustrado na imagem anterior, já foi implementada uma fonte DC de 1V. Medimos agora o valor da tensão entre as duas resistências.



O resultado é 0,5V (metade do valor de tensão da fonte) como já era esperado pela regra do divisor de tensão:

Regras gerais:

$$V_{R_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{Fonte}$$

$$V_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{Fonte}$$

$$V_{Fonte} = V_{R_1} + V_{R_2}$$

Neste caso particular:

$$V_{R_1} = \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 1k\Omega} \times 1V = \frac{1}{2} \times 1V = 0,5V$$

$$V_{R_2} = 0,5V$$

$$V_{Fonte} = 0,5V + 0,5V = 1V$$

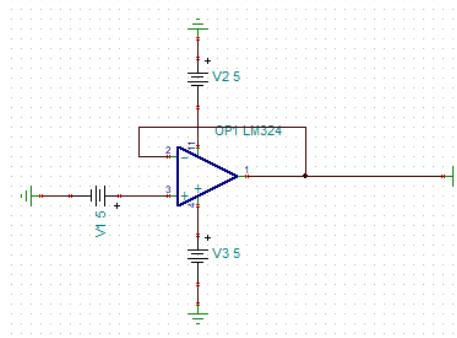
Neste caso, o valor de tensão à saída é metade do valor da tensão na fonte pois as duas resistências têm valores iguais.

## Pergunta 3

O valor de tensão na saída é metade do valor de tensão da fonte, ou seja, é 5V pela mesma razão que discutimos na pergunta anterior.

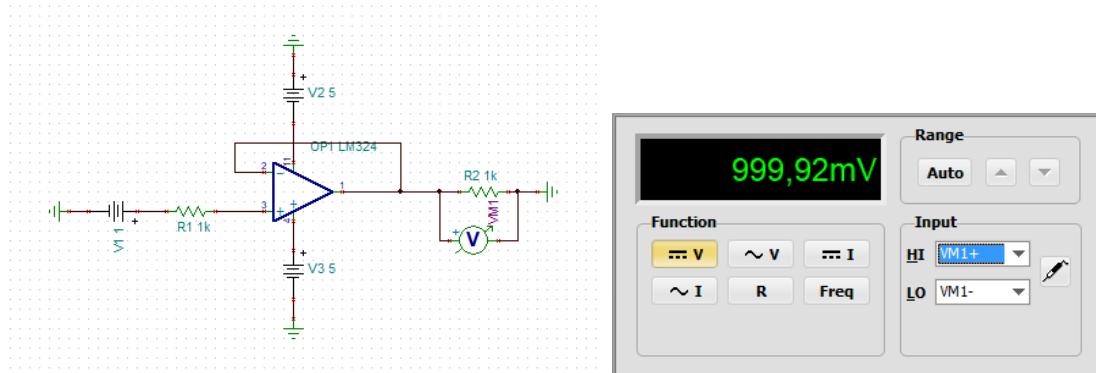
## Pergunta 4

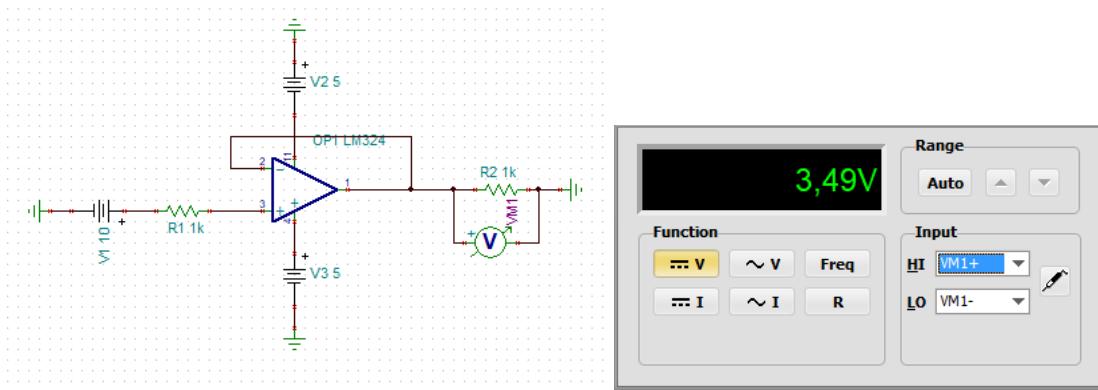
O circuito correspondente ao do ponto teórico simulado no TINA.



## Pergunta 5

Em baixo temos ambos os circuitos de um buffer com uma fonte de entrada de 1V e 10V simulados no TINA





Com uma fonte de 1V o resultado à saída é muito próximo ao valor de tensão nesta, o que seria de esperar de acordo com o que aprendemos sobre o funcionamento de um buffer. Já com uma fonte de 10V o acontecimento não se repete por uma razão simples, as fontes de alimentação. O buffer neste caso está restringido a uma tensão entre -5V e 5V, por maior que seja a fonte na entrada o valor nos terminais da resistência não se alterará se o valor das fontes de alimentação não se alterar também. Neste caso, não temos um valor mais próximo dos 5V pois o amplificador não é ideal e começa a fazer um corte de tensão mais cedo do que se esperaria. Se aumentássemos o valor da tensão nas fontes de alimentação para, por exemplo, -20V e 20V respetivamente, o valor já seria muito próximo de 10V.

## Pergunta 6

A utilidade do buffer, como pudemos observar, é a conservação de uma elevada queda de tensão à saída do circuito, conservação essa que não acontece no divisor de tensão onde se perdia (no caso que analisámos) metade do valor de tensão da fonte. Como já referido no ponto teórico, o ganho deste amplificador é de potência.

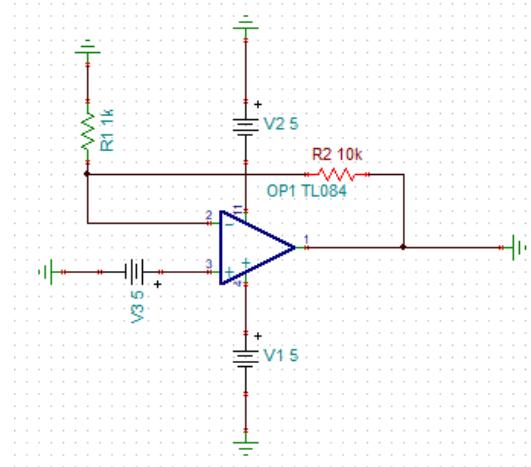
## Sobre o amplificador não-inversor

$$\begin{aligned}
 v_+ &= v_- = v_{in} \\
 i_x &= i_1 = \frac{V_{in}}{R_1} \\
 v_x &= v_o - v_- = i_x \cdot R_2 \\
 v_o &- v_{in} = \frac{R_2}{R_1} v_{in} \\
 v_o &= v_{in} + \frac{R_2}{R_1} v_{in} \\
 v_o &= \frac{R_1 + R_2}{R_1} v_{in}
 \end{aligned}$$

The diagram shows a non-inverting amplifier circuit. The input voltage \$v\_{in}\$ is connected to the non-inverting input \$v\_+\$ through a \$R\_1\$ resistor. The output \$v\_o\$ is connected to the inverting input \$v\_-\$ through a \$R\_2\$ resistor. The ground reference is at the bottom. The output \$v\_o\$ is labeled \$N\_{v\_o}\$.

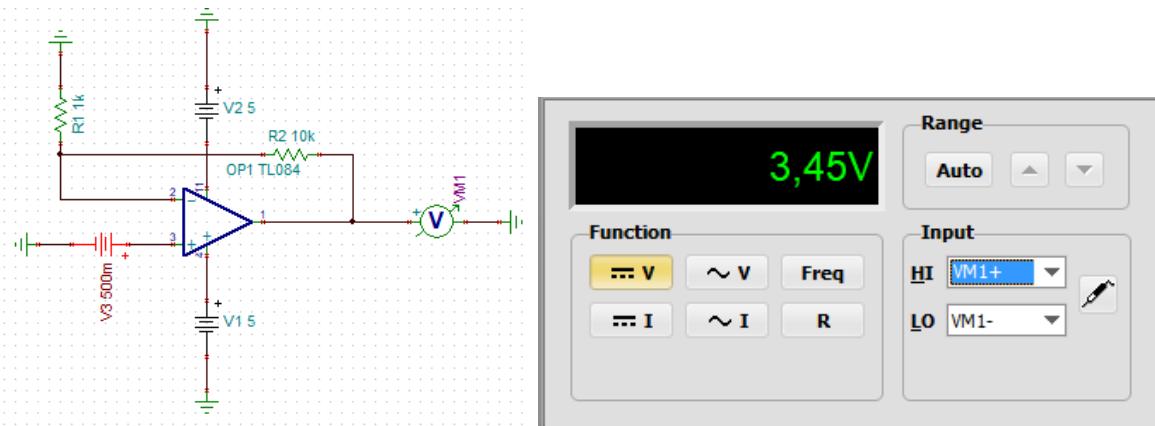
## Pergunta 7

Ilustração do amplificador não-inversor simulado no TINA.



## Pergunta 8

Agora com uma fonte de 0,5V.



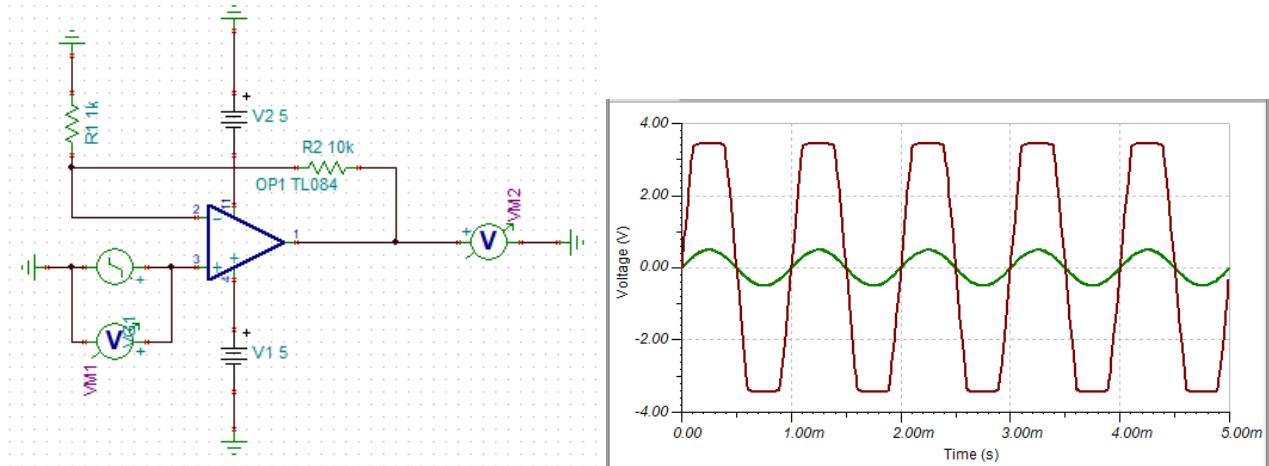
Não está de acordo com o previsto pois:

$$v_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} v_{in} = \frac{1k\Omega + 10k\Omega}{1k\Omega} \times 0,5V = 5,5V$$

Porém, o resultado obtido deve-se às fontes de alimentação com valores de tensão muito baixos que não permitem dar um valor maior à saída.

## Pergunta 9

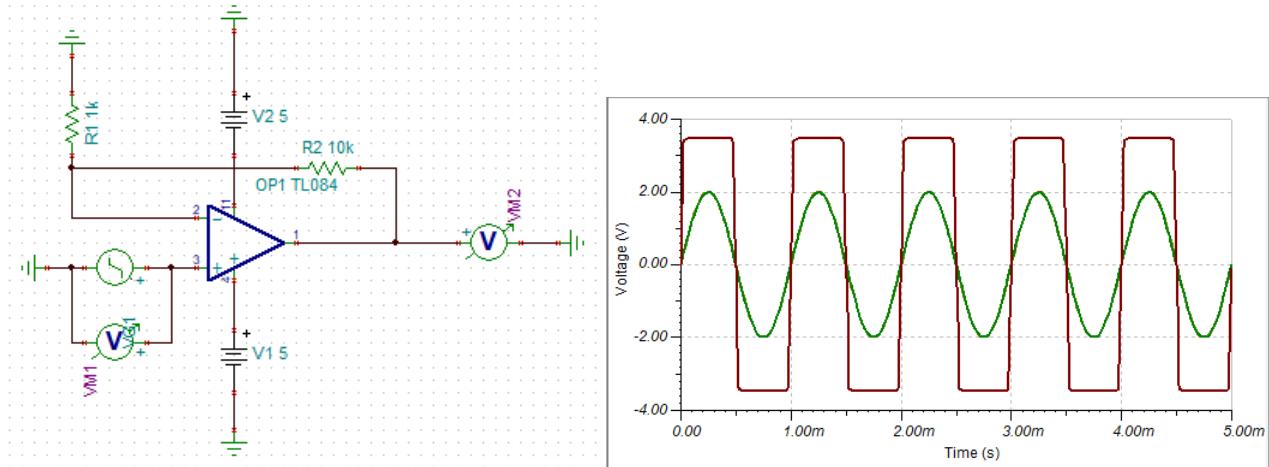
Assumindo que a onda de entrada é a onda verde e a de saída é a vermelha, temos que:



A onda de saída tem 3,45V de amplitude devido ao fenómeno de saturação provocado pelas fontes de alimentação. Num caso ideal teríamos uma amplitude de 5,5V, mesmo assim, podemos constatar a presença do efeito de amplificação.

## Pergunta 10

Assumindo igualmente que a onda de entrada é a onda verde e a de saída é a vermelha, temos que:



Neste caso, como temos uma fonte de 2V de amplitude será de esperar que a onda de saída demore menos tempo a atingir a saturação, tal como sugere o gráfico, ora vejamos:

Assumindo que o ganho é 11:

No caso da fonte de amplitude 0,5V:

$$5,5 \sin \theta = 3,45 \rightarrow \theta \approx 38,8^\circ$$

No caso da fonte de amplitude 2V:

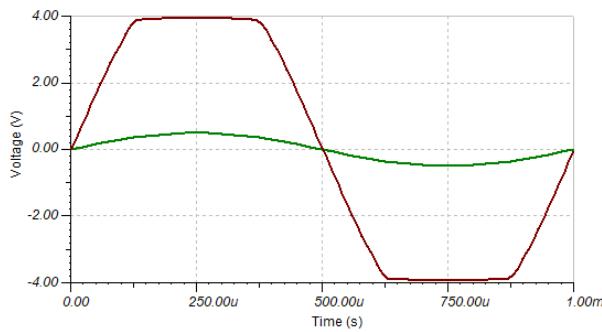
$$22\sin\theta = 3,45 \rightarrow \theta \approx 8,97^\circ$$

Vemos então que a fase para uma amplitude cada vez maior será cada vez mais pequena o que explica o facto da onda de saída ficar cada vez mais "quadrada" com o aumento da amplitude da fonte.

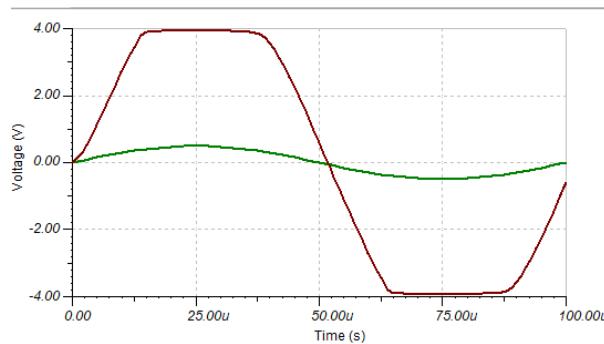
## Pergunta 11

A partir de um certo valor de frequência o sinal começa a ser atenuado. Quanto maior o valor da frequência maior é a atenuação do sinal.

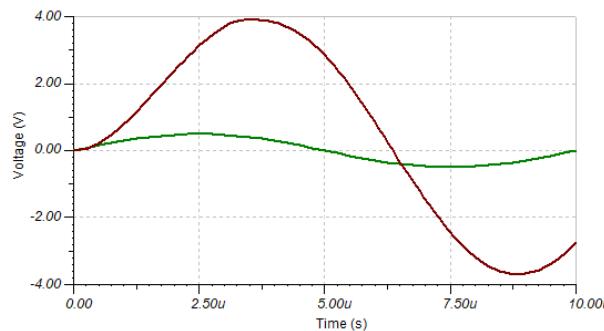
Para 1kHz pode-se verificar que a onda continua amplificada, ainda que seja limitada pelos valores de tensão da alimentação do AmpOp.



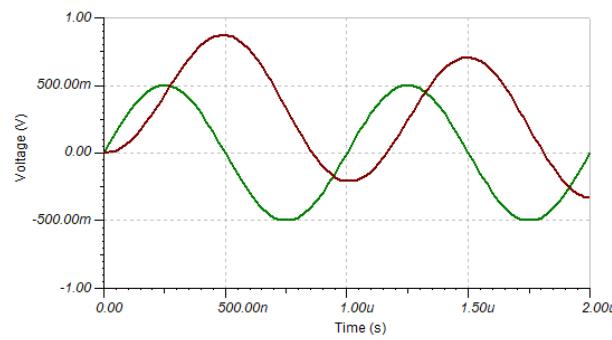
Se a frequência for aumentada para 10kHz a onda continua inalterada.



Ao aumentar a frequência do sinal de entrada para a gama dos 100kHz verifica-se uma atenuação na onda de saída e um ligeiro desfasamento.



Por fim a frequência foi aumentada para 1MHz e verificou-se que a onda de saída ainda é mais atenuada do que para frequências na ordem dos 100kHz.



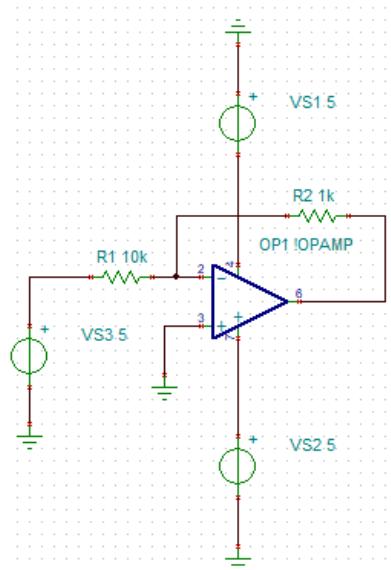
Pode-se afirmar que a atenuação é maior quanto maior for a frequência de entrada. Isto acontece porque o amp op tem uma largura de banda de funcionamento. A partir de uma certa frequência o amp op vai perdendo ganho podendo até, para frequências muito elevadas ser abaixo dos 0dB.

## Pergunta 12

O ganho desta montagem é  $A = 11$ .

## Pergunta 13

No simulador TINA o circuito tem o seguinte aspecto.

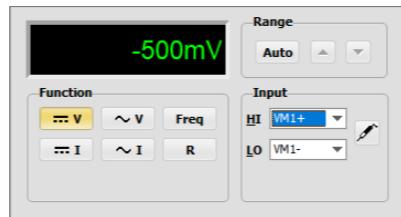


## Pergunta 14

Segundo a expressão do ganho de um amplificador inversor obtemos que o ganho é:

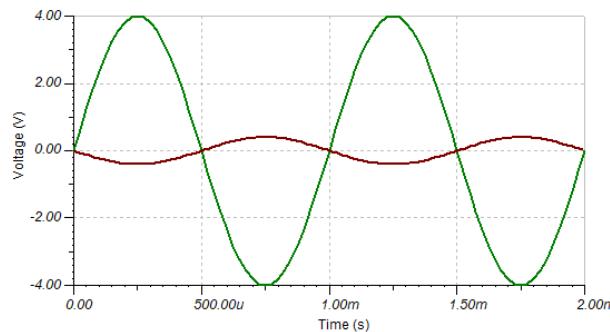
$$A = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{1k\Omega}{10k\Omega} = -0,1$$

E como  $v_{out} = v_{in} \times A \rightarrow v_{out} = -0,1 \times 5 = -500mV$  podemos verificar através da leitura do multímetro indicada na figura abaixo que o circuito se comporta como previsto.



## Pergunta 15

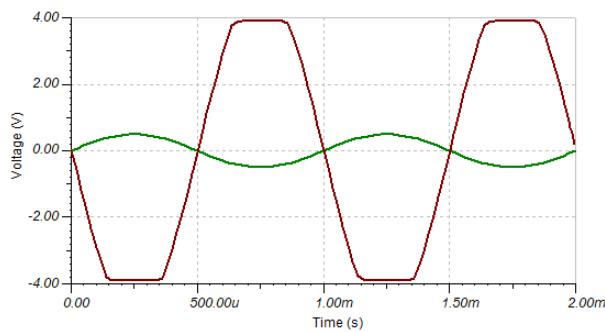
Alterando agora o sinal de entrada para uma onda sinusoidal de 4V de amplitude e 1kHz de frequência pode-se observar que o sinal na saída do amplop está invertido em relação ao sinal de entrada e que amplitude é diminuída de 4V para 400mV. Estas observações vão de encontro ao esperado visto que se trata de amplificador inversor com ganho inferior à unidade.



## Pergunta 16

Trocando os valores das resistências obtém-se  $R_1 = 1k\Omega$  e  $R_2 = 10k\Omega$ , aplicando a expressão do amplificador inversor obtém-se:

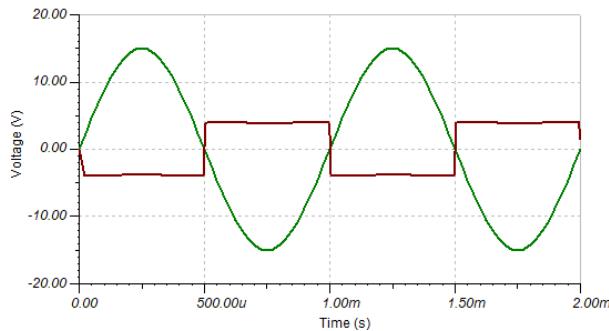
$$A = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{10k\Omega}{1k\Omega} = -10$$



Como se pode observar no gráfico os resultados estão de acordo com o previsto mas, como a onda amplificada tem amplitude superior ao valor da tensão das alimentações do amplop, pode-se verificar que a onda é “cortada” na ordem dos 4V

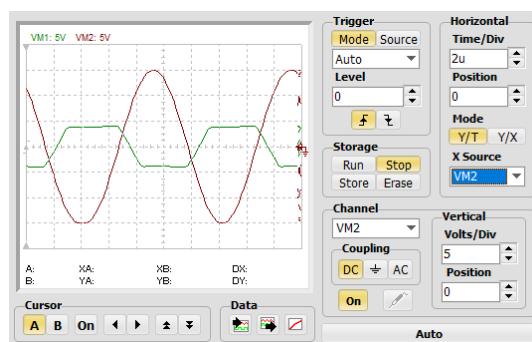
## Pergunta 17

Não havendo valor máximo de amplitude no simulador o valor foi alterado para V=15V que é aproximadamente o valor máximo de tensão que pode ser aplicada pelo Digital Lab e observou-se que a onda se transforma em algo muito parecido com uma onda quadrada de amplitude 4V (mais uma vez este “corte” nos 4V deve-se à limitação imposta pela alimentação do amplop) e invertida (ou desfasada 180°).

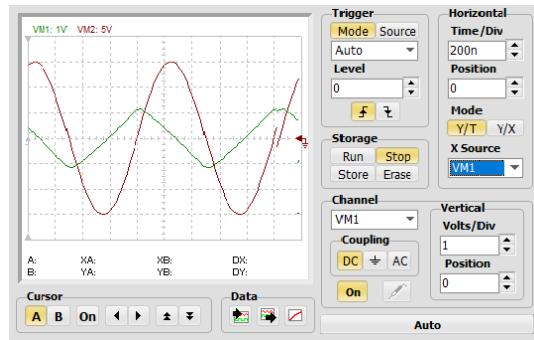


## Pergunta 18

Pode-se observar na figura abaixo que a partir dos 100kHz existe um pequeno desfasamento da onda de saída em relação à onda de entrada.



Para 1MHz é possível observar que a onda foi transformada numa onda quase triangular perfeita e atenuada para V=1V como se pode ver na figura abaixo representada.



O causador deste fenómeno é o slew rate que consiste na velocidade de resposta do amplificador a variações de tensão na entrada, pelo que para frequências muito altas o amplop não consegue processar corretamente o sinal.

## Pergunta 19

O ganho desta montagem é -10.

## Sobre o amplificador somador inversor

$$v_+ = v_- = 0$$

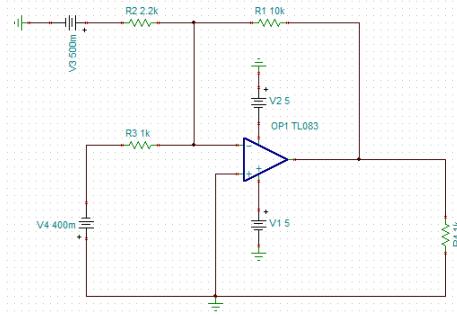
$$i_R = i_{R_1} + i_{R_2}$$

$$v_R = R \cdot i_R = R \cdot \left( \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} \right)$$

$$v_o = -v_R = -R \cdot \left( \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} \right)$$

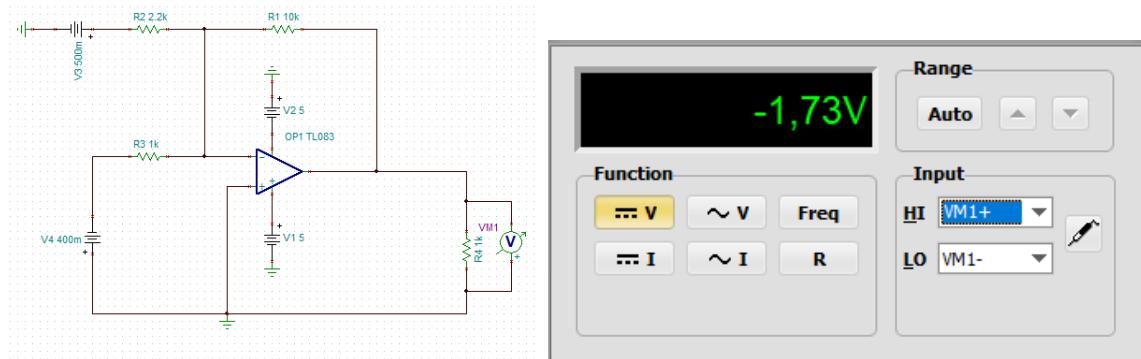
## Pergunta 20

Apresentação do amplificador somador inversor simulado no TINA com uma resistência  $R_L = 1k\Omega$ .



## Pergunta 21

Colocamos o voltímetro aos terminais da resistência  $R_L$ .

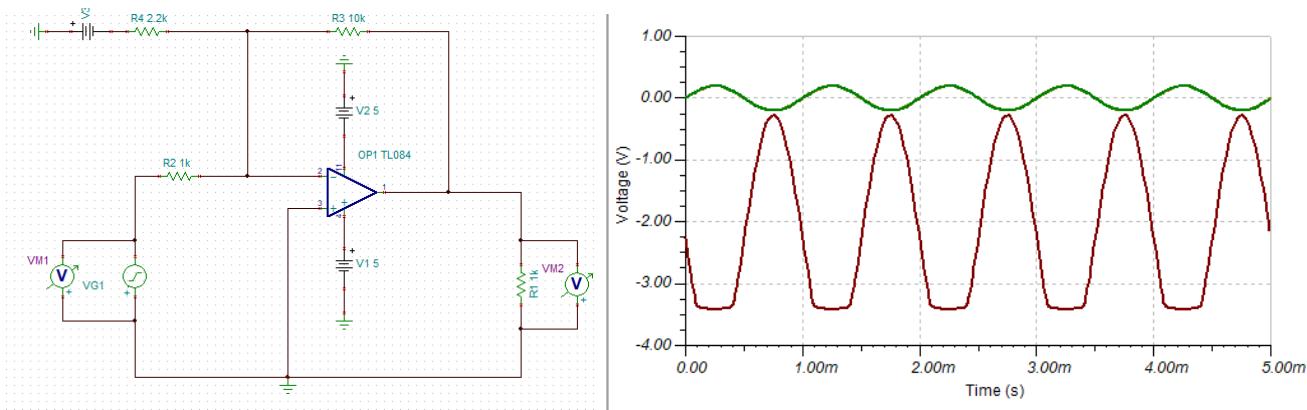


Este é o resultado que esperávamos pois:

$$v_o = -R \cdot \left( \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} \right) = -10k\Omega \cdot \left( \frac{400mV}{1k\Omega} + \frac{-500mV}{2,2k\Omega} \right) \approx -1,73V$$

## Pergunta 22

Agora acrescentando um voltímetro nos terminais da fonte. A onda verde é a onda de entrada e a vermelha é a onda de saída.



O valor máximo que a onda de saída atinge é de -0,27V tal como esperávamos, e o valor mínimo teoricamente seria -4,27V, no entanto, como é um valor muito próximo do valor da fonte de alimentação negativa esta acaba por sofrer um corte devido ao efeito de saturação.

Para -200mV:

$$v_o = -10k\Omega \left( \frac{-200mV}{1k\Omega} + \frac{500mV}{2,2k\Omega} \right) \approx -0,27V$$

Para 200mV:

$$v_o = -10k\Omega \left( \frac{200mV}{1k\Omega} + \frac{500mV}{2,2k\Omega} \right) \approx -4,27V$$

## Pergunta 23

Não, não é possível definir o ganho desta montagem porque ao contrário dos outros amplificadores que estudámos anteriormente este tem mais do que uma fonte de entrada o que impossibilita o cálculo do ganho.

## Sobre o circuito integrador

$$i_R = \frac{v_{in}}{R} = i_c$$

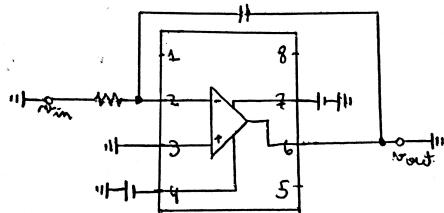
$$v_+ = v_- = 0$$

$$q = C.V$$

$$v_o = -v_c$$

## PONTO TEÓRICO

I- Apresentamos aqui em baixo a ilustração do diagrama de pinos do buffer.



II-

Para o tempo:

$$i = C \cdot \frac{dv}{dt} \rightarrow \frac{d}{dt} v_c = \frac{1}{C} \cdot i_c \rightarrow \int \frac{d}{dt} v_c = \int \frac{1}{C} \frac{v_{in}}{R} \rightarrow$$

$$\rightarrow v_c(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t v_{in}(t) dt + v_o(0) \rightarrow v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{in}(t) dt + v_o(0)$$

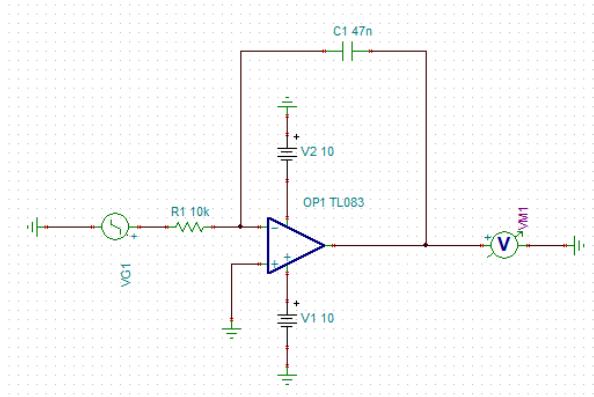
Para a frequência:

$$v_c = i_c \cdot Z_c \rightarrow i_c = \frac{v_c}{Z_c} \rightarrow \frac{v_c}{Z_c} = \frac{v_{in}}{R} \rightarrow v_c = \frac{v_{in}}{R} \cdot Z_c \rightarrow v_o = -\frac{v_{in}}{R} \cdot Z_c \rightarrow$$

$$\rightarrow v_o = -\frac{v_{in}}{R} \cdot \frac{1}{j\omega C} \rightarrow v_o = -\frac{1}{j2\pi RCf} \cdot v_{in}$$

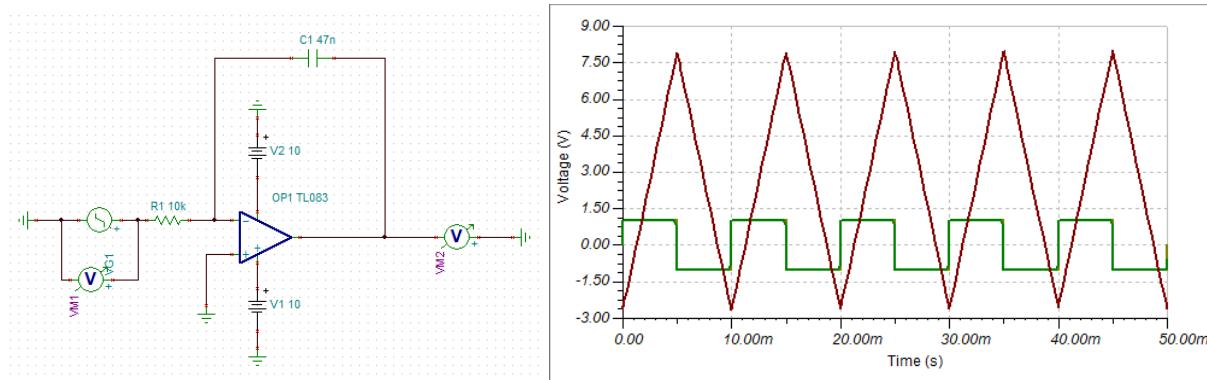
## Pergunta 24

Circuito integrador simulado no TINA.



## Pergunta 25

Implementamos uma onda quadrada à entrada e assumimos que a onda verde é a da entrada e a vermelha é da saída.

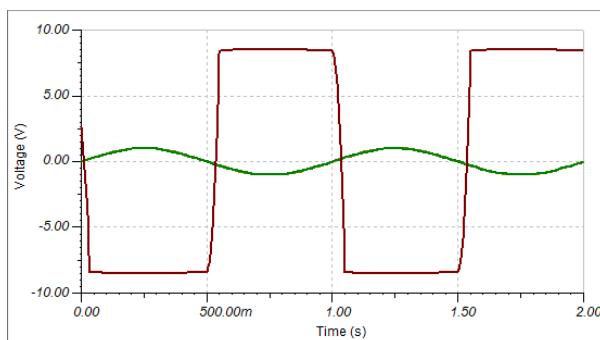


Como a onda de entrada é genericamente um conjunto retas que alternam a sua direção (x e y) no tempo então é normal que se pense que o que acontece é uma integração dessas mesmas retas sem declive que representam a onda de entrada. A equação de uma reta sem declive é simplesmente uma constante. Como sabemos quando se integra uma constante o resultado é essa mesma constante multiplicada pela variável que se está a integrar, o que faz com que essa constante se torne o declive da reta resultante da integração. As retas sem declive que compõem o sinal de entrada quando integradas pelo circuito resultam noutro conjunto de retas com declive que formam o sinal de saída, ficando com o aspeto que podemos observar na imagem.

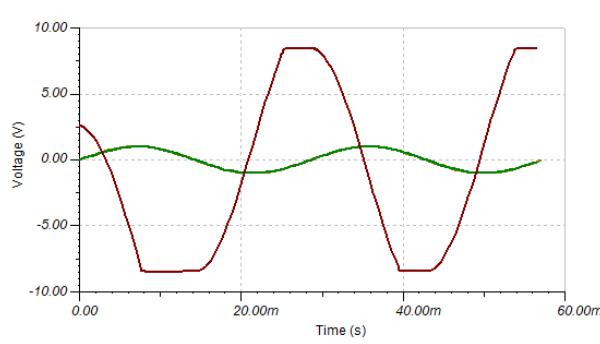
## Pergunta 26

Colocando agora uma sinusóide como sinal de entrada, sinal este representado sempre a verde, fizemos variar as frequências:

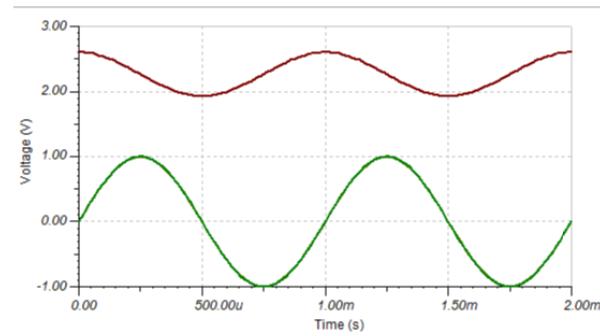
Para uma frequência de 1Hz:



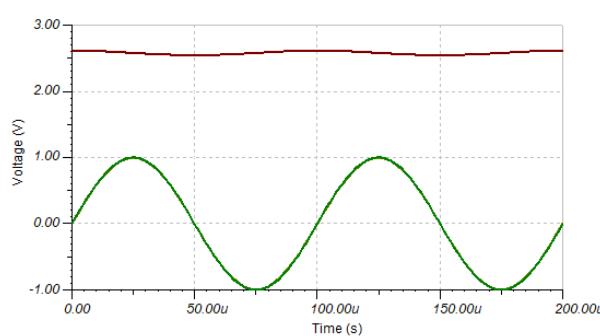
Para uma frequência de 35Hz:



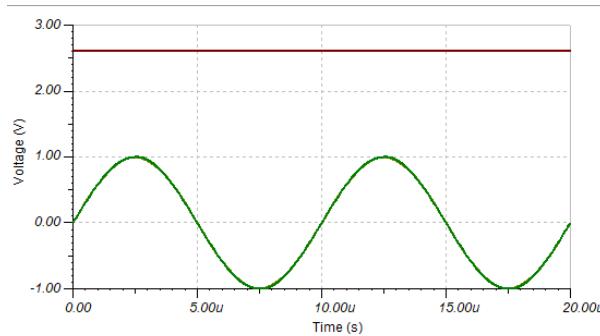
Para uma frequência de 1kHz:



Para uma frequência de 10kHz:



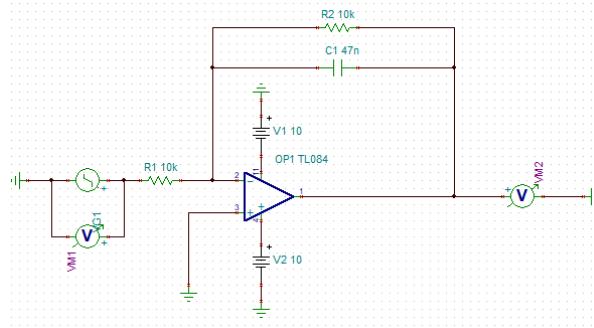
Para uma frequência de 100kHz:



De acordo com a fórmula do ganho para a frequência, já se esperaria que a onda de saída ficasse cada vez mais achatada com o aumento da frequência. Ainda na onda de saída podemos ver que esta toma a forma de uma função cosseno pois é o resultado da integração da função seno correspondente à onda de entrada.

## Pergunta 27

Agora colocando uma resistência de  $10k\Omega$  em paralelo, procedemos à mesma metodologia da pergunta anterior para explorar o efeito desta mesma resistência.



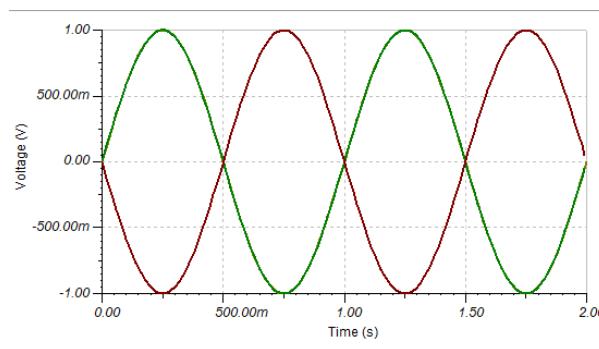
Repare-se que com a resistência em paralelo, o calculo do ganho é diferente, pois sendo esta  $R_1$ :

$$G = -\frac{Z_c \cdot R_1}{R \cdot (Z_c + R_1)}$$

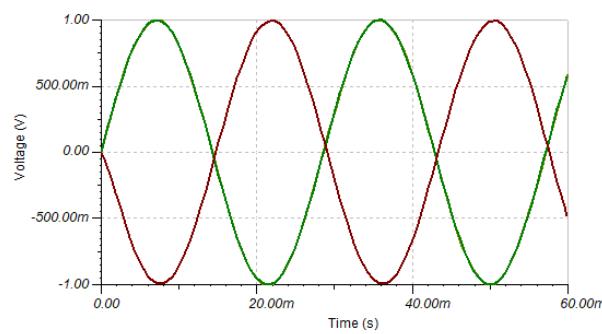
e para uma frequência de 1Hz:

$$G \approx 1$$

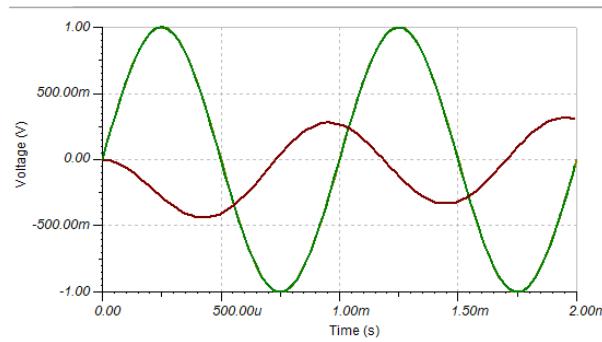
Para uma frequência de 1Hz:



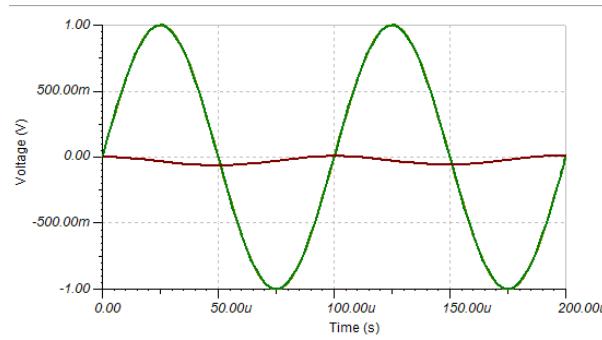
Para uma frequência de 35Hz:



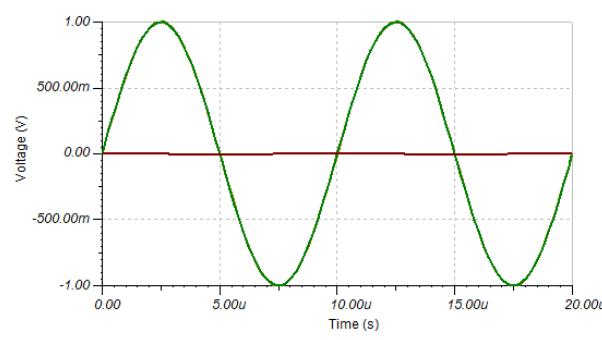
Para uma frequência de 1kHz:



Para uma frequência de 10kHz:



Para uma frequência de 100kHz:



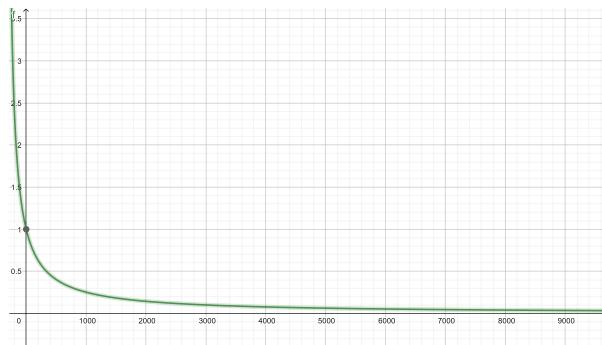
Notamos que a resistência tem uma forte contribuição para anular o efeito de saturação do amplificador, o que é evidente em ondas de entrada de frequência baixa e consequentemente um ganho elevado.

## Pergunta 28

Apresentamos um gráfico da resposta em frequência deste circuito, onde o eixo do y corresponde ao ganho tendo o valor máximo muito próximo de 1dB e o eixo do x corresponde à frequência em Hz.

A equação do ganho em função da frequência desta montagem:

$$G(f) = (1 + 2,953 \times 10^{-3} f)^{-1}$$



## Pergunta 29

Frequência de corte:

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10k\Omega \cdot 47 \times 10^{-9}} \approx 338,6 \text{ Hz}$$

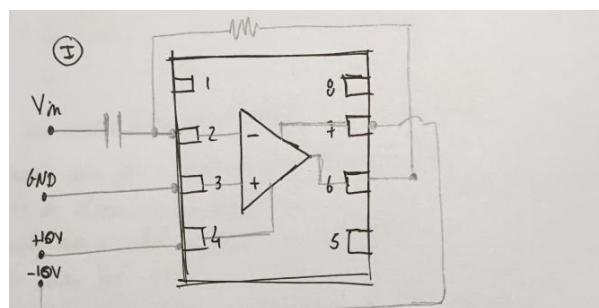
A largura de banda é o intervalo [0;338,6] dB.

## Pergunta 30

O circuito integrador que estudámos denomina-se desta forma pois este consegue transformar a onda de entrada numa versão integrada dessa mesma onda à saída. Ou seja, qualquer onda que seja colocada à entrada, o circuito vai fazer a integração da função dessa onda e o resultado dessa integração originará outra função que corresponde à função apresentada na onda de saída.

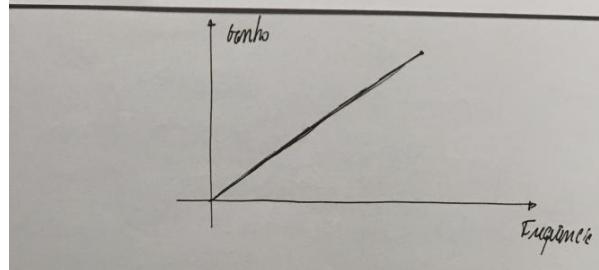
## PONTO TEÓRICO

Ambas as perguntas respondidas na seguinte imagem.



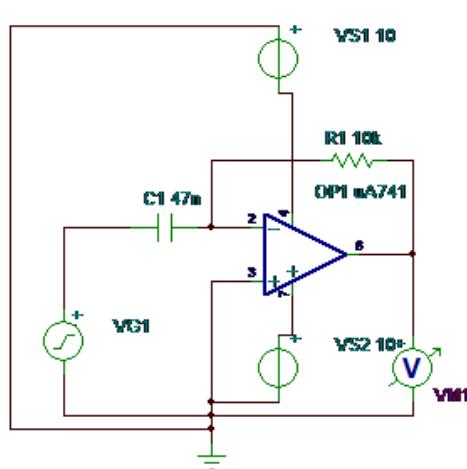
$$\textcircled{I} \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{Z_R}{Z_C}}{\frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C}} = R \cdot \omega \cdot C = 2\pi f R C \Leftrightarrow$$

$\Leftrightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{f}{f_c}$  como a frequência de corte ( $f_c$ ) toma um valor constante o ganho será diretamente proporcional à frequência.



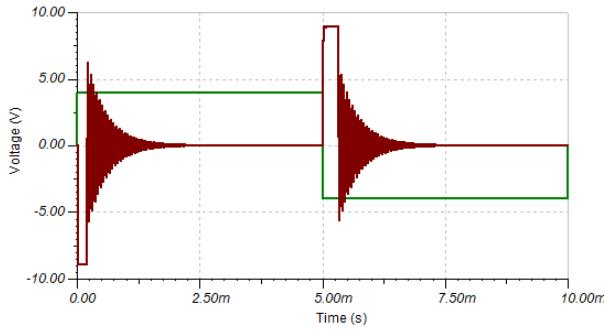
### Pergunta 31

O circuito no simulador tem o seguinte aspeto.



## Pergunta 32

Estando perante um circuito amplificador diferenciador (derivador) ao ser colocada uma onda quadrada na entrada seria de esperar que na saída o valor fosse sempre 0V, pois como estamos perante uma onda quadrada os valores são sempre constantes e a derivada de uma constante é sempre 0. No caso do simulador não se verifica bem o esperado, pode-se verificar que há uma série de variações na saída quando a onda de entrada comuta do semi-ciclo positivo para o semi-ciclo negativo (e vice-versa), provocando este efeito de “funil”. Este fenómeno deve-se, muito possivelmente, à maneira como a onda quadrada é produzida dentro do simulador.



## Pergunta 33

Através das seguintes fórmulas podemos proceder ao estudo do circuito amplificador derivador.

$$V_{out} = -(RC \times \frac{d(V_{in})}{dt})$$

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \frac{f}{F_{IC}}$$

$$V_{in} = A \sin(2\pi ft)$$

$$\begin{aligned} V_{out} &= - \left( RC \times \frac{d(A(V) \sin(2\pi ft))}{dt} \right) \\ &= -(RC \times 2\pi f A(V) \cos(2\pi ft)) \\ &= -(RC \times 2\pi f A(V) \sin(2\pi ft + \frac{\pi}{2})) \\ &= \frac{f}{F_{IC}} \times \sin(-2\pi ft - \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

Como sabemos que a expressão para calcular a frequência de corte ( $F_{IC}$ ) é:

$$F_{IC} = \frac{1}{2\pi RC}$$

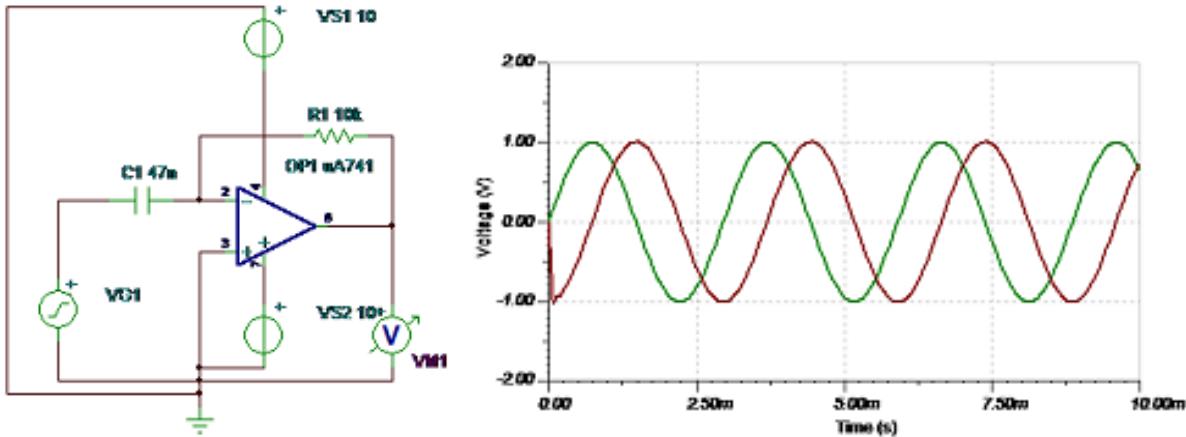
Podemos calcular a frequência de corte para os nossos valores de resistência e condensador ( $R=10k$ ;  $C=47nF$ ):

$$\frac{1}{2\pi \cdot 10k \cdot 47nF} \approx 338,67Hz$$

Ao substituir este valor na expressão acima (para o nosso A=1V):

$$\frac{f}{F_{IC}} \times \sin(-2\pi ft - \frac{\pi}{2})$$

Por esta última expressão podemos facilmente ver pelo que está entre parênteses que a onda de saída será uma onda desfasada 90° (/2 rad) em relação à onda de entrada. A montagem no simulador tem o seguinte aspecto e para uma frequência f=338,63Hz obtivemos o gráfico ilustrado na figura abaixo.



A onda obtida é exatamente igual à onda que obteríamos pela derivação de uma função seno (verde) em relação ao tempo, que nos daria uma função cosseno (vermelho).

### Pergunta 34

Ao colocar a resistência no circuito, em primeiro lugar vamos estar a alterar o ganho da montagem, da seguinte forma:

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{Z_{out}(R_2)}{Z_{in}(R_1 + C)} = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} = -R_2 \times \frac{1}{R_1(1 + \frac{1}{j\omega CR_1})} = -\frac{R_2}{R_1} \times \frac{j\omega CR_1}{1 + j\omega CR_1}$$

Para:

$$\omega = 2\pi f$$

$$F_{IC} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Para frequências baixas:

$$A_{v0} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$A_v = A_{v0} \times \frac{j \frac{f}{F_{IC}}}{1 + j \frac{f}{F_{IC}}}$$

$$A_\theta = A_{v0\theta} + \left( j \frac{f}{F_{IC}} \right)_\theta - \left( 1 + j \frac{f}{F_{IC}} \right)_\theta$$

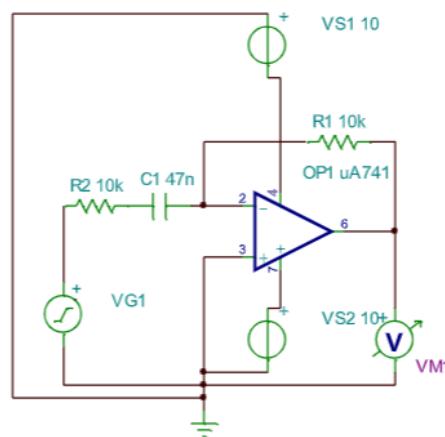
$$A_\theta = 180^\circ + 90^\circ - \tan^{-1} \left( \frac{f}{F_{IC}} \right)$$

$$A_\theta = 270^\circ + -\tan^{-1} \left( \frac{f}{F_{IC}} \right)$$

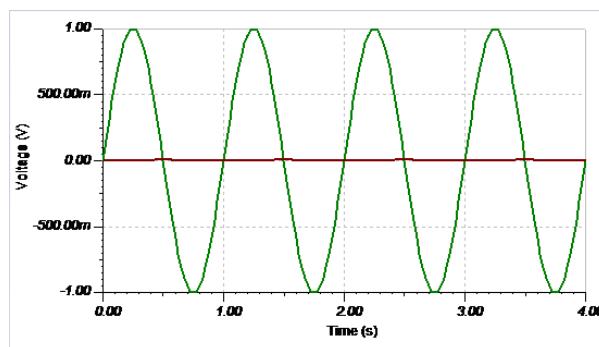
O módulo do ganho:

$$|A_v| = |A_{v0}| \times \frac{\frac{f}{F_{IC}}}{\sqrt{1 + \frac{f}{F_{IC}}^2}}$$

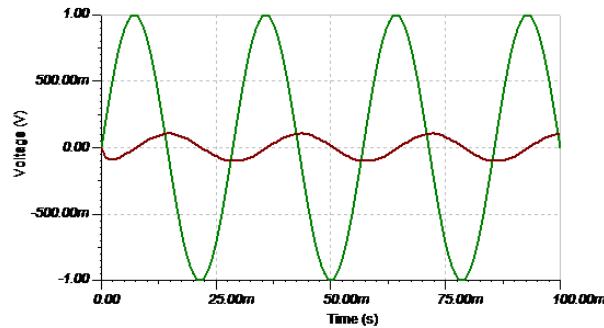
No simulador a montagem tem o seguinte aspeto:



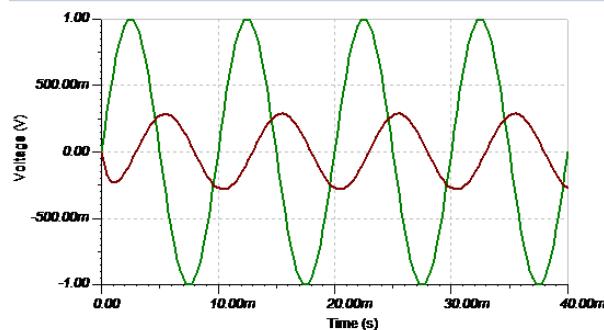
Para 1Hz:



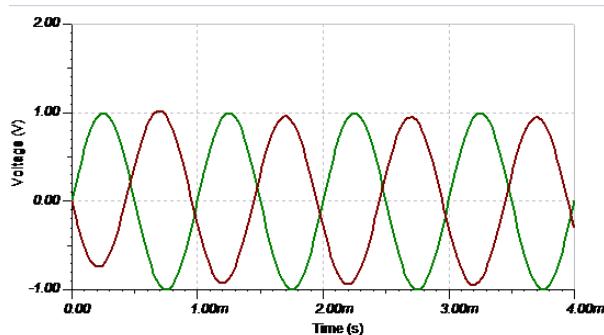
Para 35Hz:



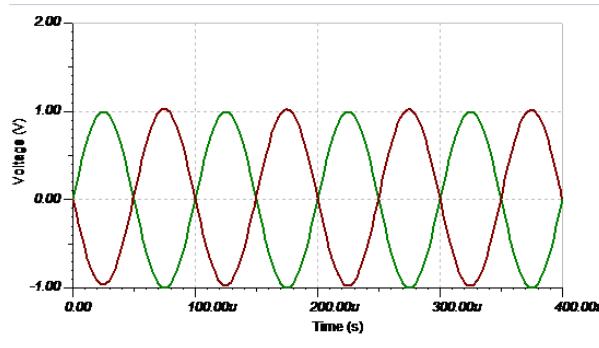
Para 100Hz:



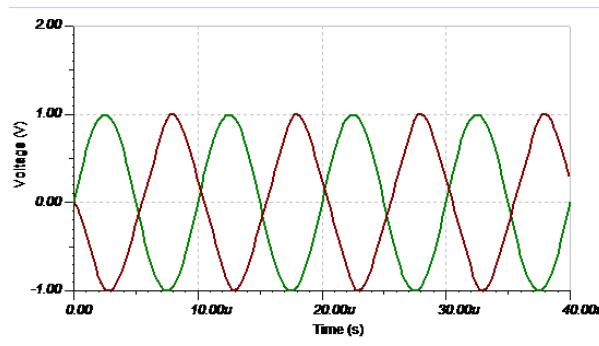
Para 1kHz:



Para 10kHz:



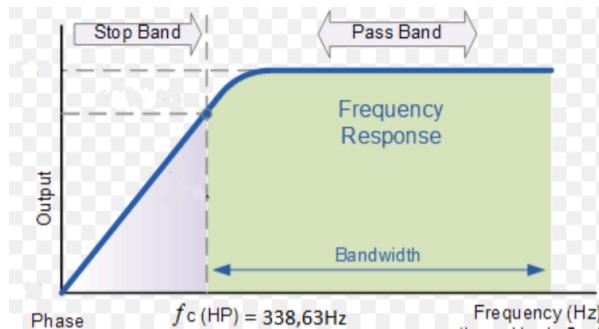
Para 100kHz:



Podemos assim verificar que a onda de saída estará  $90^\circ$  desfasada da onda de entrada. A resistência altera o ganho da montagem, para frequências elevadas, e a sua frequência de corte.

## Pergunta 35

Pelo estudo dos gráficos obtidos na alínea anterior podemos verificar que o circuito se comporta como um filtro passa-alto de  $f_c=338,63\text{Hz}$ , pelo que a resposta em frequência será:



## Pergunta 36

A frequência de corte será  $f_c=338,63\text{Hz}$ , mas a sua largura de banda não será infinita. Isto acontece porque o próprio ampop para frequências muito elevadas volta a comportar-se como um filtro passa-baixo, podemos portanto dizer que estamos perante um circuito passa-banda.

## Pergunta 37

Podemos através de todos os resultados verificar, como já referido anteriormente, que o nome deste circuito se deve ao facto de este à saída apresentar a onda da função derivada da função da onda de entrada, para as frequências adequadas para que isso ocorra.

## Pergunta 38

Como também já foi referido anteriormente o ganho dependerá da frequência da onda de entrada. A expressão que nos permite calcular o ganho é a seguinte:

$$|A_v| = |A_{v0}| \times \frac{\frac{f}{F_{IC}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{F_{IC}}\right)^2}}$$

$$|A_r| = \frac{R_1}{R_2} \times \frac{\frac{f}{f_k}}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{f}{f_k}\right)^2}}$$

No caso do nosso circuito  $R_1 = 10k\Omega$ ,  $R_2 = 10k\Omega$ ,  $C = 47nF$  e  $f_k = 338,63\text{Hz}$ . A partir destes valores é possível determinar o ganho da montagem para cada frequência.

# Relatório de Circuitos Digitais - TP2

Henrique Lopes - A85953 / João Basto - AE4867



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

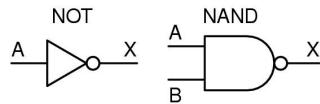
## Introdução

Com a realização deste trabalho experimental é pretendido adquirir conhecimentos relativos à utilização de portas lógicas (NOT, AND, OR, NAND e NOR) e Flip-Flops, na eletrónica, usando para esse efeito Circuitos Integrados (CI's). Os Circuitos Integrados são componentes de carácter eletrónico que contêm no seu interior um conjunto de portas lógicas e/ou flip-flops, existindo uma grande variedade de CI's no mercado. Pode ser tomado conhecimento, neste trabalho, das funcionalidades destes componentes no dia a dia de cada pessoa, desde a área da computação à área da saúde. Após a conclusão deste trabalho deverá ser possível examinar circuitos lógicos básicos, conhecer a simbologia convencional, construir circuitos utilizando CI's, dimensionar circuitos digitais, utilizar os conceitos estudados sobre álgebra de Boole (anexo), analisar o comportamento de uma LATCH SR e verificar o funcionamento de circuitos sequenciais com base em Flip-Flops. Para a realização deste trabalho foi utilizado o simulador TINA, simulador que contém todos os componentes que seriam utilizados em laboratório físico (CI 74LS00(NAND quadrupla e 74LS74(flip-flop D).



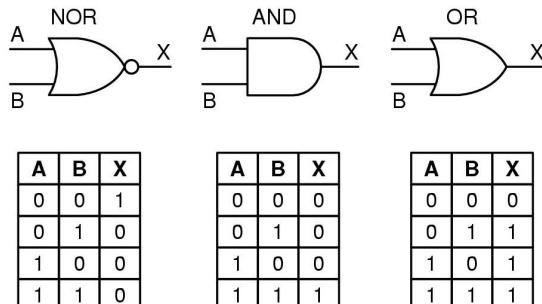
## Portas lógicas - PONTO TEÓRICO (aula 1)

Existe vários tipos de portas lógicas, dentro desta variedade existem as portas NOT, AND, OR, NAND e NOR, das quais são mostradas as tabelas de verdade de cada uma delas na figura abaixo.



A	X
0	1
1	0

A	B	X
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

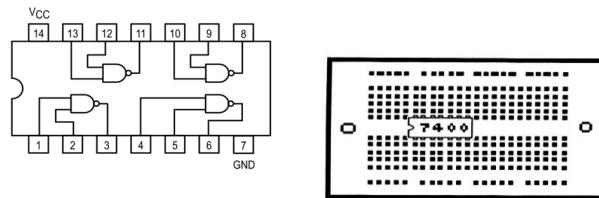


A	B	X
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

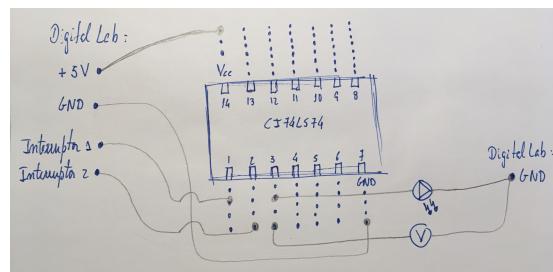
A	B	X
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

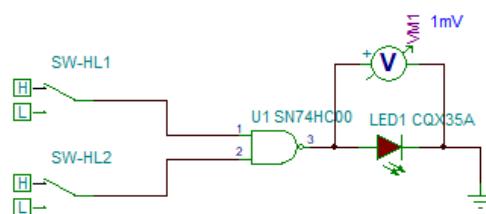
- Nas seguintes imagens pode ver-se o pinout do CI74LS00 e pode verificar-se que é composto por quatro portas NAND.



2) O LED pode ser ligado diretamente à saída do NAND, mas de modo a preservar o funcionamento do LED é mais seguro colocar uma resistência de modo a que a tensão não caia toda no LED e que, neste modo, a corrente a circular no mesmo não seja demasiado alta. Neste caso, como foi utilizado um simulador, o LED foi ligado diretamente na saída do NAND. Num laboratório físico, utilizando um Digital Lab e uma breadboard, o esquema de montagem seria idêntico ao esquema ilustrado na figura abaixo.



3/4) Na montagem virtual, feita no simulador TINA, é mais simples a utilização direta de uma gate NAND, tanto para fazer a montagem como fazer a leitura dos valores de tensão na saída do pino 3. A montagem está ilustrada na figura abaixo. É possível verificar que para um estado lógico “0” a tensão de saída do pino 3 é 1mV enquanto que para um estado lógico “1” a tensão de saída do pino 3 é 4,99V.



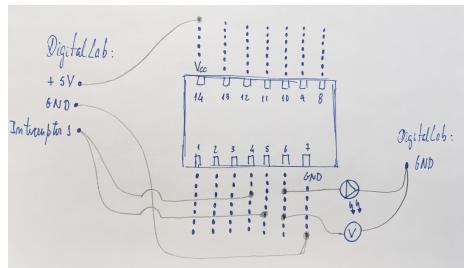
ENTRADAS		SAÍDA	
Sinal lógico: PINO 1	Sinal lógico: PINO 2	Tensão: PINO 3	Sinal lógico: PINO 3
0	0	5V	1
0	1	5V	1
1	0	5V	1
1	1	1mV	0

Figura E1 – Resposta à questão 4.

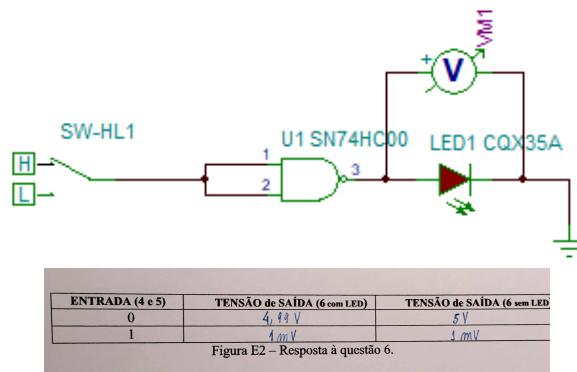
5) Alternando os interruptores entre “0” e “1”, testando todas as possibilidades, obtemos a seguinte tabela de verdade e podemos afirmar que se comporta como uma porta NAND.

A	B	X
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

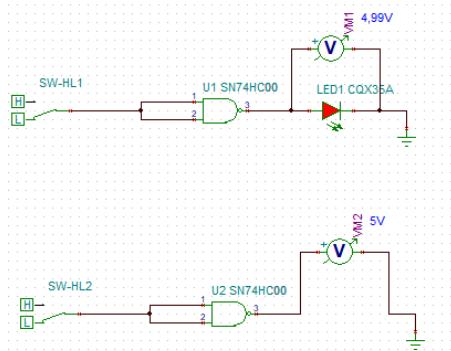
6) Uma porta NAND pode também ser convertida numa porta NOT ligando o mesmo interruptor às duas entradas da porta NAND. Mais uma vez é ilustrado o esquema de como seria a montagem num laboratório físico.



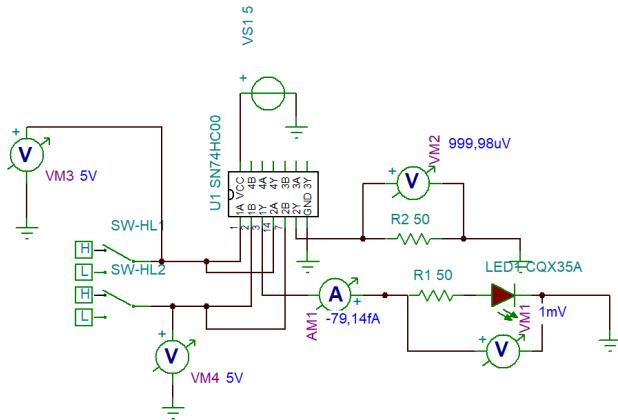
No simulador utilizamos o mesmo método utilizado em cima para verificar que se tratava de uma porta NAND mas, desta vez, para verificar que se comporta como uma porta NOT e para provar que um NAND pode ser utilizado como um NOT.



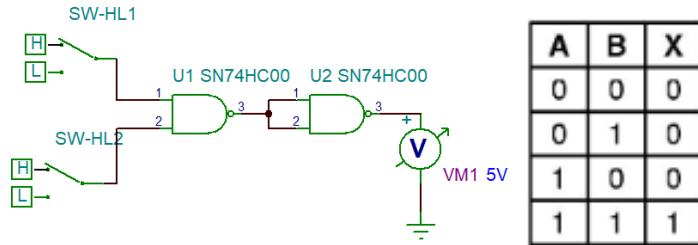
7) Foi possível também verificar que, utilizando o LED, os valores de tensão na saída do pino 3 são ligeiramente inferiores do que se nada estiver ligado. Isto é algo que já se esperava devido a uma resistência contida no LED. O LED para funcionar necessita de energia, pelo que vai automaticamente ter que cair alguma tensão no LED.



Como se pode ver na figura a tensão utilizando o LED é ligeiramente mais baixa. Fazendo uma simulação mais aproximada com a realidade e utilizando um CI74LS74 no simulador obtemos para as duas montagens anteriores o seguinte esquema.

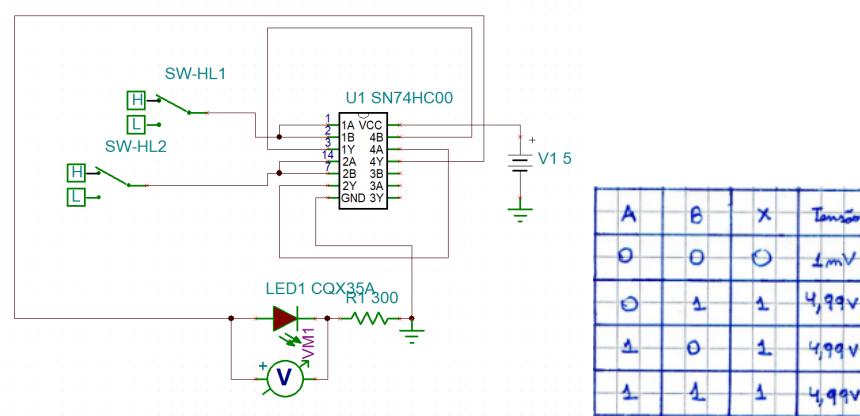


8) Foi implementado o seguinte circuito fazendo ligação do pino 3 aos pinos 4 e 5, lendo assim os valores de tensão na saída do pino 6.



9) Alternando os valores entre “0” e “1” para todas as possibilidades obtém-se a tabela de verdade idêntica ao de uma porta AND. Podemos então afirmar que com este circuito foi montada uma porta AND apenas com portas NAND.

10) Circuito representativo de uma porta lógica simulado no TINA e a sua respetiva tabela com os valores de tensão.



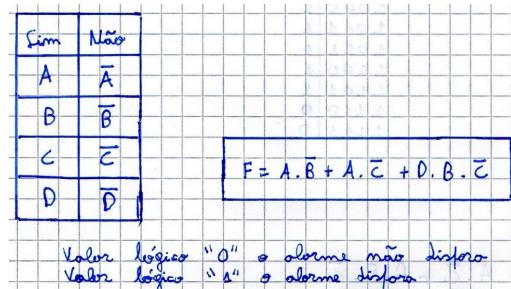
11) A porta lógica é um OU.

12) A porta NAND é considerada uma "porta universal", pois, a partir desta consegue-se elaborar todas as outras portas lógicas.

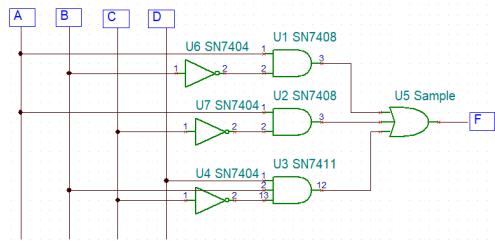
## PONTO TEÓRICO (aula 1)

I)

- A: RC ultrapassa um determinado valor.  
B: Medicado com soro HL7.  
C: Medicado com comprimidos RS232.  
D: Nível de SpO2 inferior a um determinado valor.



II e III) Aqui temos o circuito lógico simulado no TINA.

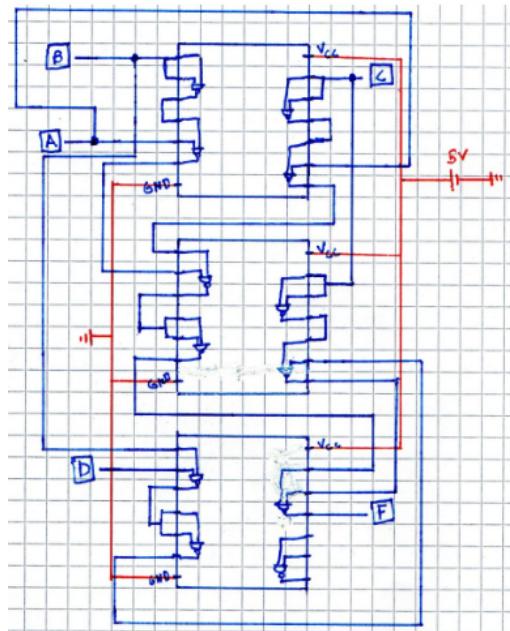


IV) Em baixo temos a tabela de verdade do circuito simplificado. Os resultados foram retirados do TINA e estam teoricamente de acordo com os resultados da função lógica.

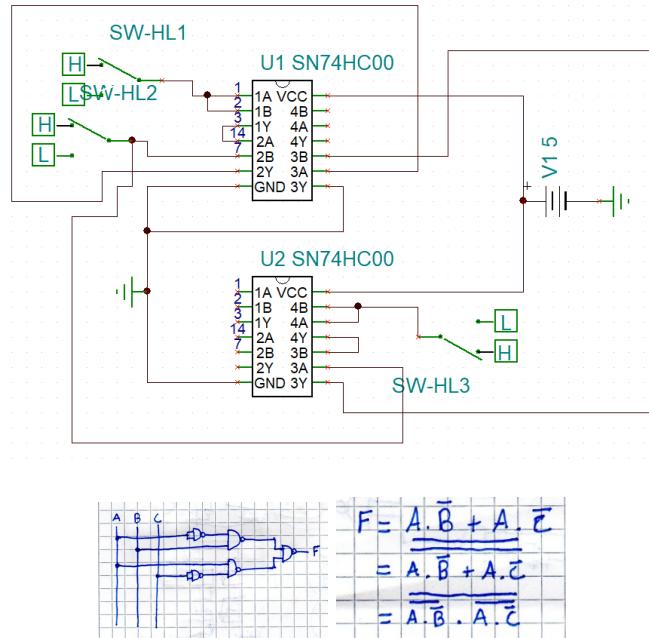
0000	0	1010	1
0001	0	1000	1
0010	0	1001	1
0011	0	1011	1
0100	0	1100	1
0101	1	1101	1
0110	0	1110	0
0111	0	1111	0

V e VI) Em baixo temos a função lógica simplificada de modo a podermos usar apenas portas NAND e também o diagrama de pinos do circuito lógico.

$$\begin{aligned}
 F &= A \cdot \overline{B} + A \cdot \overline{C} + D \cdot B \cdot \overline{C} \\
 &= \overline{A \cdot B} + \overline{A \cdot C} + \overline{D \cdot B \cdot C} \\
 &= \overline{A \cdot \overline{B}} \cdot \overline{A \cdot \overline{C}} \cdot \overline{D \cdot B \cdot \overline{C}}
 \end{aligned}$$



13) Aqui temos a ilustração do circuito simplificado. Onde o switch de A é o SW-HL2, de B é o SW-HL1 e de C é o SW-HL3.



$$\begin{aligned}
 F &= A \cdot \bar{B} + A \cdot \bar{C} \\
 &= A \cdot \bar{B} + A \cdot \bar{C} \\
 &= A \cdot \bar{B} \cdot \bar{A} \cdot \bar{C}
 \end{aligned}$$

14) A tabela referente aos valores obtidos a partir do circuito do exercício 13.

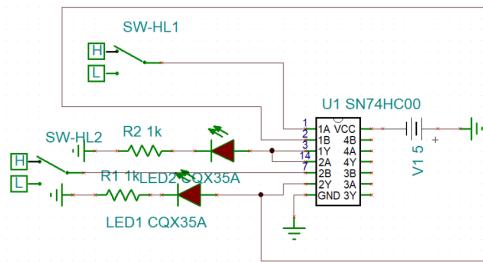
A	B	C	Volt Digital	Tensão
0	0	0	0	1000 mV
0	0	1	0	1000 mV
0	1	0	0	1000 mV
0	1	1	0	1000 mV
1	1	1	0	1000 mV
1	0	1	1	6 V
1	0	0	1	6 V
1	1	0	1	5 V

15) Constatando que são valores totalmente desfazados, o valor de tensão correspondente ao valor lógico "0" é bastante próximo de 0. Enquanto que o valor de tensão de "1" é (aproximadamente) igual ao da fonte.

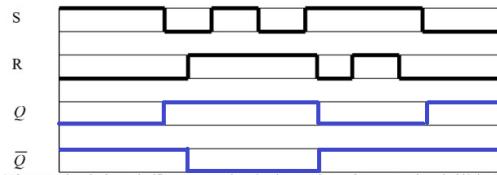
16) Comparativamente aos resultados da pergunta 14, pode dizer-se que apenas se alterou o valor de tensão correspondente ao valor lógico "0" que subiu para 1mV, provavelmente por causa da resistência interna do LED.

17) Sendo que existem várias formas de representar um circuito lógico podemos afirmar que cada uma delas tem um papel importante no processo de elaboração desse mesmo circuito. A expressão algébrica permite apenas desenvolver a tabela de verdade não podendo tirar-se mais conclusões. Através da tabela de verdade consegue-se concluir se o circuito está bem elaborado ou não, porém esta não ajuda diretamente no processo de elaboração. O diagrama lógico embora não seja o melhor auxílio para desenvolver o circuito, é o melhor auxílio para criar o diagrama de pinos e é bastante fácil de interpretar. O diagrama de pinos é sim a melhor representação para gerar o circuito lógico contudo por vezes não é de fácil interpretação.

18) Aqui temos a figura representativa do circuito da Latch SR. Onde o switch SW-HL1 corresponde à entrada S e o switch SW-HL2 corresponde à entrada R.



19) O diagrama temporal correspondente ao comportamento das saídas da Latch SR.



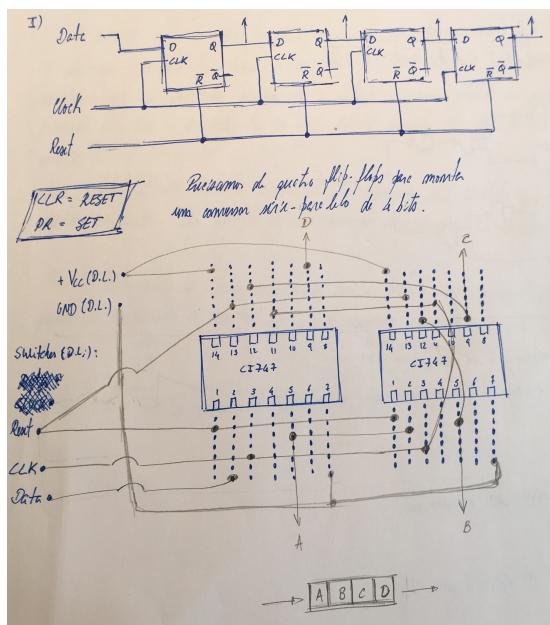
20) Num circuito combinacional os resultados das saídas são apenas influenciados pelos resultados das entradas. Já num circuito sequencial as saídas são também influenciadas pelos últimos resultados destas. Ao observar o diagrama temporal constatamos que o circuito é sequencial pois se fosse combinacional o gráfico de Q seria exatamente o oposto de do seu complemento, o que não evidentemente não acontece.

21) O circuito é sim capaz de guardar um bit de informação nas suas entradas devido ao evidente processo de realimentação intrínseco à estrutura da Latch SR.

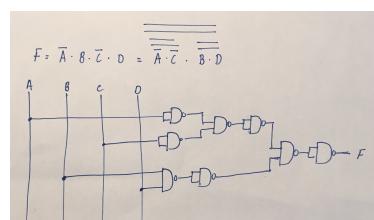
22) Não se pode prever o estado quando este está indeterminado (estado de indeterminação), que ocorre quando ambas as entradas S e R ficam a 1 ao mesmo tempo, ou seja, a saída Q da Latch SR começará a oscilar quando S e R voltarem a zero o que para um circuito digital não é aceitável.

## PONTO TEÓRICO (aula 2)

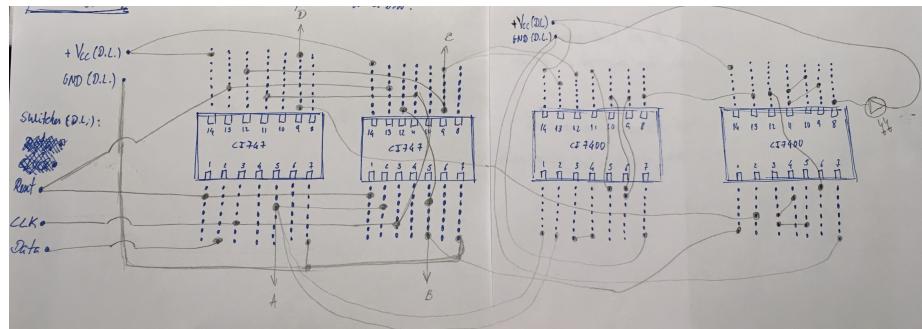
I) No desenho da imagem abaixo pode ver-se como seria montado o circuito utilizando um Digital Lab, uma breadboard, dois CI's 7474 e fios de ligação.



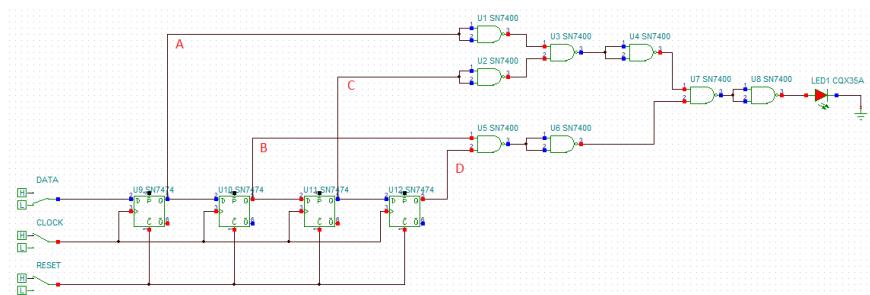
II) O seguinte circuito combinacional tem como saída o valor lógico “1” quando os valores são: A=0, B=1, C=0, D=1. Que é o padrão que representa o número decimal “5” em binário. Pode também ser observada a função lógica implementada.



Juntando os dois circuitos, obtém-se o circuito final, que é representado no desenho abaixo, indicando como seria se o trabalho prático tivesse que ser feito numa breadboard.



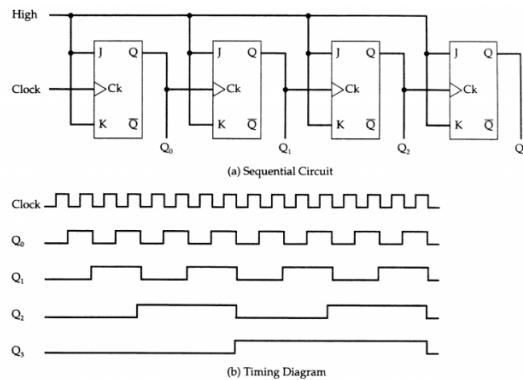
23) O número decimal “5” é representado em binário por “0101” (para informação contida em 4 bits), pelo que para fazer o LED acender: A=0, B=1, C=0 e D=1. Como se pode verificar experimentalmente o LED só acende quando é esse o padrão, como se pode verificar na imagem abaixo (os pontos azuis representam valor lógico “0” e os pontos vermelhos representam o valor lógico “1”).



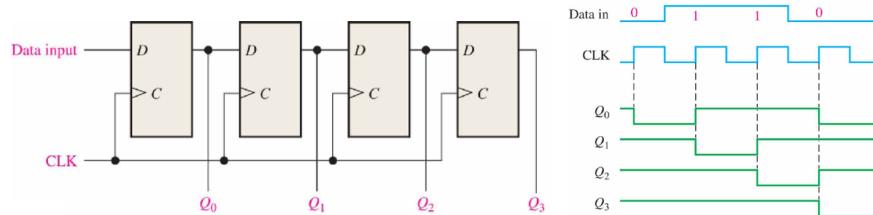
## PONTO TEÓRICO (aula 2)

I) A principal diferença entre um contador síncrono e um contador assíncrono reside na maneira como se ligam os impulsos de clock. No caso do contador síncrono o mesmo interruptor de clock está ligado em simultâneo a todos os flip-flops que estiverem a ser utilizados no circuito. Por outro lado, o contador assíncrono utiliza um interruptor de clock para cada flip-flop individualmente, podendo até a saída do flip-flop anterior ser usada como impulso de clock do flip-flop seguinte. Como exemplo para um contador assíncrono tem-se o contador binário crescente. Um conversor série-paralelo é um exemplo de um contador síncrono.

Este é o contador mais simples, a saída de um flip-flop tipo JK é ligada ao clock de outro flip-flop. Abaixo é um contador de 4 flip-flops portanto 4 bits. Em (a) tem-se a ligação dos flip-flops e em (b) têm-se as quatro saídas e o sinal de clock. É chamado de contador pois conta em binário de 0000 até 1111. Quando chega até 1111, reinicia a contagem.



Os conversores série-paralelo são flip-flops utilizados de forma a obter uma conversão de dados inseridos em série para dados paralelos, ou seja, permite converter uma sequência binária numa palavra binária.



II) O efeito de bouncing consiste no “balanço” a que os componentes de um interruptor estão sujeitos quando são, fisicamente, movidos de maneira a alterar o estado do interruptor. Este balanço, enquanto não é pára, faz com que o interruptor abra e feche várias vezes seguidas, indesejavelmente ao funcionamento do circuito. Para cancelar esse efeito foram criados métodos de debouncing. A maneira mais simples de fazer o debouncing de um interruptor é criar um circuito RC de maneira a que o condensador consiga atrasar a passagem de corrente durante o tempo em que o interruptor está em bouncing.

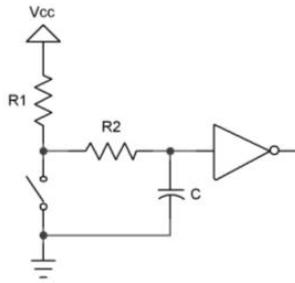
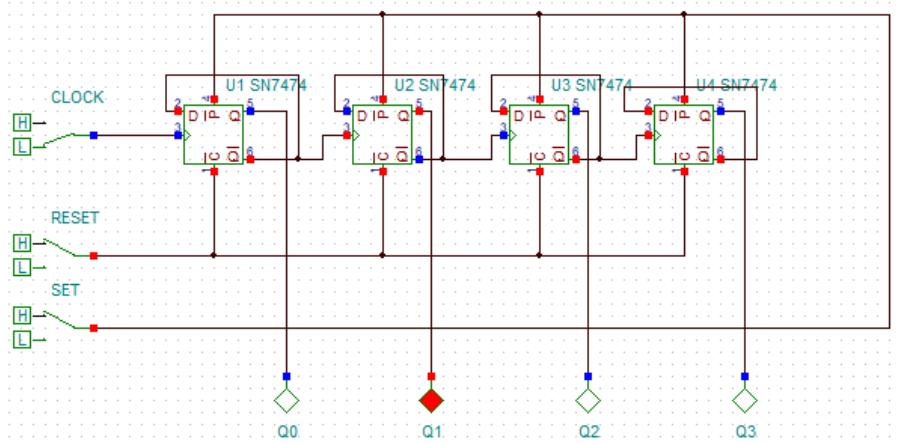
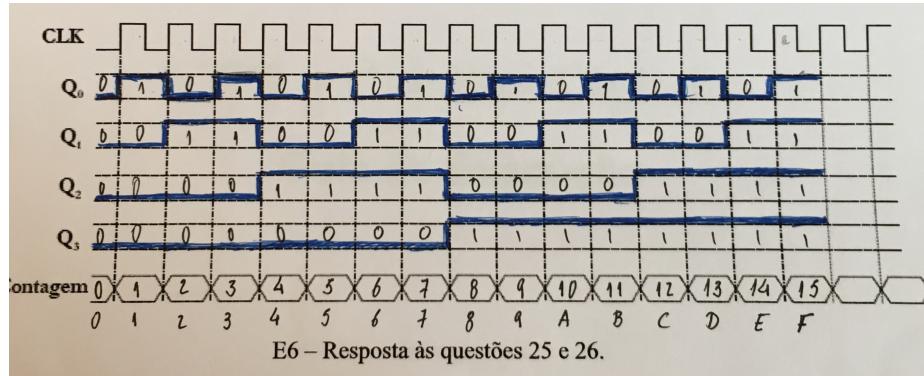


Figure 2: An RC debouncer

24/25) Como foi utilizado o TINA obtou-se por usar flip-flops em vez de um circuito integrado 7474. O simulador tem também componentes que se assemelham a um LED e que são ativados ou desativados conforme o estado lógico no ponto a que estão ligados (sem cor = “0” ; vermelho = “1”). É também importante frisar que no simulador não existe o efeito de bouncing pelo que não é necessário implementar um circuito de debouncing.



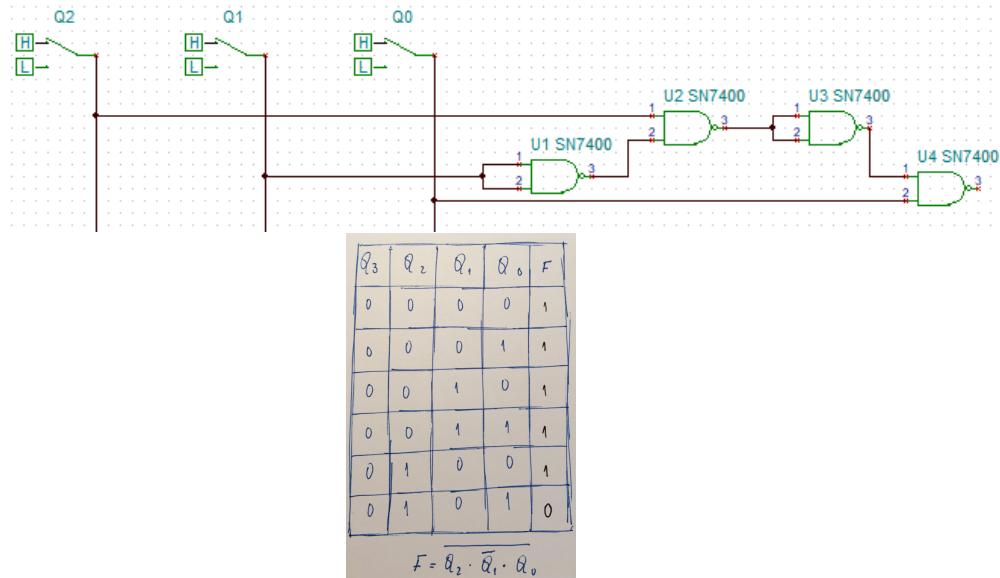
26) Pode-se verificar, através da análise do gráfico abaixo ilustrado, que se trata de um contador assíncrono que acrescenta uma unidade a cada impulso de clock, contando assim de “0” a “15” em decimal. Na figura é apresentada também a conversão decimal-hexadecimal.



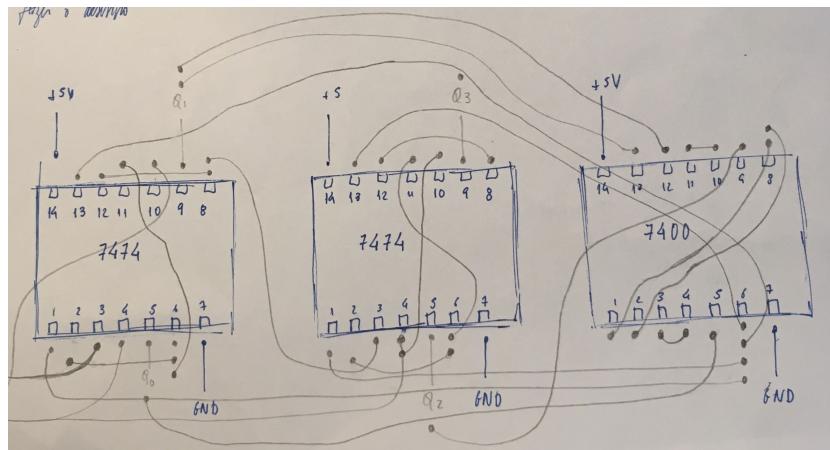
27) Pode-se afirmar que é um circuito sequencial, pois, como se pode verificar no gráfico temporal da alínea 26, o estado de cada entrada do flip-flop seguinte não depende apenas do sinal de clock mas também do estado lógico da saída do flip-flop anterior, de outro modo não seria possível visualizar este efeito de sequência e de contagem de “0” até “15”.

## PONTO TEÓRICO (aula 2)

I) Para obter um contador módulo 5 foi necessário implementar um circuito combinacional, utilizando portas NAND, que fizesse com que o estado lógico da saída desse circuito tivesse o valor lógico “0” apenas quando Q2=1, Q1=0 e Q3=1 (podemos ignorar Q3 pois apenas são necessários 3 bits para perfazer o número 5). Para isso foi implementado o circuito abaixo ilustrado, a sua tabela de verdade e a função lógica associada a esse mesmo circuito.



II) A figura abaixo ilustra como seria a montagem usando o Digital Lab e a breadboard.



Pode-se ver também na página seguinte a implementação do circuito completo no simulador TINA.

