

## Trabalho 4A

28 de fevereiro de 2023 11:19

## Estudo da transmissão por Cabo Coaxial

19

PL6 - G03 - Francisco Lopes dos Santos

Objetivos:

**1-** Estudo da amplitude do impulso refletido, em função da impedância da carga ligada à linha coaxial,  $V_R(Z_L)$ :

- ✓ Determinar o valor da impedância da carga ligada à linha,  $Z_L = Z_c$ , para o qual a amplitude do impulso refletido  $V_R(Z_L) = 0$ ;
- ✓ Mostrar que em linha aberta ( $Z_L \rightarrow \infty$ ),  $T_R = 1$ ;
- ✓ Mostrar que com a linha em curto-círcuito ( $Z_L = 0$ ),  $T_R = 1$ , ou seja, a tornar inverte sinal, mas a corrente não.

**2-** Determinação da constante de atenuação  $\alpha$  e da velocidade  $v$  de propagação da fase na linha coaxial:

- ✓ a partir da medição das amplitudes  $V_R$  de uma sequência de  $n$  impulsos refletidos e das correspondentes distâncias  $d$  percorridas pelo sinal, determinar  $\alpha$ ;
- ✓ nos dados registados no objetivo anterior, incluir o registo dos instantes  $t_n$ . Calcular  $v$  a partir de  $d(t)$ .

**3-** Determinação da velocidade de propagação de sinal  $v$  numa linha coaxial, variando a frequência do sinal de entrada:

- ✓ Calcular a velocidade de propagação do sinal na linha coaxial:
- ✓ a partir do registo da frequência  $f$  do sinal à entrada da linha coaxial;
- ✓ a partir da diferença de fase  $\phi$  entre o sinal de entrada e o sinal refletido na linha coaxial;
- ✓ variando a frequência  $f$  do sinal à entrada numa gama entre 1 kHz e 10 MHz.

Execução Experimental:

**- Equipamento:** - gerador de impulsos (com fonte de alimentação anexa):  $T_R \approx 5 \mu s$

- largura dos impulsos a meia altura:  $200 \mu s$

- gerador sinusoidal:  $R_{load} = 50 \Omega$

- resistência interna  $50 \Omega$  a  $600 \Omega$  (comutável)

- saída coaxial BNC (usar MAIN)

- saída coaxial BNC



- **Osciloscópico** (com dupla taxa de tempo)  
↳ separam da escala de tempo

- **Linha coaxial** ( $l = 63,50 \pm 0,05 \text{ m}$ ): cabo coaxial RG58, condutores em cobre estanhado (diâmetro  $a = 0,9 \text{ mm}$ ), dieletroco polietileno ( $d = 2,95 \text{ mm}$ ), revestimento externo PVC, impedância característica  $50 \Omega$ , capacidade  $100 \text{ pF/m}$ , atenuação  $< 0,02 \text{ dB/m} @ 10 \text{ MHz}$ .

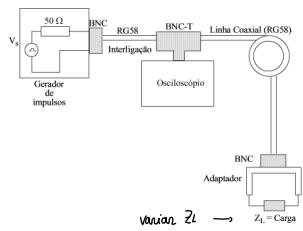
- **Terminação 1** da linha coaxial: caixa de resistências

- **Terminação 2** da linha coaxial: adaptador de impedâncias

↳ adapta a impedância da linha à da entrada do osciloscópio

**- Execução:**

**1- Estudo da amplitude do impulso refletido, em função da impedância da carga ligada à linha coaxial,  $V_R(Z_L)$ :**



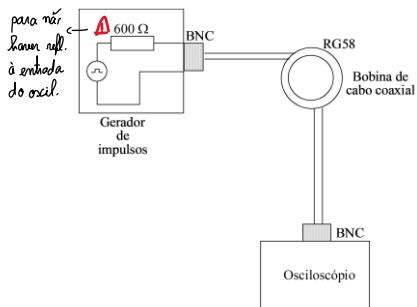
- a adaptação de impedância da carga à linha de transmissão ocorre quando  $Z_L = Z_c \Rightarrow$  valor nulo para o coeficiente de reflexão,  $T_R$ , pois

$$T_R = \frac{V_R(l, t)}{V_i(l, t)} = - \frac{I_R(l, t)}{I_i(l, t)} = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c}$$

- A  - Qual o  $R_{in}$  do gerador para que não haja reflexão dos impulsos à entrada da linha coaxial.
- A  - qual valor para a saída do gerador ( $50\Omega$  e  $600\Omega$ ) sabendo que a impedância da linha é  $50\Omega$ .

- variar o valor da caixa de resistências ( $Z_L = R$ ), e a partir do gráfico  $V_R(Z_L)$ , calcular  $Z_c$ . Este é o ponto de intersecção da linha de ajuste ( $V_R(Z_L)$ ) com o eixo  $Z_L$ .  
↳ valor de referência na exp. da mes. seguinte?
- registrar as observações, no osciloscópio, do impulso incidente na linha coaxial seguido do impulso refletido na carga  $Z_L$ , para os casos:  circuito aberto ( $Z_L = \infty$ )  
 circuito fechado ( $Z_L = 0$ )

**2- Determinação da constante de atenuação  $\alpha$  e da velocidade  $v$  de propagação da fase na linha coaxial:**

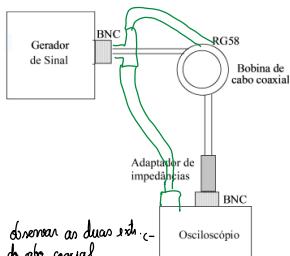


- a rajá entre picos de amplitude sucessivos observados no osciloscópio é  $\frac{V_{i+1}}{V_i} = T^{-2\alpha l}$ ,  $T = 0,846$   
↳ usar 2 de níveis (no osciloscópio,  $Z = 1M\Omega \Rightarrow T = 1$ )  
ou numa escala logarítmica:  
 $\ln\left(\frac{V_n}{V_1}\right) = \ln(T^{-n} e^{-2\alpha l}) = [\ln(T^{-2\alpha l})] \cdot n$  (l é a distância entre o osciloscópio e o gerador)

- Traçar um gráfico  $\ln(V)$  em função do número  $n$  do impulso e usando o valor de  $T$  calculado, determinar a constante de atenuação  $\alpha$ . Comparar com os valores especificados para o cabo RG58.

- calcular o valor da velocidade de propagação de fase, a partir da dependência do percurso do sinal,  $d = 2nl$ , no tempo,  $t$ .

**3- Determinação da velocidade de propagação de sinal  $v$  numa linha coaxial, variando a frequência do sinal de entrada:**



*Nota:* - para  $f=0 \Rightarrow$  sinal em fase  $\Rightarrow$  diferença de fase  $\Phi=0$   
- para  $\Phi=\pi \Rightarrow$  antifase ; - para  $\Phi=2\pi \Rightarrow$  fase invertida ; ...

- registrar a frequência em função da diferença de fase na gama de frequências disponível.

- calcular a velocidade de propagação dos sinais elétricos no cabo coaxial a partir de  $f(\Phi)$ .

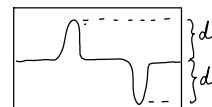
$$v_{ref} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \mu \approx \mu_0 \quad \text{e} \quad \epsilon(\text{polietileno}) = 2,3 \times \epsilon_0 \quad (\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}^{-1}, \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}^{-1})$$

*Muito  
não faz*

## - Análise de dados:

- Estudo da amplitude do impulso refletido, em função da impedância da carga ligada à linha coaxial,  $V_R(Z_L)$ :

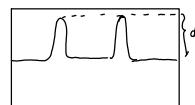
- Para circuito aberto, deveríamos observar  $V_R = -V_i$ :



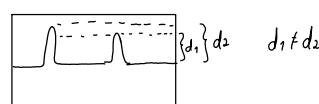
, contudo o que realmente observamos foi:



- Para curto-circuito, deveríamos observar  $V_R = V_i$ :



, contudo o que realmente observamos foi:



↳ Isto poderá ter acontecido devido a defeitos no cabo coaxial, ou em algum elemento da montagem realizada.

- Variando a impedância da carga ligada ao cabo coaxial, obtivemos o seguinte esquema no osciloscópio:

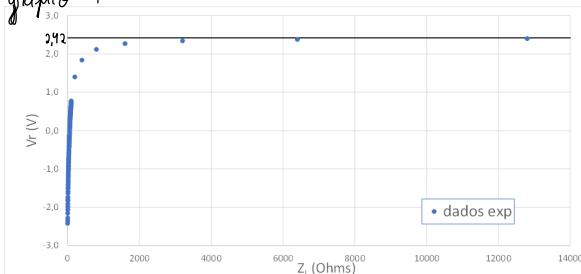


- Utilizando os cursorres do osciloscópio, para cada valor da impedância, colhamos o cursor 1 no zero da onda e o cursor 2 no pico da oscilação positiva da direita, registrando o valor da tensão. Após isso colhamos o cursor 2 no pico negativo da direita, registrando outro valor da tensão. O valor da amplitude do impulso refletido ( $V_R$ ), corresponde à soma desses 2 valores.

- O valor de  $V_R$  obtido para o curto-circuito, quando  $Z_L=0$ , foi  $V_{cc} = 2,42 \text{ V}$ .

- Usando toda a gama experimental, com  $Z_L$  a variar entre  $1\Omega$  e  $12800\Omega$ , e  $V_R$  a variar entre  $-2,42 \text{ V}$  e  $2,42 \text{ V}$ , obtivemos o seguinte gráfico:

gráfico 1

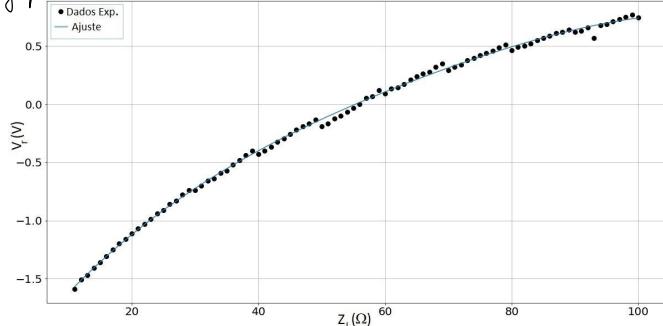


- Através da análise do gráfico 1 obtemos que  $Z_L$ , ao tender para valores cada vez maiores, o valor de  $V_R$  tende para o valor da tensão de curto-circuito ( $Z_L \rightarrow \infty \Rightarrow V_R \rightarrow V_{cc} = 2,42 \text{ V}$ ) ( $T_L = 1$ )

- também obtemos que para  $Z_L=0$ ,  $V_R = -2,42 = -V_{cc}$  (a tensão invertida o sinal) ( $T_L = -1$ ).

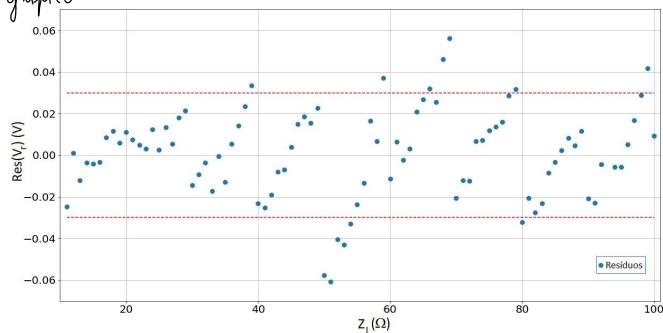
- Através do gráfico 1, podemos obter a impedância característica,  $Z_c$ . Este é o ponto de interseção da linha de ajuste ( $V_R(Z_L)$ ) com o eixo  $V_R=0$ . Através da análise dos dados experimentais percebemos que quando  $Z_L = 56 \Omega$ , obtemos  $V_R = 0,000 \text{ V}$ , sendo este o valor experimental encontrado para  $Z_c$ . Assim, fiz um ajuste para a gama de  $Z_L$  entre  $12 \Omega$  e  $100 \Omega$  e  $V_R$  entre  $-1,513 \text{ V}$  e  $0,794 \text{ V}$ , para garantir a mesma número de pontos antes e depois de  $Z_c = 56 \Omega$ , tendo o mesmo peso à esquerda e direita da interseção.

gráfico 2



- a equação do ajuste é do tipo polinomial de 4º grau:  $b + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4$   
com  $b = -2,27 \pm 0,04$ ;  $a_1 = 0,073 \pm 0,004$ ;  $a_2 = -0,0009 \pm 0,0001$   
 $a_3 = (8 \pm 2) \times 10^{-6}$ ;  $a_4 = (-3,3 \pm 0,8) \times 10^{-8}$ ;  $R^2 = 0,9987$
- o desvio padrão é  $s = 0,02$   
(valores obtidos através do python)

gráfico 3



- através da análise da equação de ajuste, em python, obtivemos o valor de  $Z_c = 55,3 \Omega$ , quando  $V_r = 0$ . Este valor apresenta um erro percentual de 1,2%, em relação ao valor experimental ( $Z_c, \text{exp} = 56 \Omega$ ) X

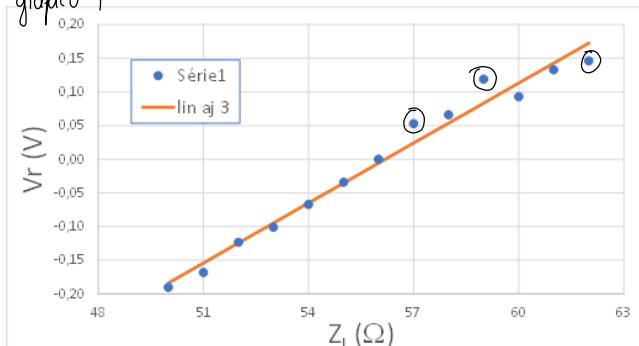
- no gráfico 3, observamos que os resíduos estão distribuídos de forma aleatória, com valores, em geral, menores que o desvio padrão. Contudo, os resíduos apresentam uma tendência de sinal. Esta tendência é explicada pelos saltos nos valores observados no gráfico 2, que correspondem a um erro sistemático na caixa de resistências usada. Estes saltos verificavam-se sempre que, ao chegar ao valor  $q$  das unidades, rodavamos o botão correspondente ao valor das dezenas para o próximo valor. Aísim, não achou necessário retirar pontos ao ajuste, já que a tendência em corte iria-se manter.

salto nos valores observados no gráfico 2, que correspondem a um erro sistemático na caixa de resistências usada. Este salto verificava-se sempre que, ao chegar ao valor  $q$  das unidades, rodavamos o botão correspondente ao valor das dezenas para o próximo valor. Aísim, não achou necessário retirar pontos ao ajuste, já que a tendência em corte iria-se manter.

- para tentar ultrapassar o problema da tendência em corte, realizei um **ajuste linear** escolhendo uma gama mais pequena de valores, onde  $Z_L$  varia entre 50  $\Omega$  e 62  $\Omega$  e  $V_r$  varia entre -0,190 V e 0,146 V, tentando garantir o mesmo número de valores à esquerda e à direita da intersecção com o eixo  $V_r = 0$ :

**ajuste linear**  
50  $\Omega$  e 62  $\Omega$   
não concorda

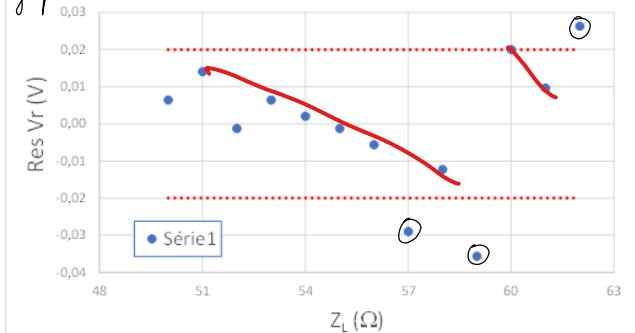
gráfico 4



m	0,030	-1,67	b
$\sigma_m$	0,001	0,08	$\sigma_b$
$r^2$	0,977	0,02	$\sigma_{y\text{aj}}$

- no gráfico 4, observamos que os valores seguem uma tendência linear, contudo existem algumas oscilações dos valores em relação ao ajuste, principalmente na parte final.

gráfico 5



- a partir do gráfico 5, observa-se uma disposição aleatória dos resíduos, contudo os três pontos anotados apresentam um valor superior ao desvio padrão, podendo ser considerados duvidosos, já que correspondem aos valores que se afastam do dedilho no gráfico 4.

- a partir da análise gráfica, podemos obter o valor de  $Z_c$ , como sendo o valor de  $x_c$  para quando  $y=0$ :

$$y = mx + b \Leftrightarrow 0 = mx + b \Leftrightarrow x_c = -\frac{b}{m} = Z_c \Leftrightarrow Z_c = 55.7 \Omega$$

- a incerteza de  $Z_c$  pode ser calculada através de:  $\sigma^2(Z_c) = \left(\frac{\partial Z_c}{\partial m}\right)^2 \cdot \sigma_m^2 + \left(\frac{\partial Z_c}{\partial b}\right)^2 \cdot \sigma_b^2$

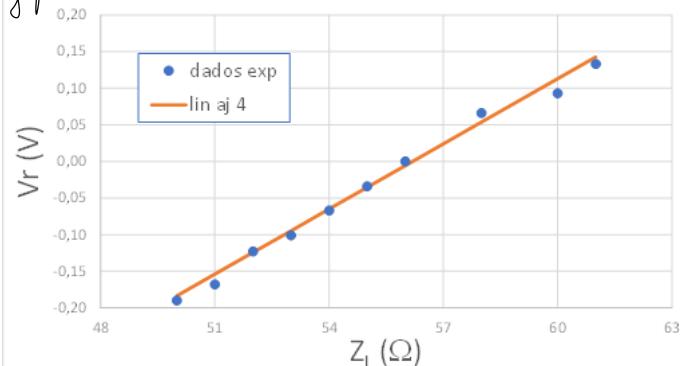
$$Z_c = (55.7 \pm 3.2) \Omega = (56 \pm 3) \Omega$$

$$= \left(\frac{b}{m^2}\right)^2 \cdot \sigma_m^2 + \left(-\frac{1}{m}\right)^2 \cdot \sigma_b^2 \Leftrightarrow \sigma(Z_c) = 3.2 \Omega$$

- a incerteza percentual é 5.8%, com um erro percentual de 0,54% em relação ao valor experimental ( $Z_{c,exp} = 56 \Omega$ ).

- decidi realizar um novo ajuste, retirando os pontos duvidosos anotados no gráfico 4.

gráfico 6

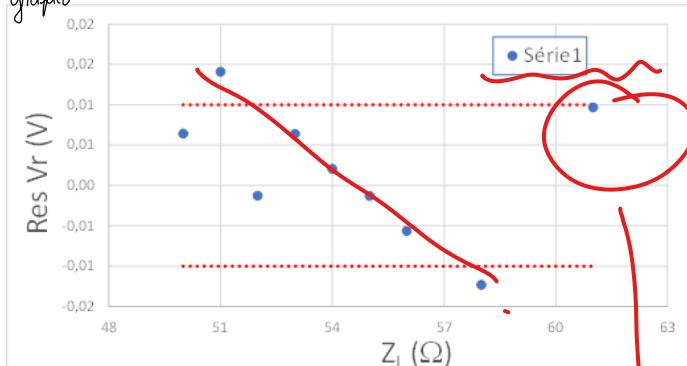


$m$	0,0295	-1,66	$b$
$\sigma_m$	0,0009	0,05	$\sigma_b$
$r^2$	0,993	0,01	$\sigma_{y,aj}$

- no gráfico 6, não existem quaisquer flutuações significativas dos dados em relação à linha de ajuste.

No gráfico 7, os resíduos são suficientemente pequenos, tendo valores próximos ao desvio padrão. Contudo é possível observar um tendência nos valores dos resíduos entre os pontos  $Z_L$  entre 51 Ω e 58 Ω. Contudo, não realizei novo ajuste, uma vez que assim ficaria Poucos pontos para a análise.

gráfico 7



- utilizando as expressões acima referidas, obtive os valores:

$$Z_c = (56.3 \pm 2.4) \Omega, \text{ com uma incerteza percentual de } 4.3\% \text{ e um erro percentual de } 0.5\%, \text{ em relação a } Z_{c,exp} = 56.0 \Omega$$

- Assim, o valor final obtido para a constante de atenuação foi  $Z_c = (56 \pm 2) \Omega$ . Este valor será utilizado nos próximos estudos como valor referência da impedância  $Z_c$ .

Retirar e refazer aj

- Determinação da constante de atenuação  $\alpha$  e da velocidade  $v$  de propagação da faixa na linha coaxial:

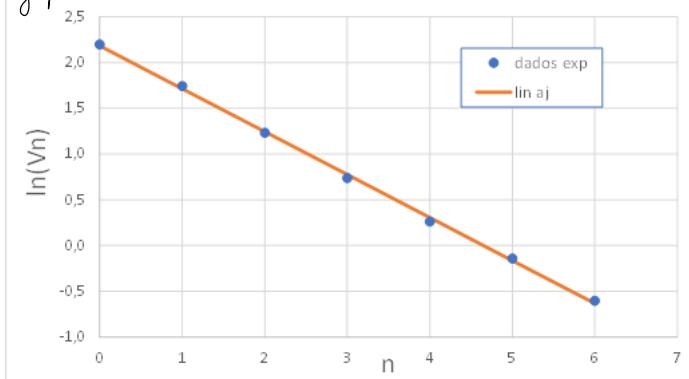
Tabela 1

n	Vn (V)	u(Vn) (V)	ln(Vn)	u (ln(Vn))	d (m)	t (s)	u(t) (s)	ln(Vn) aj	Res ln(Vn)
0	9,00	0,01	2,197	0,001	0	0	0	2,1834	-0,0139
1	5,71	0,01	1,742	0,002	123	6,60E-07	1,00E-09	1,7139	-0,0283
2	3,43	0,01	1,233	0,003	246	1,32E-06	1,00E-08	1,2444	0,0119
3	2,09	0,01	0,737	0,005	369	1,98E-06	1,00E-08	0,7750	0,0378
4	1,30	0,01	0,262	0,008	492	2,64E-06	1,00E-08	0,3055	0,0432
5	0,868	0,001	-0,142	0,001	615	3,30E-06	1,00E-08	-0,1639	-0,0224
6	0,546	0,001	-0,605	0,002	738	3,98E-06	1,00E-08	-0,6334	-0,0283

- O comprimento do cabo coaxial era 61,5 m.

- Fazendo o gráfico de  $ln(Vn)$  em função de n:

gráfico 8



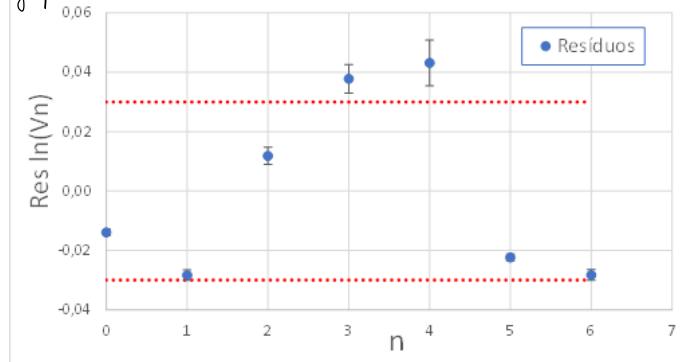
$$\cdot u(\ln(Vn)) = \frac{u(Vn)}{Vn}$$

m	-0,469	2,18	b
$\sigma_m$	0,006	0,02	$\sigma_b$
$r^2$	0,9991	0,03	$\sigma_{y\text{aj}}$

-> A gama experimental considerada para o ajuste foi de  $ln(Vn)$  entre -0,605 e 2,197 e n entre 0 e 6.

- no gráfico 8, observamos que os valores seguem uma boa tendência linear, sem grandes desvios.

gráfico 9



- no gráfico 9, os resíduos estão distribuídos de forma aleatória e os valores estão suficientemente pequenos para considerar um bom ajuste.

- as barras de incerteza estão todas presentes, cada uma com um valor diferente, contudo, na mesma ordem de grandeza (valores da incerteza na tabela 1). Algumas não são visíveis.

- existem dois pontos que poderiam ser considerados duvidosos ( $n=3$  e  $n=4$ ). Contudo não os retirei porque assim o novo ajuste teria poucos pontos.

- através do gráfico 8 é possível calcular a constante de atenuação,  $\alpha$ :

$$\ln\left(\frac{V_n}{V_1}\right) = [\ln(T) - 2\alpha l] n \quad \Leftrightarrow \ln(V_n) - \ln(V_1) = [\ln(T) - 2\alpha l] n \quad \Leftrightarrow \ln(V_n) = \overbrace{[\ln(T) - 2\alpha l]}^m n + \overbrace{\ln(V_1)}^b$$

$$m = \ln(T) - 2\alpha l \quad \Rightarrow \alpha = \frac{\ln(T) - m}{2l}$$

$$T = \frac{600 - 56}{600 + 56} = 0,829$$

$$T = \frac{Z_o - Z_c}{Z_o + Z_c}$$

,  $Z_o = 600 \Omega$  e usando  $Z_c$  calculado no estudo anterior ( $Z_c = 56 \pm 3 \Omega$ )

$$U^2(T) = \left(\frac{\partial T}{\partial Z_c}\right)^2 \cdot U(Z_c)^2$$

$$\Rightarrow U(T) = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial Z_o + \partial Z_c}\right)^2 \cdot U(Z_c)^2} = 0,008$$

$$T = 0,829 \pm 0,008, \quad l = 61,5 \text{ m}$$

- comparando com o  $T$  teórico,  $T_{\text{ref}} = 0,846$ , a percentagem de erro de  $T$  é de 2.0%, com uma incerteza percentual de 0.96%.

$$\alpha = \frac{\ln(0,83) + 0,469}{2 \cdot 61,5} = 0,00229$$

$$u^2(\alpha) = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)^2 \cdot u^2(T) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial m}\right)^2 u^2(m) = \left(\frac{1}{2 \cdot l \cdot T}\right)^2 u^2(T) + \left(-\frac{1}{2l}\right)^2 u^2(m)$$

$$\Rightarrow u(\alpha) = 0,00009$$

$$\alpha = 0,00229 \pm 0,00009 = (2,29 \pm 0,09) \times 10^{-3} \text{ dB/m}^{-1},$$

↳ para calcular  $u(\alpha)$ , mär utilizei a incerteza do  $l = 61,5 \text{ m}$ , uma vez que mär a sabia.

- verifica-se que  $\alpha < 0,02 \text{ dB/m}$ , tal como o protocolo sugeria.

- comparando com o obtido pelo grupo 7, da PLS, do ano de 2019, de  $\alpha = (2,61 \pm 0,03) \times 10^{-3}$ , obtemos um erro percentual de 12%, com uma incerteza percentual de 3.9%.

- Fazendo agora o gráfico de  $d$  em função de  $t$ :

$\sim 4\%$

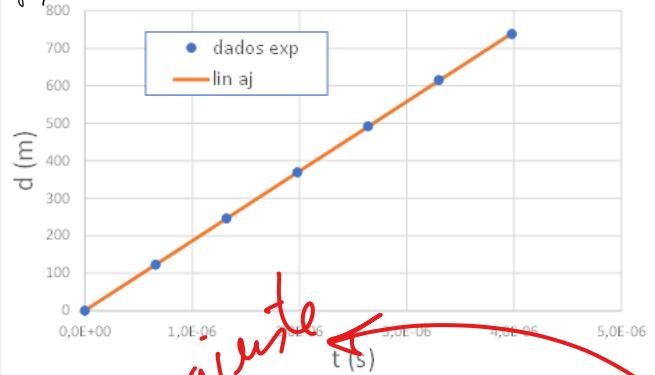
- neste registo, para calcular os instantes de tempo para cada pico reflectido, foi colocado o cursor vertical 1 do osciloscópio no 1º pico, correspondente ao incidente, e o cursor 2 no pico reflectido onde querímos medir o intervalo de tempo.

Tabela 2

$d$ (m)	$t$ (s)	$u(t)$ (s)	$d_{aj}$ (m)	Res $d$ (m)
0	0	0	0,66986	0,66986
123	6,60E-07	1,00E-09	123,2697	0,269662
246	1,32E-06	1,00E-08	245,8695	-0,13054
369	1,98E-06	1,00E-08	368,4693	-0,53074
492	2,64E-06	1,00E-08	491,0691	-0,93093
615	3,30E-06	1,00E-08	613,6689	-1,33113
738	3,98E-06	1,00E-08	739,9838	1,983816

m	$1,858 \times 10^8$	$0,7 \sigma_b$
$\sigma_m$	$3 \times 10^5$	$0,8 \sigma_b$
$r^2$	0,99998	$1 \sigma_{y,aj}$

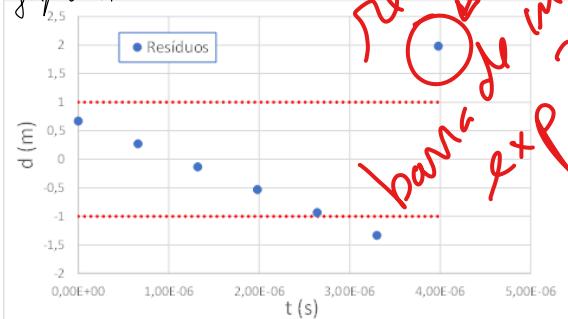
gráfico 10



- a gama experimental utilizada foi de  $t$  entre 0 s e  $3,98 \times 10^{-6}$ .

- no gráfico 10 observamos que os pontos **seguem uma excelente tendência linear**, onde parece que os pontos não apresentam qualquer desvio em relação ao ajuste.

gráfico 11



- no gráfico 11, os resíduos apresentam uma tendência **linear**, contudo, como os valores dos resíduos são extremamente pequenos em relação aos valores dos dados experimentais, estando muito próximos do valor do desvio padrão, não senti necessidade de retirar qualquer ponto ao ajuste.

- Podemos determinar a velocidade  $v$  de propagação da fase na linha coaxial, como sendo o declive do gráfico da distância em função do tempo:

$$v = (1,858 \pm 0,003) \times 10^8 \text{ m/s}^{-1}$$

**OBS:** zeros a mais nas escadas (às vezes)

- comparando com o valor  $v = (2,07 \pm 0,01) \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  obtido pelo grupo 4 da PL6, do ano 2023, obtive um erro percentual de 10%, com uma incerteza percentual de 0,2%.

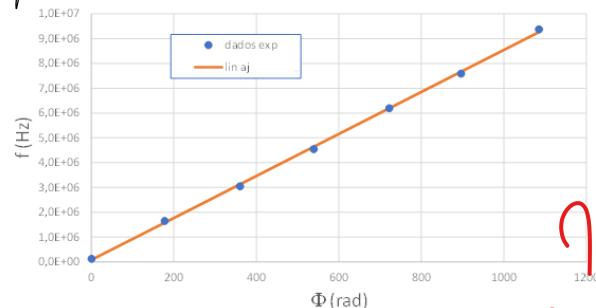
- Determinação da velocidade de propagação de sinal e numa linha coaxial, variando a frequência do sinal à entrada:

- neste estudo, variámos a frequência do sinal do gerador, numa gama entre 1 kHz e 10 MHz. Comegámos no valor mais elevado e procurámos o valor de  $f$  para o qual o sinal incidente e reflectido estavam em fase (observado no osciloscópio). Após isso, diminuímos o valor da frequência até encontrar os sinais em anti-fase, repetindo este processo sucessivamente até percorrer toda a gama. Notámos que, para valores mais baixos que 120 000 Hz, os sinais estavam sempre em fase.

Tabela 3

$f$ (Hz)	$u(f)$ (Hz)	$\Phi$ (graus)	$\Phi$ (graus)	$\Phi$ (radianos)	$f_{aj}$ (Hz)	Res $f_{aj}$ (Hz)
9,3800E+06	1,0E+02	5,06	1085,06	18,938	9270281	-1,10E+05
7,6000E+06	1,0E+02	176	896	15,638	7667198	6,72E+04
6,2000E+06	1,0E+02	2,23	722,23	12,605	6193763	-6,24E+03
4,5500E+06	1,0E+02	179	539	9,407	4640114	9,01E+04
3,0500E+06	1,0E+02	0,439	360,439	6,291	3126055	7,61E+04
1,6500E+06	1,0E+02	178	178	3,107	1579114	-7,09E+04
1,2000E+05	1,0E+01	0,432	0,432	0,008	73475	-4,65E+04

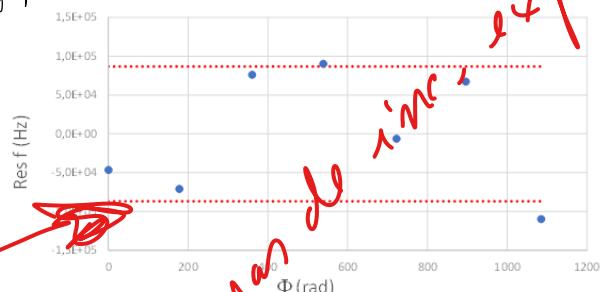
Gráfico 12



$m$	485824	69812	b
$\sigma_m$	5210	59074	$\sigma_b$
$r^2$	0,9994	86819	$\sigma_{yaj}$

- no gráfico 12, notámos que os valores seguem uma tendência linear, onde os dados experimentais não apresentam desvios significativos em relação ao ajuste.

Gráfico 13



- no gráfico 13, os resíduos estarão distribuídos de forma aleatória, tendo valores próximos ao desvio padrão, o que justifica um bom ajuste.

- os erros de erro não são vizinhos, já que o seu valor é inferior às unidades do gráfico de resíduos / valores das incertezas na Tabela 3).

- através da análise gráfica, podemos calcular a velocidade  $v$  de propagação do sinal numa linha coaxial, através da expressão:

$$\lambda = \frac{\varphi}{f}$$

$$y = n.c.K$$

$$y_1 - y_2 = K\Delta\varphi_1 - K\Delta\varphi_2$$

$$\Delta y = K\Delta n.c$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\varphi \Rightarrow \Delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi$$

$$\Delta n.c = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi$$

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi$$

$$l.f = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi \Rightarrow f = \frac{\lambda}{2\pi l} \Delta\varphi$$

$$m = \frac{\lambda}{2\pi l}$$

$$m = 485824$$

$$l = 61,5 \text{ m}$$

$$v = m \cdot 2\pi \cdot l = 1,877 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$u^2(\varphi) = \left( \frac{2\varphi}{\lambda} \right)^2 u^2(m) \Rightarrow u(\varphi) = \sqrt{(2\pi l)^2 u^2(m)} = 2.0 \times 10^6$$

$$v = (1,88 \pm 0,02) \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

- comparando com o valor referência da velocidade dado no protocolo  $v_{ref} = \frac{1}{\sqrt{c \cdot \mu}} = 186 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ , obtive um erro percentual de 1%, uma incerteza percentual de 1%.

## Conclusão e Resultados

- No estudo da amplitude do impulso refletido em função da impedância da carga ligada à linha coaxial, foi determinado o valor da impedância característica de  $Z_c = (563 \pm 2,4) \Omega$ , com uma incerteza percentual de 4,3% e um erro percentual de 0,5% em relação ao valor experimental encontrado ( $Z_c = 56,0 \Omega$ ) e um erro percentual de 11% relativo ao valor teórico ( $Z_c$  teórico =  $50,0 \Omega$ ).

Proposta

No estudo da determinação da constante de atenuação, obtive-se o valor  $\alpha = (2,29 \pm 0,09) \times 10^{-3} \text{ dB/m}$  com uma incerteza percentual de 4% e um erro percentual de 12%, comparado ao valor obtido pelo grupo 7 da PLS do ano de 2019, ( $\alpha = (2,61 \pm 0,03) \times 10^{-3}$ ). A velocidade  $v$  de propagação de fase na linha coaxial foi calculada, obtendo-se o valor  $v = (1,858 \pm 0,003) \times 10^8 \text{ m/s}$ , com uma incerteza percentual de 0,2% e um erro percentual de 10%, comparado com o valor obtido pelo grupo 4 da PLS do ano 2023 ( $v = (2,07 \pm 0,01) \times 10^8 \text{ m/s}^{-1}$ ), o que indica um excelente resultado.

- No último estudo, determinou-se a velocidade  $v$  de propagação de sinal numa linha coaxial, obtendo-se o valor  $v = (1,88 \pm 0,02) \times 10^8 \text{ m/s}^{-1}$ , com uma incerteza percentual de 1% e um erro percentual de 1%, comparado com o valor referência referido no protocolo ( $v_{ref} = 1,86 \times 10^8 \text{ m/s}^{-1}$ ), o que indica um excelente resultado.

- Através da primeira montagem, foi possível observar o sinal original e o sinal refletido, sendo o refletido de menor amplitude, como era previsto. Foi possível observar uma inversão do sinal para o curto-círcito, contudo para o circuito aberto, não foi possível observar a reflexão total do sinal, talvez devido a defeitos no cabo coaxial.
- Na segunda montagem, foi possível observar diversos sinais, que correspondiam às diferentes reflexões, sendo notável a diminuição das amplitudes em cada uma delas.
- Na terceira montagem, observámos as diferentes fases e anti-fases do sinal refletido em função do incidente, variando a frequência.