

~~Objetivos:~~

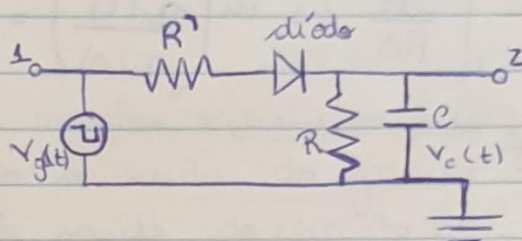
Objetivos:

- estudar a resposta temporal do circuito RC a um sinal de tensão retangular
- observar a retificação de um sinal sinusoidal e gerar um sinal dente-de-serra variando a frequência do sinal do gerador

Teoria

Circuito RC:

①



$$\tau = RC$$

constante de tempo  
característica do circuito

→ Com o aumento da tensão do gerador de 0 para  $V_g$ , a corrente que atravessa a resistência  $R'$  vai carregar o condensador (C). A tensão nos terminais do condensador aumenta (até  $V_g$ , se  $\tau = RC < T$ , em que  $T$  é o período do sinal)

$$V_c(t) = \frac{q_c(t)}{C}$$

Lei das malhas de Kirchhoff:  $V_g = Ri(t) + \frac{q_c(t)}{C}$

$$\Rightarrow \frac{dq_c}{dt} + \frac{q_c}{RC} = \frac{V_g}{R} \Rightarrow \int_{q_c(0)}^{q_c(t)} \frac{dq}{eV_g - q_c} = - \int_0^t \frac{dt}{RC}$$

$$\Leftrightarrow \ln(eV_g - q_c(t)) = -\frac{t}{RC} \Rightarrow q_c(t) = q_c(t \rightarrow \infty) \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

em que  $q_c(t \rightarrow \infty) = CV_g$

Logo,  $V_c(t) = \frac{CV_g(1 - e^{-\frac{t}{RC}})}{C} = V_g \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$

• Para  $t_{1/2} = RC \ln 2 = 0,693RC$ ,  $V_c(t) = \frac{V_g}{2}$

• Para  $t = 5\tau = 5RC$ ,  $V_c(t) \sim V_g$



→ Com a diminuição da tensão de  $V_g$  para  $-V_g$ , o diodo impede a passagem ~~de~~ de corrente no sentido inverso, pelo que o condensador vai iniciar a descarga pela resistência  $R$ , com  $\tau = RC$ , pelo que a tensão dos seus terminais vai diminuir

$$i(t) = \frac{V_R(t)}{R} = - \frac{dq_c(t)}{dt}$$

$$V_R(t) = V_c(t) \Rightarrow \frac{q_c(t)}{C} = -R \frac{dq_c(t)}{dt}$$

$$\Rightarrow \int_{q_c(0)}^{q_c(t)} \frac{dq_c}{q_c(t)} = - \int_0^t \frac{dt}{RC} \Leftrightarrow \ln\left(\frac{q_c(t)}{q_c(0)}\right) = - \frac{t}{RC}$$

$$\Rightarrow q_c(t) = q_c(0) e^{-\frac{t}{RC}}$$

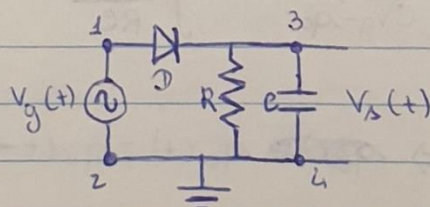
$$i(t) = \frac{q_c(0)}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} = i(0) e^{-\frac{t}{RC}}, \quad i(0) = \frac{q_c(0)}{RC} e^0 = \frac{q_c(0)}{RC}$$

$$\Rightarrow V_c(t) = \frac{q_c(0)}{C} e^{-\frac{t}{RC}} = V(0) e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$t_{1/2} = RC \ln 2 = 0,693 RC \Rightarrow V_c = \frac{V_g}{2}$$

$$t = 5\tau \Rightarrow V_c(t) \sim 0$$

Circuito



• Para  $V_g(t) > 0$ , o condensador carrega até  $V_c(t) = V_g(t)$

• Para  $V_g(t) < 0$ , o condensador descarrega pela resistência  $R$ , com  $\tau = RC$

$$\text{frequência característica: } f_{RC} = \frac{1}{2\pi RC}$$



~~Se  $T$  for grande o suficiente (baixa frequência) o condensador~~  
~~desacarga~~

Se  $T$  não for grande o suficiente  $\frac{1}{f}$  para o condensador descarregar completamente, o menor valor de  $V_c(t)$  atingido é ~~o valor~~ mais próximo de  $V_g(t)$  máximo.

Assim:  $\uparrow f \leadsto$  valor médio do sinal de saída fica mais próximo de  $V_g(t)$  máximo  $\leadsto$  sinal de saída com variação em dente-de-serra ~~ou~~  $\leadsto$  caráter linear

$\rightarrow$  No limite, temos uma retificação e filtragem do sinal AC em DC

### Método

- (imagem 1.2 - mais à frente)
- 1) Começamos por montar o circuito RC (1), ligando ~~o canal~~ o canal 1 do osciloscópio à saída do gerador e à entrada do circuito RC e o canal 2 à saída do circuito RC. ~~Diminuímos~~  
 ~~$C \sim 100 \times 10^{-9} F$  e  $R \sim 3300 \Omega$~~   $C \sim 100 \times 10^{-9} F$  e  $R \sim 3300 \Omega$
  - 2) No gerador de sinais: sinal quadrado;  $f \sim 200 Hz$ . Adaptar as escalas no osciloscópio
  - 3) Utilizando os cursores <sup>no osciloscópio</sup>, ~~medir~~ medir, aproximadamente,  $t_{1/2}(V_g \rightarrow V_g/2)$  e  $\tau(V_g \rightarrow V_g/2)$ , comparando com os valores previstos ( $t_{1/2} = 0,693 RC$  e  $\tau = RC$ )

-11-

- 4) Montar o circuito RC (1) recorrendo a uma placa para montagem de circuitos elétricos, com um condensador de valor desconhecido e  $R \sim 4000 \Omega$ . Ajustar as escalas do ~~osciloscópio~~ osciloscópio
- 5) Medir  $R$  com multímetro e ~~obter~~  $t_{1/2}$  com o osciloscópio
- 6) Repetir os pontos 4/5 com diferentes resistências e utilizar um gráfico ( $R, t_{1/2}$ ) para obter a capacidade do condensador ~~( $m = 0,693C$ )~~
- 7) No gerador de sinais: sinal sinusoidal;  $f < \frac{1}{2\pi RC}$
- 8) No osciloscópio: canal 1 - sinal de entrada; canal 2 - sinal de saída ~~pelo~~. Adquirir os dados com a porta USB
- 9) ~~Adquirir~~  $\uparrow f$  até: ~~sinal dente-de-serra~~ obter sinal dente-de-serra



Aparatos utilizados: Osciloscópio: Tektronix TD5 3002E-EDU → FCUP 042338  
 Gerador de sinais: Circuitmate → FCUP 000000 284440  
 Caixa de resistências: ~~Don~~ Dumbudge Denmark → FCUP ~~0000~~ 041119

## Cuidados

- Não ligar aparelhos sem verificação do docente
- Ligar do mais barato para o mais caro (gerador → osciloscópio)
- Atenção ~~para~~ para ligar corretamente os ~~conectores~~ conectores BNC

## Execução e tratamento / análise de dados

①  $C = \text{~~100 nF~~} 0,1 \mu F$  ~~(para o gerador)~~

$R = \text{~~3260 \Omega~~} 3260 \Omega \pm 5\% = (3260 \pm 163) \Omega$

②  $f = (195,606 \pm 0,001) \text{ Hz}$

escalas: tempo → 2,50 ms

tensão { CH1 → 5,00 V

CH2 → 1,00 V

(mais à frente)  
 Na imagem 2, vemos a imagem obtida no ~~osciloscópio~~ osciloscópio

\* ③  ~~$V_g = (2,08 \pm 0,01) V$~~   $V_g = (2,08 \pm 0,01) V$   $V_g = (2,08 \pm 0,01) V$   
 ~~$V_g = 1,01 V$~~   $\frac{V_g}{2} = 1,01 V$

$\frac{V_g}{2} = 0,74 V$

$t_{1/2} = (250,0 \pm 0,1) \mu s$

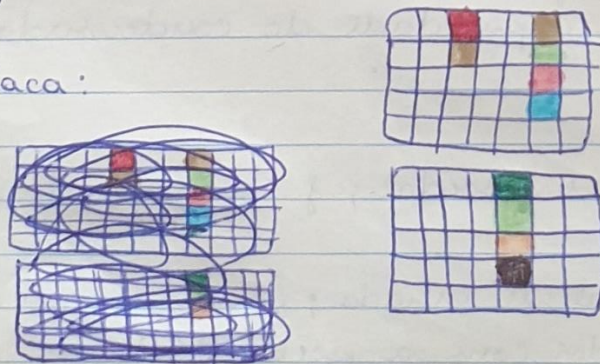
$\tau = (340,0 \pm 0,1) \mu s$

Valores previstos:

~~$t_{1/2} = 0,693 \times 3260 \times 10^{-6} = 2259 \mu s$~~   
 $\tau = 3260 \times 10^{-6} = 326 \mu s$

- ④ Material necessário: placa; 20 cabos coaxiais com 1 conector BNC; 1 cabo coaxial com 2 ~~conectores~~ conectores BNC; ~~condensador~~ condensador; divisor; diodo; caixa de resistências; cabos com crocodilo

Na placa:



- condutor interno (gerador de sinais)
- diodo
- condensador
- condutor interno (osciloscópio-2)
- trilha (resistência)
- trilha (gerador de sinais)
- trilha (osciloscópio - canal 2)
- condutor interno (resistência)

(após circuito na placa) Nas (mais à frente) imagens 3 e 4, vemos, respectivamente, a placa com o circuito RC e o circuito completo (com osciloscópio e gerador de sinais)



No gerador de sinais, ligamos o divisor, utilizando o cabo coaxial com 2 conectores BNC para ligar o gerador ao <sup>canal 1 do</sup> osciloscópio; os restantes cabos coaxiais são utilizados para ligar o gerador ao canal 2 do osciloscópio ao circuito montado na placa

(5) e (6)

$R (\Omega)$	$t_{1/2} (\mu s)$
	$\pm 0,1$
509 <del>4000</del>	<del>760,0</del> 170,0
309	80,00
100	20,00
70	10,00
50	6,000
<del>30</del>	<del>30,00</del>
30	30,00
40	4,000
20	1,600

~~Exercício~~

Utilizando estes valores construímos o ~~seguinte~~ gráfico, com os valores de  $t_{1/2}$ , em segundos, em função da resistência ( $\Omega$ ). Como  $t_{1/2} = \ln(2) \cdot RC$ , o declive ( $m$ ) da reta de ajuste corresponde a  $\ln(2)C \Rightarrow C = \frac{m}{\ln(2)}$

$\ln(2)$

Assim, concluímos que

$$C = \frac{360 \pm 19}{\ln(2)} \mu F$$

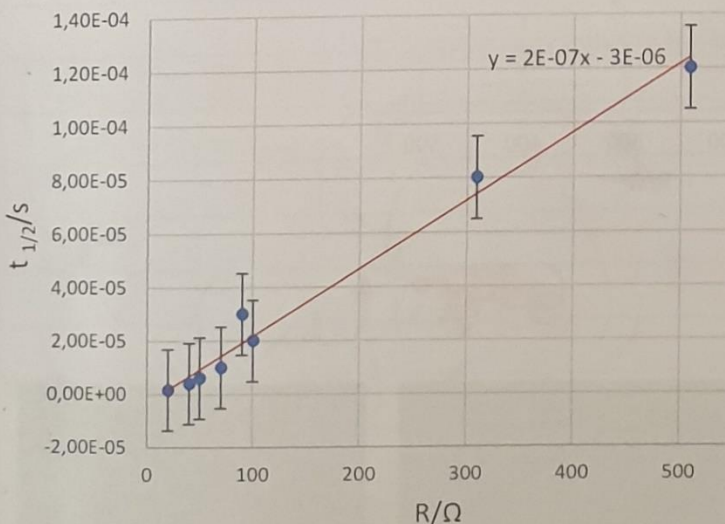


Gráfico 1

Ajuste:			
m	2.50E-07	-3.14E-06	b
s <sub>m</sub>	1.29E-08	2.83E-06	s <sub>b</sub>
r <sup>2</sup>	0.984	5.87E-06	s <sub>y</sub>

Tabela 1



\* ③ Valores previstos

$$t_{1/2} = 0,693 \times 3260 \times 100 \times 10^{-9} = 225,9 \mu s$$

$$\tau = 3260 \times 100 \times 10^{-9} = 326 \mu s$$

Assim, o erro obtido para  $t_{1/2}$  é:

$$Er_{\%}(t_{1/2}) = \frac{|250,0 - 225,9|}{225,9} \times 100 = 11\%$$

e o erro para  $\tau$  é:

$$Er_{\%}(\tau) = \frac{|340 - 326|}{326} \times 100 = 4,3\%$$

→ Em ambos os casos, temos um erro por excesso, o que pode indicar um erro sistemático. No entanto, o  $Er_{\%}(t_{1/2})$  é alto ( $>5\%$ ) o que pode indicar um erro grosseiro.

Para além disso, fazemos a 4.ª coluna da ~~tabela 1~~ ~~representando os parâmetros do ajuste~~ ~~representados~~ tabela 2, correspondente aos valores teóricos de  $t_{1/2}$  (s), utilizando os parâmetros do ajuste <sup>em que se encontram os resíduos</sup> apresentados na tabela 1. Já a 5.ª coluna, da tabela 2 obtém-se pela diferença entre os valores teóricos e os valores experimentais de  $t_{1/2}$ .

Utilizando os dados das colunas 1 e 5, construímos o gráfico 2 (gráfico de resíduos). ~~Podemos ver~~ Podemos ver que os valores dos resíduos variam num intervalo pequeno, pelo que concluímos que ~~os dados~~ terão sido cometidos poucos erros aleatórios.

R (Ω)	$t_{1/2}(\mu s) \pm 0.01$	$t_{1/2}(s) \pm E-08$	Ajuste (s)	Resíduos (s)
509	120.0	1.200E-04	1.240E-04	3.985E-06
309	80.00	8.000E-05	7.403E-05	-5.965E-06
100	20.00	2.000E-05	2.184E-05	1.837E-06
90	30.00	3.000E-05	1.934E-05	-1.066E-05
50	6.000	6.000E-06	9.350E-06	3.350E-06
70	10.00	1.000E-05	1.434E-05	4.345E-06
40	4.000	4.000E-06	6.852E-06	2.852E-06
20	1.600	1.600E-06	1.857E-06	2.572E-07

Tabela 2



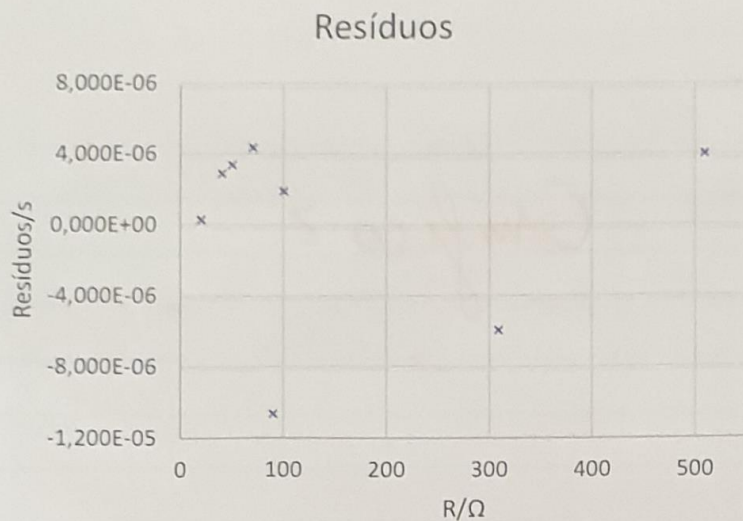


Grafico 2

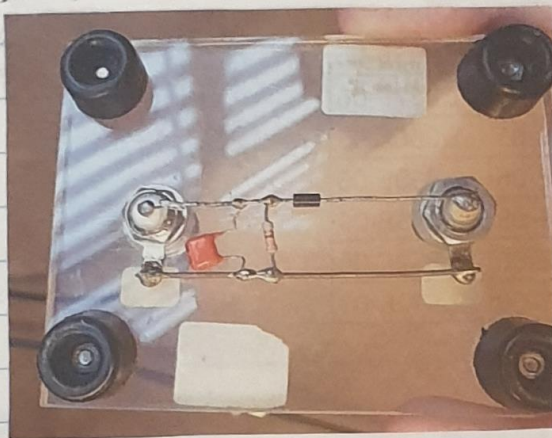


Imagem 1

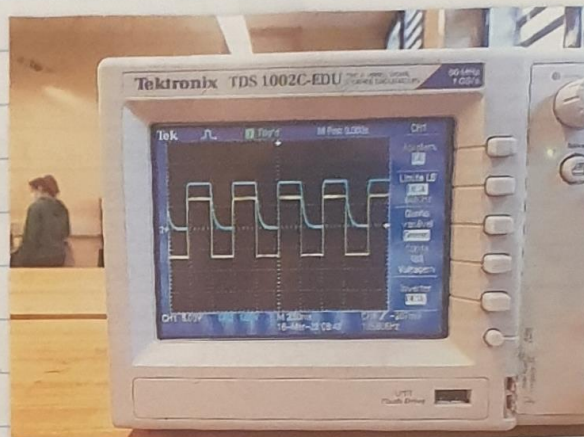


Imagem 2

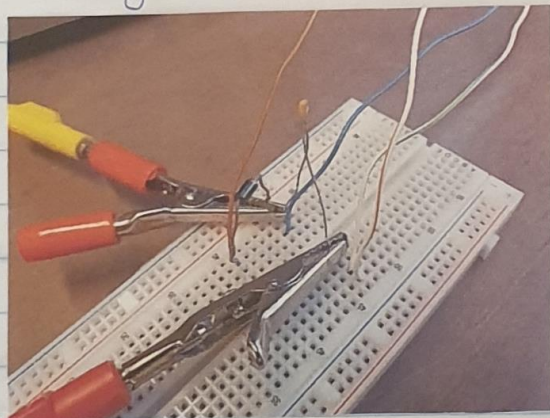


Imagem 3 (Note-se que o condensador usado não foi o da imagem, procedeu-se à substituição antes da recolha de dados para facilitá-la)



Imagem 4 (A ligação do fio vermelho na caixa de resistências encontra-se no terminal errado, mas foi utilizada antes da recolha de dados)

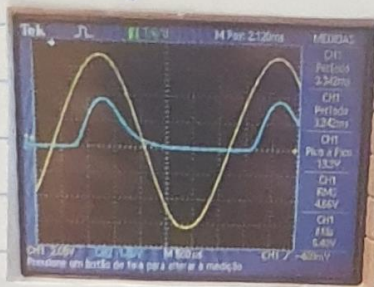
$$\textcircled{7} \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 3260 \cdot 100 \times 10^{-9}} = 488 \text{ Hz}$$



⑧ e ⑨ Uma vez que não tinha uma pen ou cabo para recolher os dados com a porta USB, tirei fotos à imagem do osciloscópio, com os principais dados para o canal 1 e o canal 2, para diversas frequências

Abaixo encontram-se as imagens obtidas, ~~postamente~~ indicando-se a ~~postamente~~ respetiva frequência

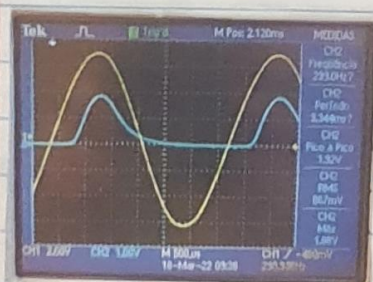
(1)  $f = 2299,0 \text{ Hz}$



(2)  $f = 704,9 \text{ Hz}$



(3)  $f = 2,071 \text{ KHz}$



→ Como podemos ver, com o aumento da frequência, o condensador deixa de ter tempo para descarregar toda a energia acumulada

→ Tanto para  $f = 704,9 \text{ Hz}$  (2) como para  $f = 2,071 \text{ KHz}$  (3), ~~para~~ observamos um sinal do tipo "dente de serra"

→ Para além de não terem sido recolhidos dados para frequências mais elevadas, sabemos que ~~nestes casos~~, por o condensador ter intervalos de tempo ainda menores para efetuar a ~~uma~~ descarga, tínhamos uma corrente quase contínua (retificação do sinal)