

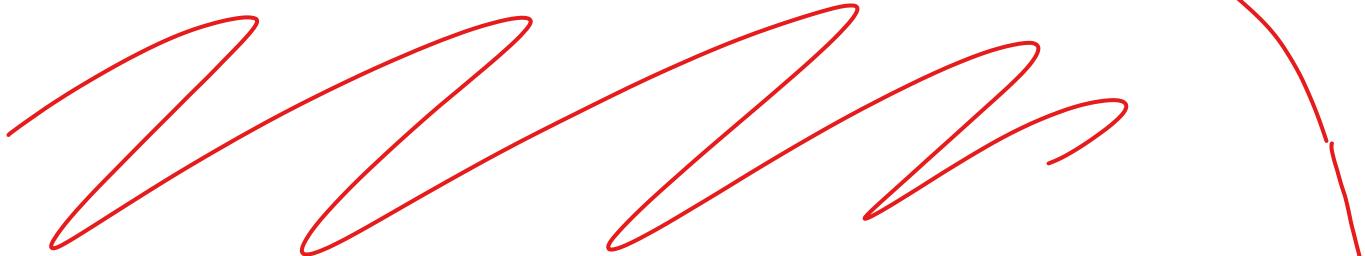
## Estudo do Cabo Coaxial

Josefa Santos

Licenciatura em Engenharia Física

Departamento de Física e Astronomia da Faculdade  
de Ciências da Universidade do Porto

A5



### Sumário

Este relatório pretende dar a conhecer o estudo da transmissão de impulsos através de um cabo coaxial. Visualizaram-se fenómenos como a atenuação do sinal e a reflexão de sinais no osciloscópio. Obtiveram-se os resultados previstos para grandezas tais como a impedância de carga,  $\varepsilon_r = 1,4\%$  e a velocidade de propagação do sinal,  $\varepsilon_r = 6,2\%$  e  $\varepsilon_r = 3,0\%$ . Foi ainda calculada a constante de atenuação, com  $\varepsilon_r = 2,7\%$ , em comparação com o valor de outro grupo que fez a mesma experiência.

1º obtei ponto



## 1. Introdução ~~tópico~~ [1] [2]

### 1.1. Cabo Coaxial

Um cabo coaxial é uma linha de transmissão uniforme que permite a propagação de energia eletromagnética. Por outras palavras, é um cabo elétrico condutor utilizado para transmitir sinais elétricos com baixa perda de informação.

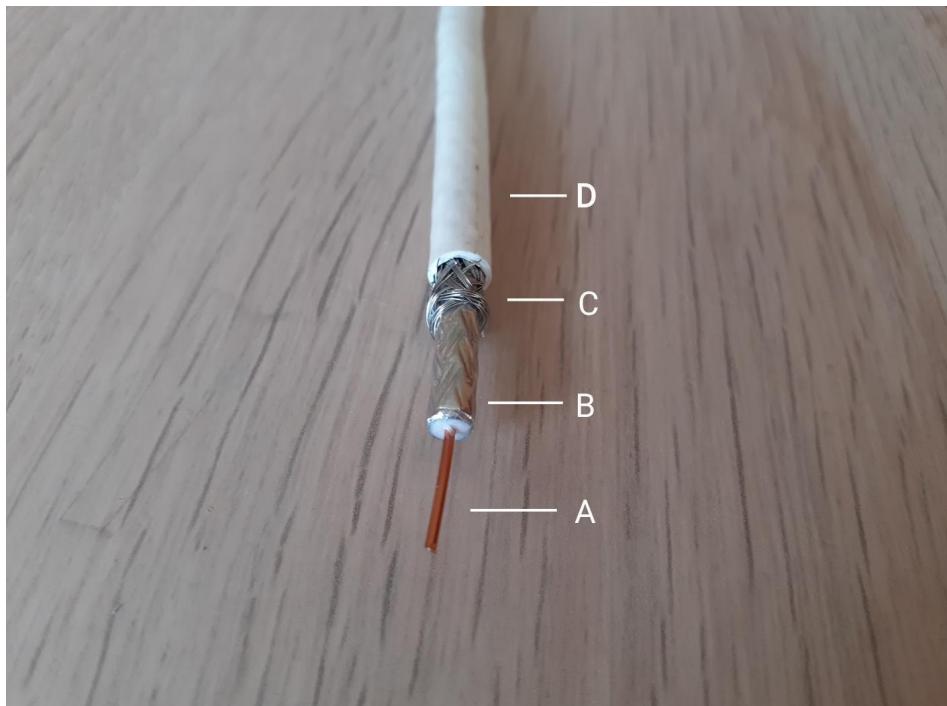


Figura 1: Principais componentes de um cabo coaxial. Legenda: A. Condutor interno; B. Isolador dielétrico com escudo de folha; C. Capa metálica; D. Revestimento protetor.

### 1.2. Componentes principais

Um cabo coaxial consiste em dois materiais condutores, a alma e a capa metálica, separados por um isolador e protegidos por um revestimento exterior. Todos estes componentes têm o mesmo eixo, daí a denominação "coaxial". A sua função de cada um é, mais detalhadamente:

- **Condutor interno**

Também conhecido como núcleo ou alma. Permite a condução do sinal.

- **Isolador interno**

Providencia uma separação entre a alma e a capa metálica, ambos os condutores. Caso fosse ideal, não aconteceriam perdas de sinal neste componente, pois, devido aos poucos eletrões livres, não seria percorrido por nenhuma corrente elétrica. No entanto, a realidade é que a maior perda de energia dos cabos coaxiais acontece neste componente.

- **Capa metálica**

Protege da interferência eletromagnética de sinais externos. Normalmente, é feita de um entrançado de metal em vez de um material sólido, o que permite que o cabo seja flexível.

- **Revestimento protetor**

Protege os componentes interiores das condições externas, como as ambientais, prevenindo danos.

### 1.3. Propriedades elétricas

Uma linha coaxial tem associada uma impedância característica. Caso a impedância característica seja diferente da impedância de carga, acontecem reflexões de onda. Isto significa que parte do sinal será refletido de volta para a fonte, em teoria com a mesma amplitude. Note-se que é desejável que isto não aconteça, pelo que na transmissão de sinais a impedância característica e a de carga devem ser iguais.

Para relacionar a onda incidente e a refletida, pode calcular-se o coeficiente de reflexão:

$$\Gamma_L = \frac{V_r(l,t)}{V_i(l,t)} = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \quad (1)$$

Em curto-circuito, espera-se que o sinal seja completamente invertido com a mesma amplitude, sendo  $\Gamma_L = -1$ . Em malha aberta, espera-se que o sinal seja completamente refletido com a mesma amplitude, sendo  $\Gamma_L = 1$ .

Tendo em conta que no osciloscópio a impedância de entrada é bastante elevada, o coeficiente será praticamente 1. No entanto, quando a onda se propaga de volta para o osciloscópio sofre uma atenuação, de fator  $\exp(-\alpha l)$ . Deste modo, a razão entre picos consecutivos será:

$$\begin{aligned} \frac{V_{i+1}}{V_i} &= \Gamma e^{-2\alpha l} \\ \Leftrightarrow \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V_i}\right) &= \ln(\Gamma e^{-2\alpha l}) \\ \Leftrightarrow \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V_i}\right) &= \ln(\Gamma) + \ln(e^{-2\alpha l}) \\ \Leftrightarrow \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V_i}\right) &= \ln(\Gamma) - 2\alpha l \\ m &= [\ln(\Gamma) - 2\alpha l] \\ \Leftrightarrow 2\alpha l &= \ln(\Gamma) - m \\ \Leftrightarrow \alpha &= \frac{\ln(\Gamma) - m}{2l} \quad (2) \end{aligned}$$

É possível ainda calcular a velocidade de propagação dos sinais elétricos no cabo coaxial.

Tendo informação sobre os instantes em que ocorrem a atenuação já referida e que a distância entre os picos atenuados é  $d = 2\pi L$ :

$$v = \frac{d}{t} \quad (3)$$

Outra forma de calcular a velocidade de propagação é tendo em conta que caso a frequência do sinal de entrada se altere, a diferença de fase muda: para  $f = 0$ , os sinais estão em fase e então  $\phi = 0$ ; estão em antifase quando  $\phi = 2\pi$ . Assim:

$$\begin{aligned} v &= \lambda f \\ \Leftrightarrow v &= \frac{2\pi l}{\Phi} f \\ \Leftrightarrow f &= \frac{v}{2\pi l} \Phi \\ \Leftrightarrow m &= \frac{v}{2\pi l} \\ \Leftrightarrow v &= 2\pi l m \end{aligned} \quad (4)$$

O valor de referência para a velocidade de propagação é dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = 1,98 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Considerando que  $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  e que  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ .

## 1.4. Aplicações [3]

Vamos agora explorar algumas das variadas utilidades do cabo coaxial. É importante referir que a extensão destes cabos pode ir de meros milímetros até milhares de quilómetros, o que leva a uma vasta lista de aplicações.

- **Televisões:** a ligação entre a antena e algumas televisões domésticas é feita através destes cabos;
- **Broadcasting:** transferência do transmissor para a antena;
- **Sistema de teste:** conexão de equipamentos que usam sinais de alta frequência;
- **Sistemas de intercomunicação:** tais como sistemas de segurança;
- **Comunicações de rádios comerciais;**
- **Funcionamento de equipamentos.**

Existem vários tipos de cabos, tais como o RG-6, o RG-11 ou RG-213. No entanto, neste trabalho, vai ser estudado o RG-58, que é um cabo coaxial mais fino, normalmente usado em transmissão de sinais de alta frequência. Pode ser aplicado em redes de comunicação de dados, tais como sistemas de intercomunicação.

## 2. Experiência

### 2.1. Objetivos

- I. Estudo da transmissão de impulsos através de um cabo coaxial em:
  - A. Circuito fechado;
  - B. Malha aberta;
- II. Determinação das seguintes grandezas:
  - A. Impedância de carga
  - B. Constante de atenuação,  $\alpha$
  - C. Velocidade de propagação,  $v$ , a partir do registo de:
    1. Amplitudes,  $V_n$ , de uma sequência de impulsos;
    2. Frequência,  $f$ , do sinal de entrada
    3. Diferença de fase,  $\varphi$ , entre o sinal de entrada e o refletido

### 2.2. Material

O material utilizado foi o seguinte:

1. Gerador de impulsos <sup>\*1</sup>
2. Gerador de sinais <sup>\*2</sup>
3. Linha coaxial <sup>\*3</sup>
4. Caixa de resistências
5. Osciloscópio
6. Adaptador de impedâncias
7. Bobina do cabo coaxial

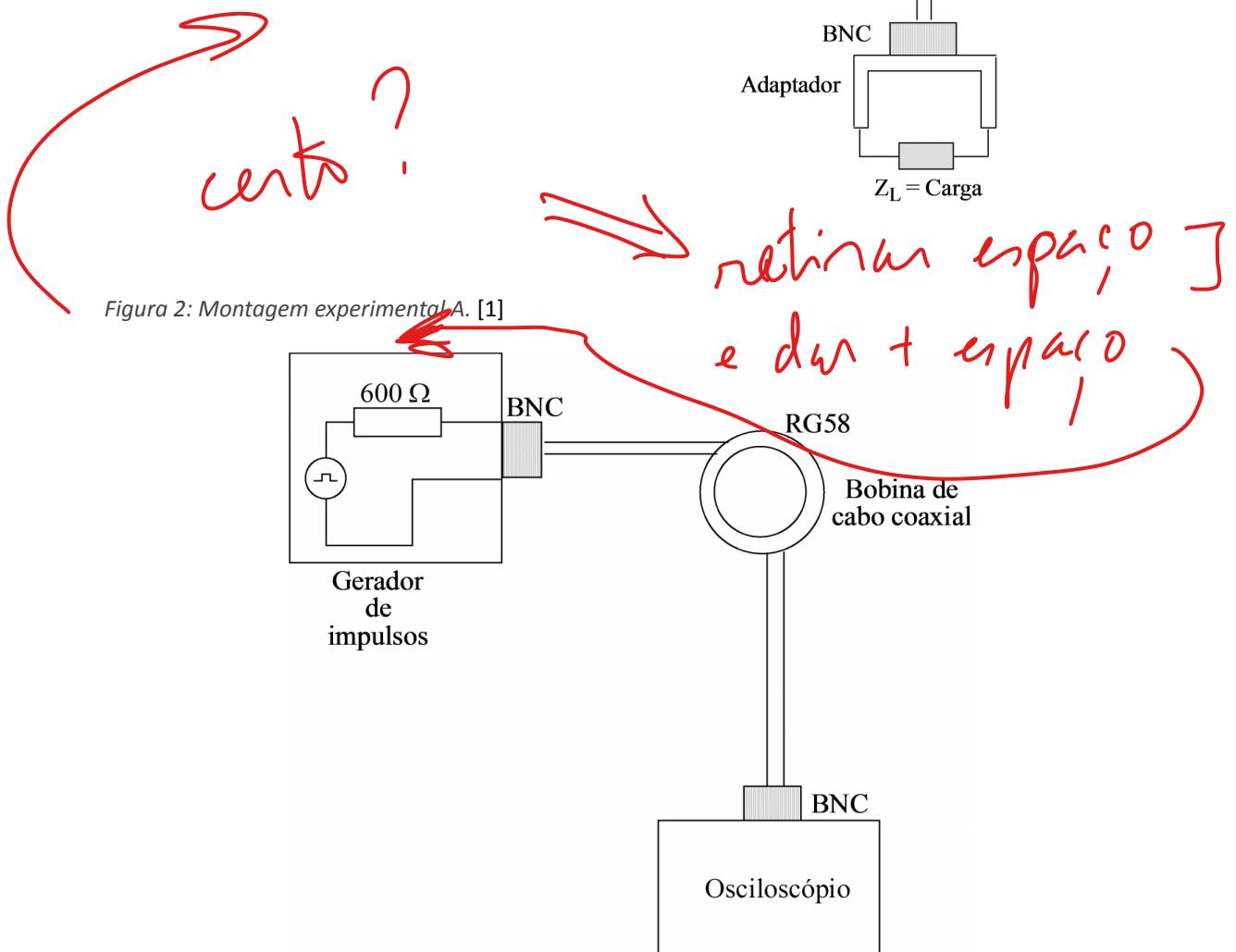
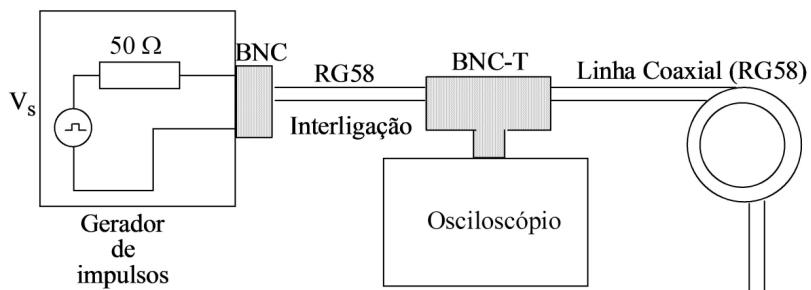
Especificações:

<sup>\*1</sup> com fonte de alimentação agregada, resistência interna comutável ( $50\ \Omega$  ou  $600\ \Omega$ ) e saída coaxial BNC

<sup>\*2</sup> com resistência interna de  $50\ \Omega$  e saída coaxial BNC

<sup>\*3</sup> cabo coaxial RG85 ( $63,50 \pm 0,05\ m$ ), condutores em cobre estanhado ( $a = 0,9\ mm$ ), dielétrico polietileno ( $b = 2,95\ mm$ ), revestimento externo PVC, impedância característica  $50\ \Omega$ , capacidade  $100\ pF/m$ , atenuação  $< 0,02\ dB/m$  @  $10\ MHz$

## 2.3. Esquemas Experimentais



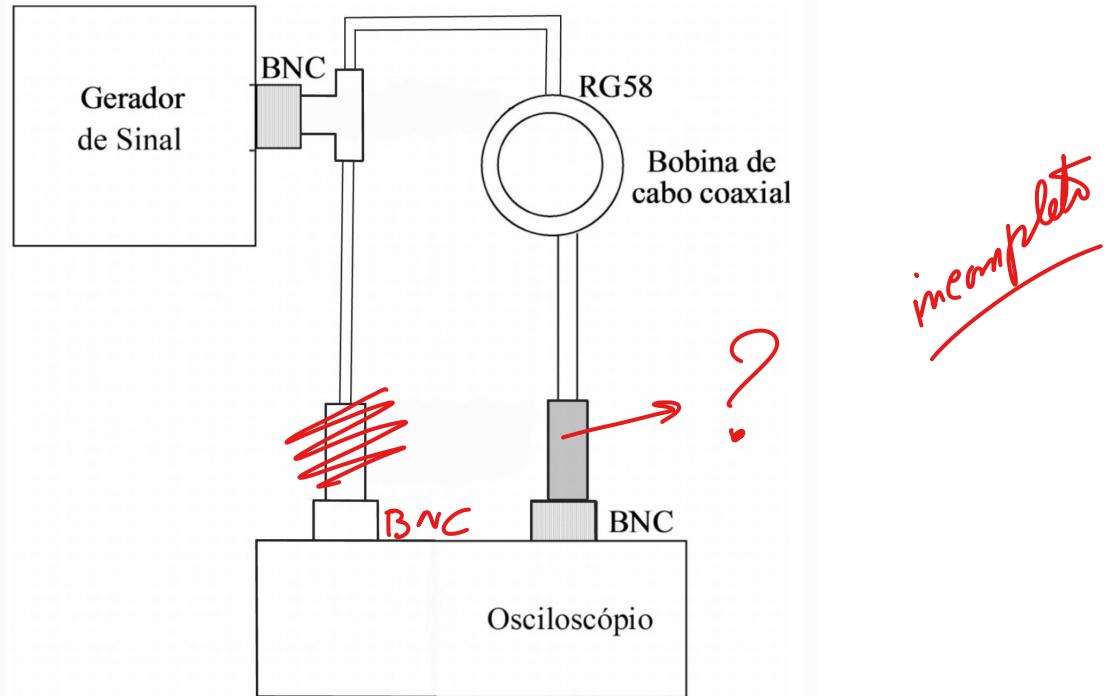


Figura 4: Montagem experimental C, adaptada a partir da imagem do protocolo. [1]

## 2.4. Execução Experimental

Começou-se por realizar a montagem A, de forma a estudar a amplitude do impulso refletido. Escolheu-se o valor  $50 \Omega$  para a impedância do gerador ser igual à do cabo coaxial, para não haver reflexões de impulsos. Colocou-se o cabo em malha aberta e em curto circuito e anotou-se o visualizado, figura 5 e 6. Mediu-se da amplitude do impulso refletido, com os cursorres do osciloscópio, variando sucessivamente a resistência. Teve-se sempre em conta que um dos picos devia coincidir com a amplitude inicial do sinal de entrada. Aumentou-se ao máximo a escala vertical do osciloscópio para a medição ser mais precisa, como demonstrado no anexo, figura 25 e 26.

Sucedeu-se à realização da montagem B, com o intuito de estudar a atenuação observada e a velocidade de propagação do sinal. Escolheu-se o valor  $600 \Omega$  para a impedância do gerador. Analisou-se a diminuição da amplitude dos picos do sinal com o tempo, figura 13. Registou-se os valores da amplitude e o número correspondente a esse pico. Registaram-se ainda as distâncias percorridas pelo sinal.

Na montagem C, variou-se a frequência de entrada do sinal, registando também a variação de fase.

### 3. Análise de Dados e Resultados

#### 3.1. Circuito A

Começou-se por estudar a amplitude do impulso refletido, quer em linha aberta, quer em curto-circuito. Os perfis observados no osciloscópio encontram-se de seguida:



Figura 5: Visualização do impulso refletido no osciloscópio com a linha em curto-circuito

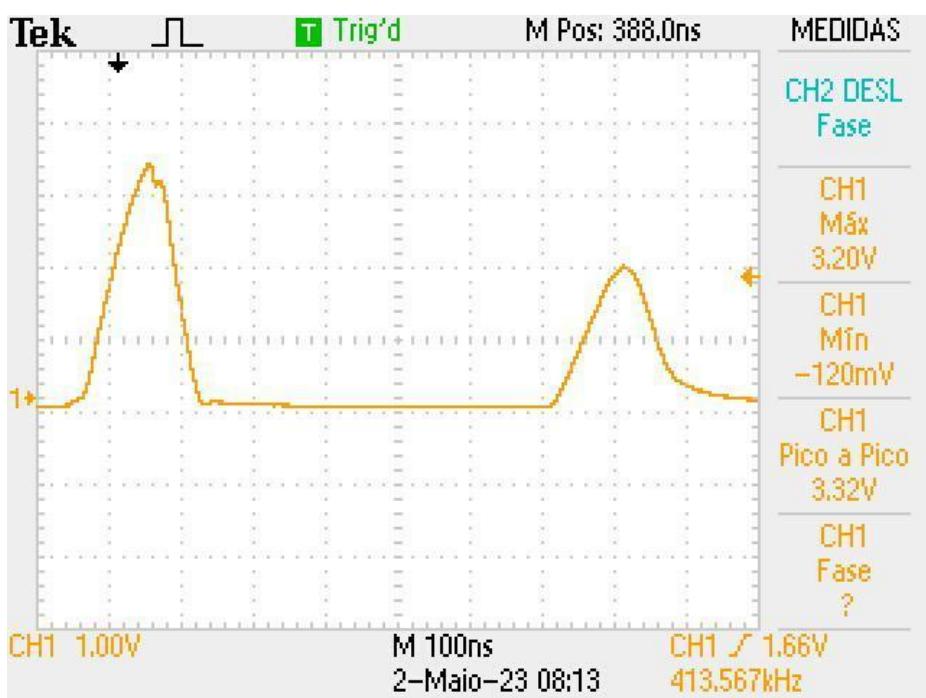


Figura 6: Visualização do impulso refletido no osciloscópio com a linha em malha aberta

Em ambas as figuras acima, o sinal foi refletido com uma amplitude menor. Isto acontece pois os sinais refletidos percorrem uma distância maior, assim sendo, sofrem atenuação. Como esperado, na situação de curto-círcuito,  $Z_L = 0$ , o sinal foi totalmente invertido, verificando-se que  $\Gamma = -1$ . Na situação de malha aberta,  $Z_L = \infty$ , o impulso não é invertido, verificando-se que  $\Gamma = 1$ .

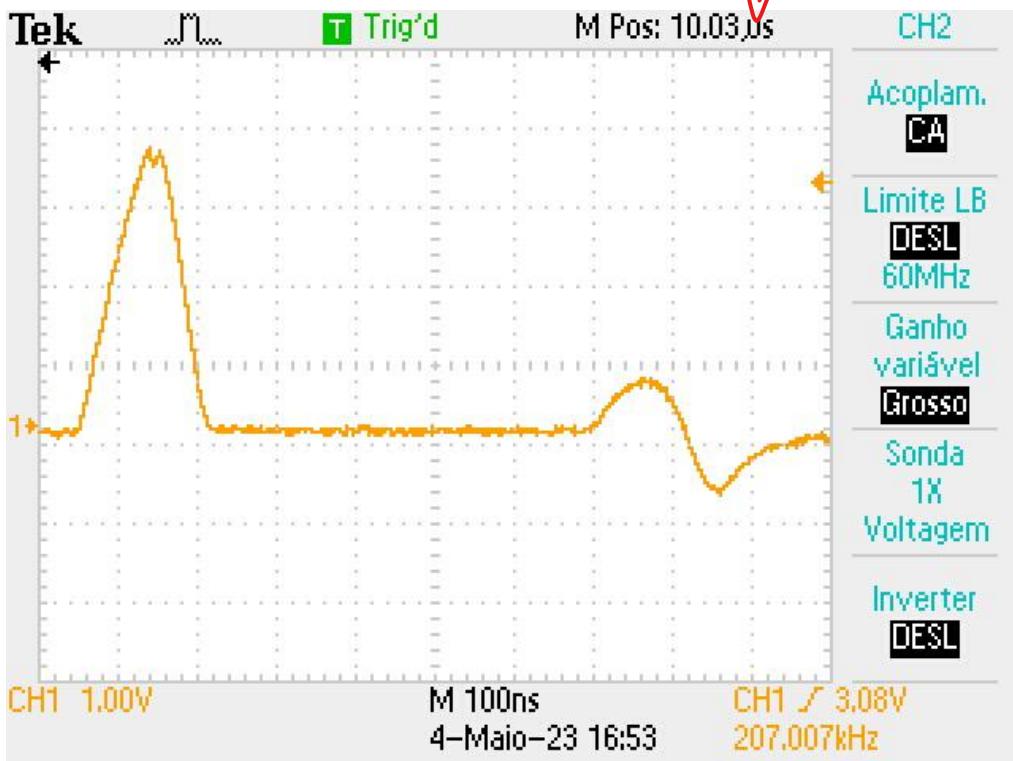
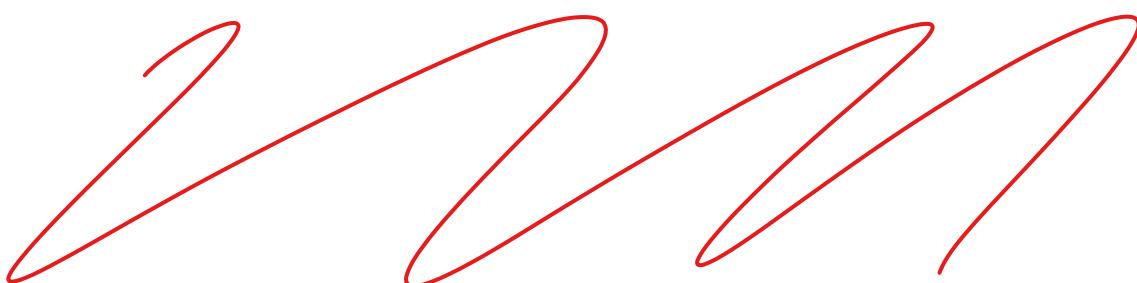


Figura 7: Visualização do impulso refletido no osciloscópio com a linha em malha aberta

Nos valores intermédios, aumentando sucessivamente a impedância da carga ligada ao cabo coaxial, visualizou-se que a parte negativa diminuiu, aumentando a positiva. Decidiu-se, então, estudar de que forma aconteceu esta variação. Sabendo que o nosso valor de interesse era  $50\Omega$ , medimos a amplitude do impulso ao redor desse valor. Construiu-se então o gráfico  $V_L(Z_L)$ . O valor de  $V_L$  é a diferença entre a amplitude positiva e o módulo da amplitude negativa.



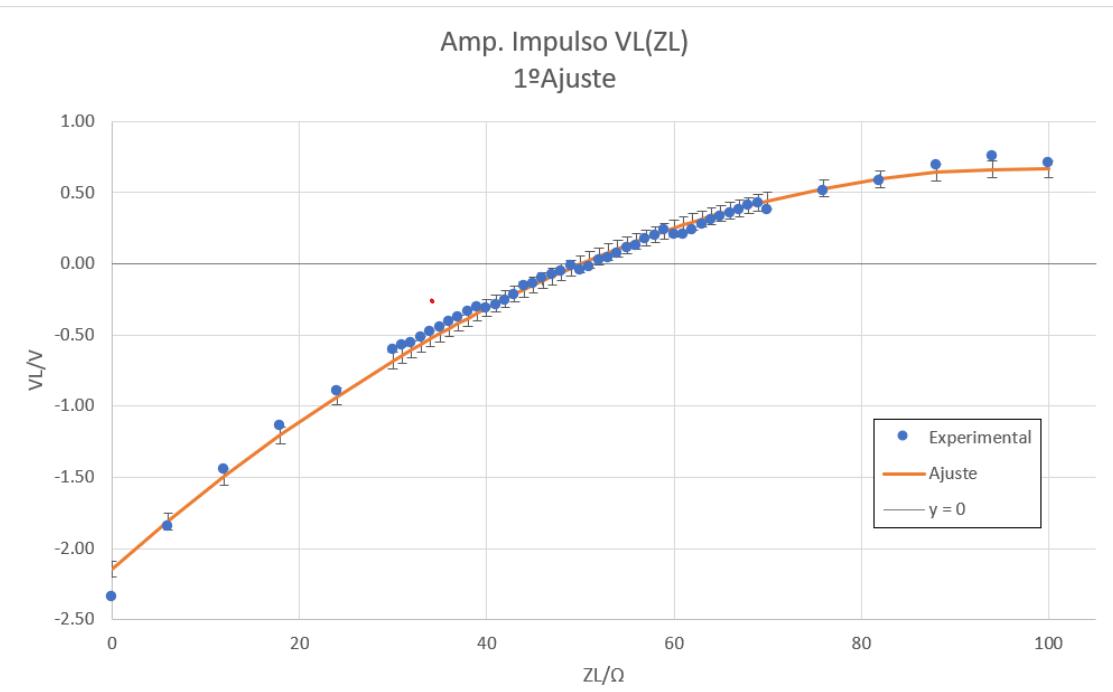


Figura 8: Gráfico da amplitude do impulso refletido,  $V_{L'}$ , em função da impedância de carga acoplada à linha coaxial,  $Z_{L'}$ , com um ajuste polinomial.

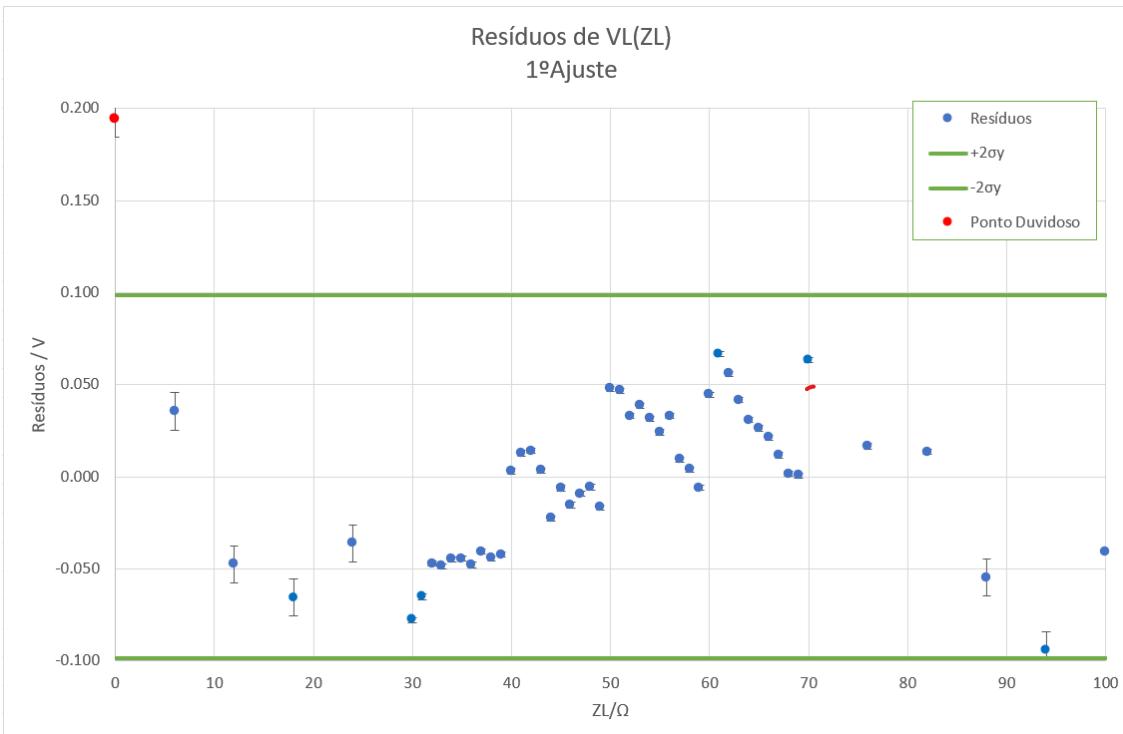


Figura 9: Resíduos do associado ao 1º ajuste polinomial  $V_L(Z_L)$

NOTA: as anilizes preliminares devem ser remetidas para anexo,

Parâmetros do 1º Ajuste VL(ZL)			
	a	b	c
Valor	-0.00030	0.058	-2.15
u()	0.00001	0.001	0.03
r^2/oy	0.994	0.05	

Figura 10: Parâmetros do 1º ajuste polinomial de 2 grau de  $V_L(Z_L)$

Analizando a figura 7, é claramente visível que o conjunto de pontos do intervalo [30, 70] contribui fortemente para o ajuste. Visualizou-se ainda um ponto completamente fora do intervalo de confiança, o qual se considerou como sendo duvidoso. Decidiu-se então que era necessário fazer um novo ajuste polinomial.

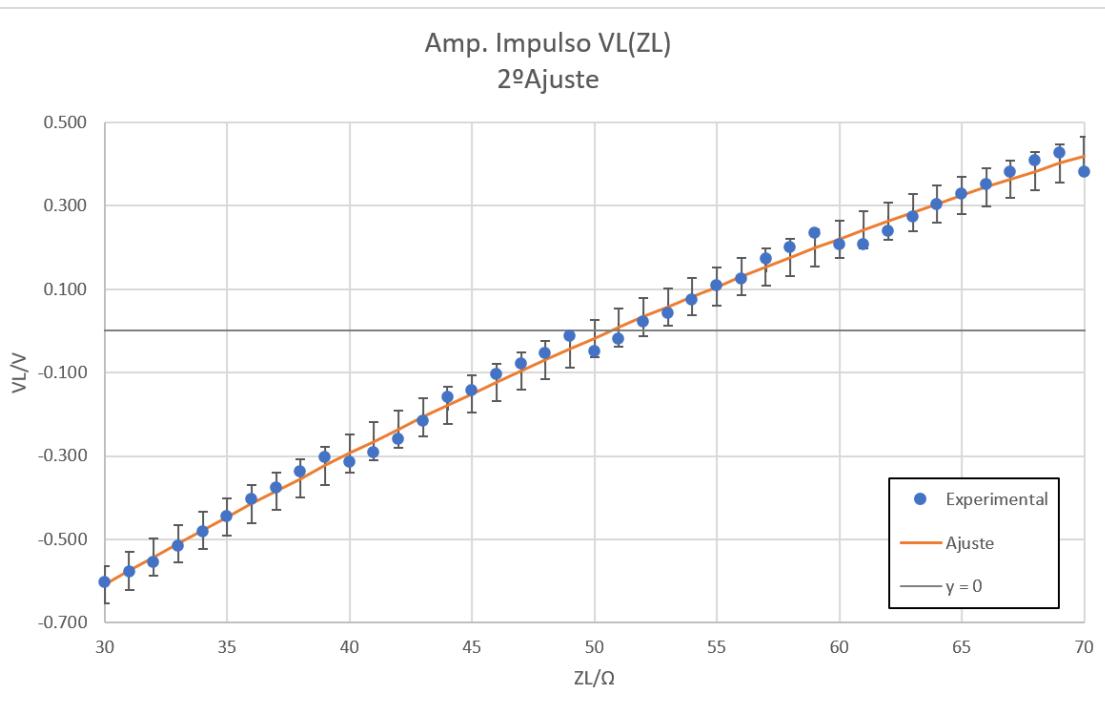
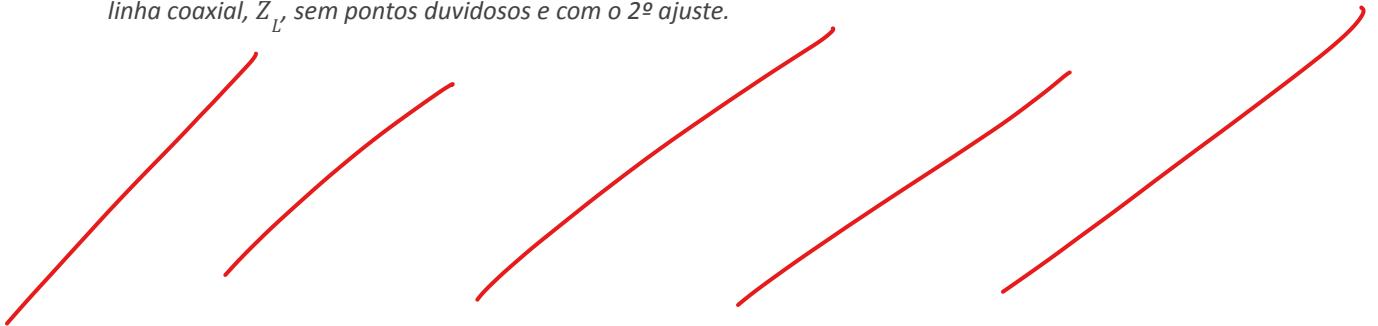


Figura 11: Gráfico da amplitude do impulso refletido,  $V_L/V$ , em função da impedância de carga acoplada à linha coaxial,  $Z_L$ , sem pontos duvidosos e com o 2º ajuste.



NOTA: em vários gráficos tem zeros a mais na graduação das escalas

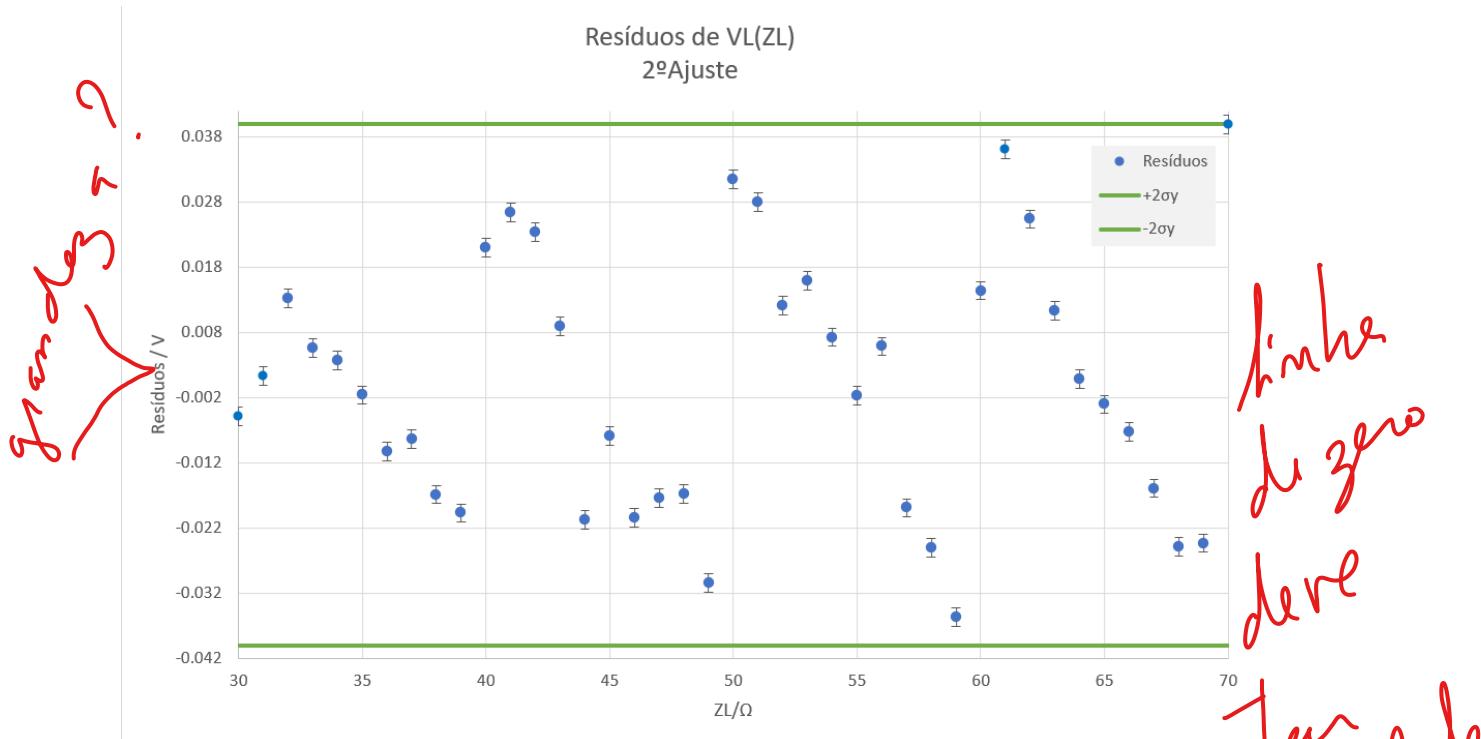


Figura 12: Resíduos do associado ao 2º ajuste polinomial  $V_L(Z_L)$

Parâmetros do 2º Ajuste VL(ZL)			
	a	b	c
Valor	-0.00019	0.045	-1.78
$u()$	0.00002	0.003	0.06
$r^2/\sigma_y$	0.996	0.02	

Figura 13: Parâmetros do 2º ajuste polinomial de 2 grau de  $V_L(Z_L)$

Analizando o gráfico de resíduos, verifica-se que todos os resíduos se encontram no intervalo de confiança. Observou-se uma tendência em serra no intervalo de  $[30, 70] \Omega$ , com patamares de 10 em  $10 \Omega$ . Esta mudança é equivalente ao degrau que também é visível no gráfico da figura 10. Associou-se esta ocorrência à mudança do valor das dezenas de uma resistência. Uma possibilidade para este erro sistemático é que o valor de uma resistência de ligação interna estivesse errada.

Calculamos então o valor de  $Z_c$  a partir do ajuste polinomial da figura 12:

$$y = -0.00019x^2 + 0.045x - 1.78$$

Sabemos que  $Z_c$  é o ponto de interseção da linha de ajuste com a equação  $Z_L = 0$ , logo:

$$y = 0 \Rightarrow x = Z_c = 50.69 \Omega$$

Tendo em conta que a incerteza dos parâmetros do ajuste polinomial, calculou-se a incerteza associada ao cálculo de  $Z_c$ , presente nos anexos na secção das incertezas :

$$\mu(Z_c) = 9 \rightarrow \% ?$$

Tendo em conta que o valor especificado para a impedância característica da linha coaxial é 50 Ω, calculámos o erro relativo a este valor:

$$\varepsilon_r = 1,37\% \approx 1,4\%$$

Assim sendo, o resultado obtido foi:

$$Z_c = (50 \pm 9) \Omega$$

Este valor tem um erro associado muito baixo. No entanto, tem um valor de incerteza alto. Para diminuir a incerteza era necessário diminuir as incertezas do ajuste polinomial. Acredita-se que isso poderia acontecer caso o intervalo de valores utilizado fosse de [20, 80] Ω, pois o ajuste seria mais adequado.

*(Mas a medição seria ter + certeza de Z, medindo Z com um ohmímetro!)*

### 3.2. Circuito B

Na análise inicial da do sinal no osciloscópio viu-se que este era atenuado. Assim, nesta parte da análise, decidiu-se fazer o estudo da constante de atenuação e ainda da velocidade de propagação de fase.

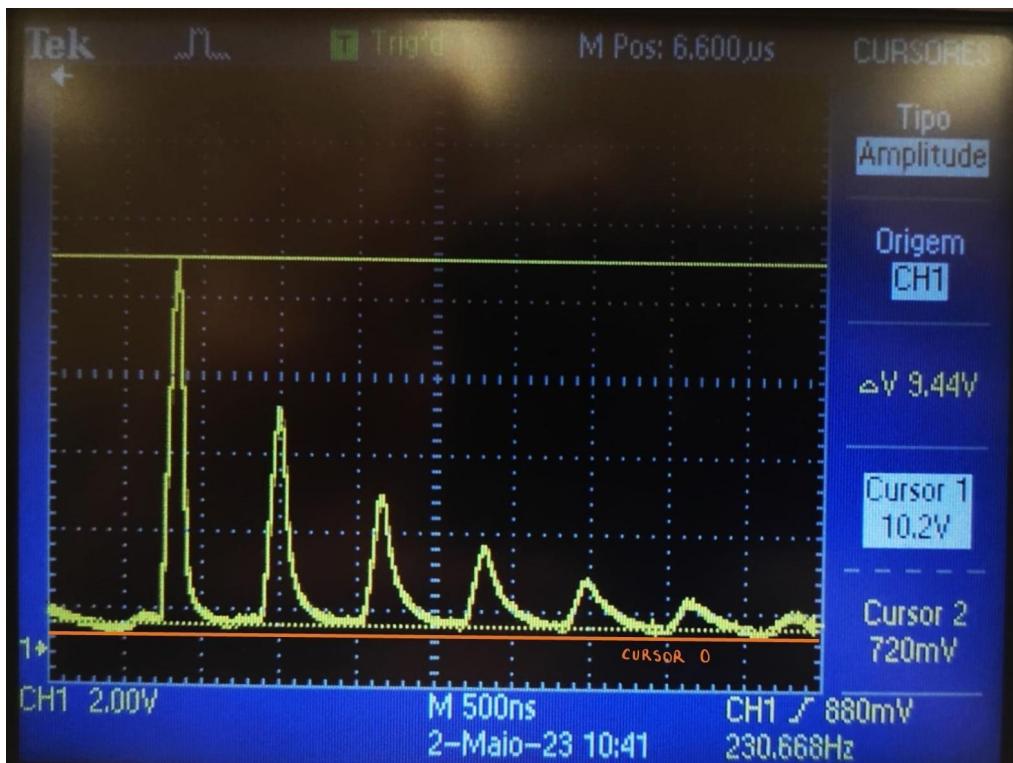


Figura 14: Visualização do sinal e dos sucessivos picos no osciloscópio. IMPORTANTE: a posição do cursor foi alterada : as medidas foram feitas com o cursor do zero na posição da linha laranja, isto é, na posição mais baixa do último pico!

*e a escala usada foi esta?*  
*Devia ter sido otimizada!*

Na análise da figura acima, observou-se que não só a amplitude dos picos diminui, mas também os picos se tornam mais largos. Isto acontece devido à resistência acoplada em série, que introduz uma atenuação por efeito de joule.

Fez-se então um gráfico do logaritmo natural da tensão de cada pico em função do número n do impulso.

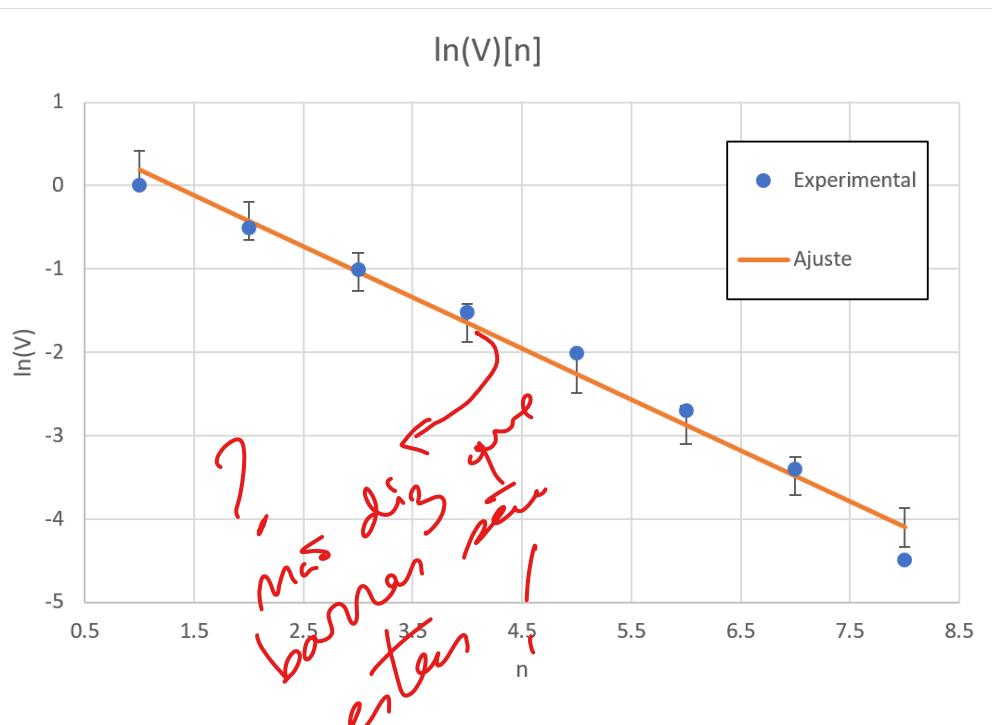


Figura 15: Gráfico da linearização do logaritmo da amplitude do pico dos impulsos refletidos,  $V$ , em função do número  $n$  do pico.

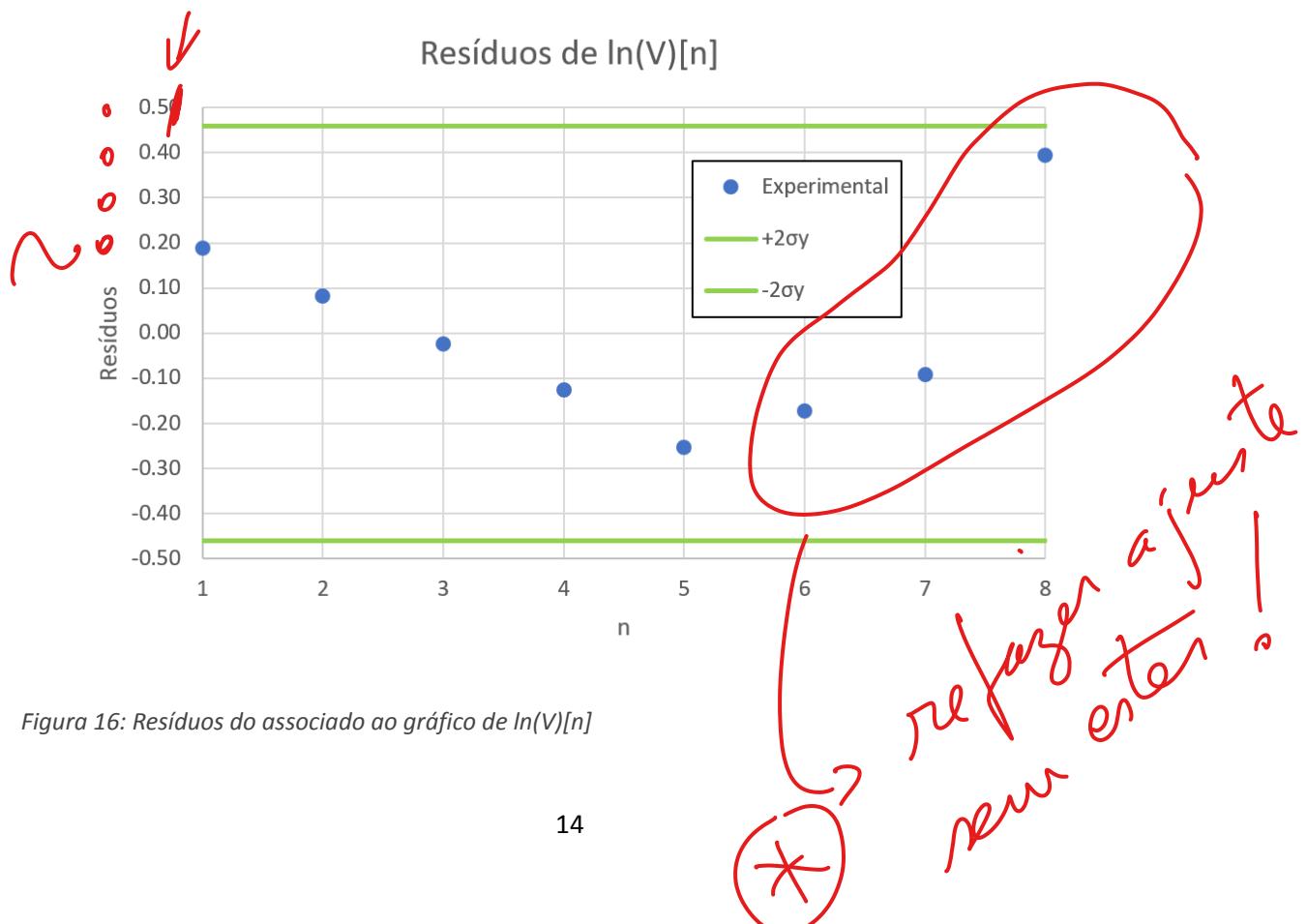


Figura 16: Resíduos do associado ao gráfico de  $\ln(V)[n]$

Nota: Não foram apresentadas barras de erro e de incerteza, porque estas eram demasiado pequenas, não adicionando informação relevante.

Parâmetros de Ajuste $\ln(V)[n]$			
m	-0.61	0.8	b
$u(m)$	0.04	0.2	$u(b)$
$r^2$	0.98	0.2	$\sigma_y$

Figura 17: Parâmetros do ajuste linear de  $\ln(V)[n]$

Tendo em conta que o valor de  $r^2$  do ajuste linear é alto e que todos os resíduos do gráfico da figura 15. se encontram dentro do intervalo de confiança, considerou-se um bom ajuste.

Assim, passou-se ao cálculo do valor da constante de atenuação a partir da equação (2) da introdução teórica, tendo em conta o valor experimental do coeficiente de reflexão, equação (1):

$$\Gamma_L = 0.84$$

$$\mu(\Gamma_L) = 0.02$$

$$\alpha = 0.0036$$

$$\mu(\alpha) = 0.0004$$

Assim, o valor obtido foi:

$$\alpha = (3,6 \pm 0,4) \text{ dB mm}^{-1}$$

Não há nenhum valor de referência para o valor da constante de atenuação. Por esse motivo, calculouse o erro relativo assumindo como valor teórico a média de dois valores experimentais, o valor acima e o valor obtido pelo grupo do colega Guilherme Botelho. Note-se que este valor de erro relativo apenas serviu para uma questão de proximidade de valores, porque o valor do outro grupo também é experimental, não sendo o valor real.

$$\alpha_2 = 3,8 \text{ dB mm}^{-1}$$

$$\varepsilon_r = 2,70\%$$

Passou-se, então, ao estudo da velocidade de propagação de fase do sinal. Construiu-se um gráfico da distância percorrida pelo sinal em função do tempo, tendo em conta os instantes a que ocorreram os picos.



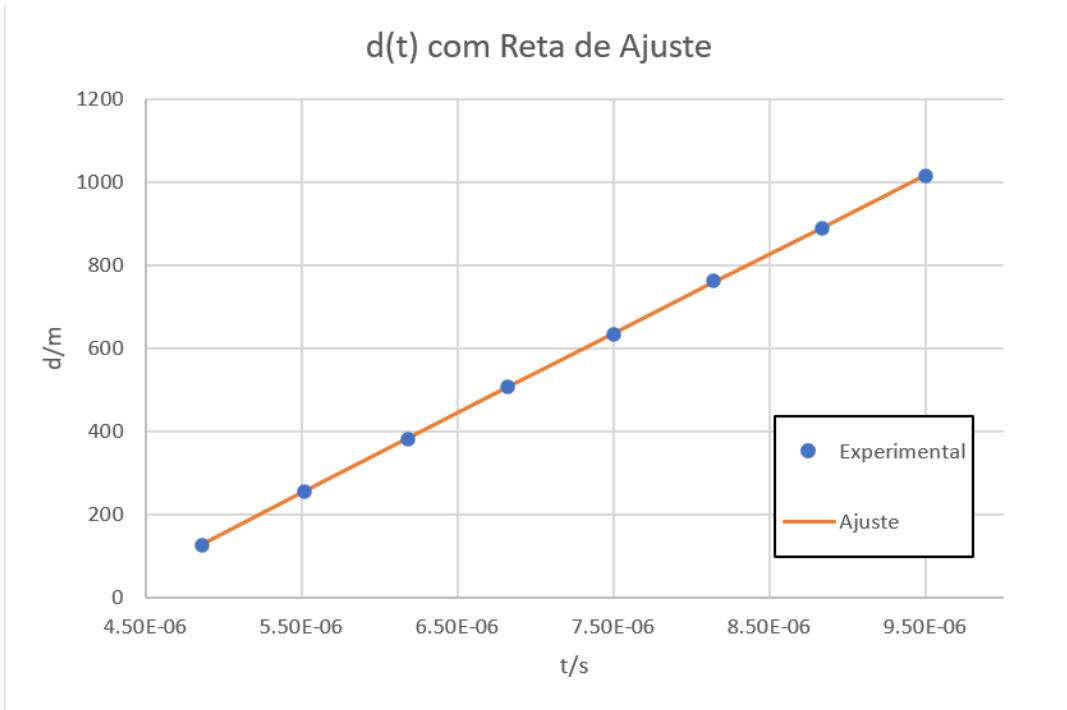


Figura 18: Gráfico da linearização da distância percorrida pelo sinal,  $d$ , em função do tempo,  $t$ .

Parâmetros de Ajuste $d(t)$			
$m$	1.857E+08	-778	$b$
$u(m)$	7E+05	5	$u(b)$
$r^2$	0.99993	3	$s_y$

Figura 19: Parâmetros do ajuste linear de  $d(t)$

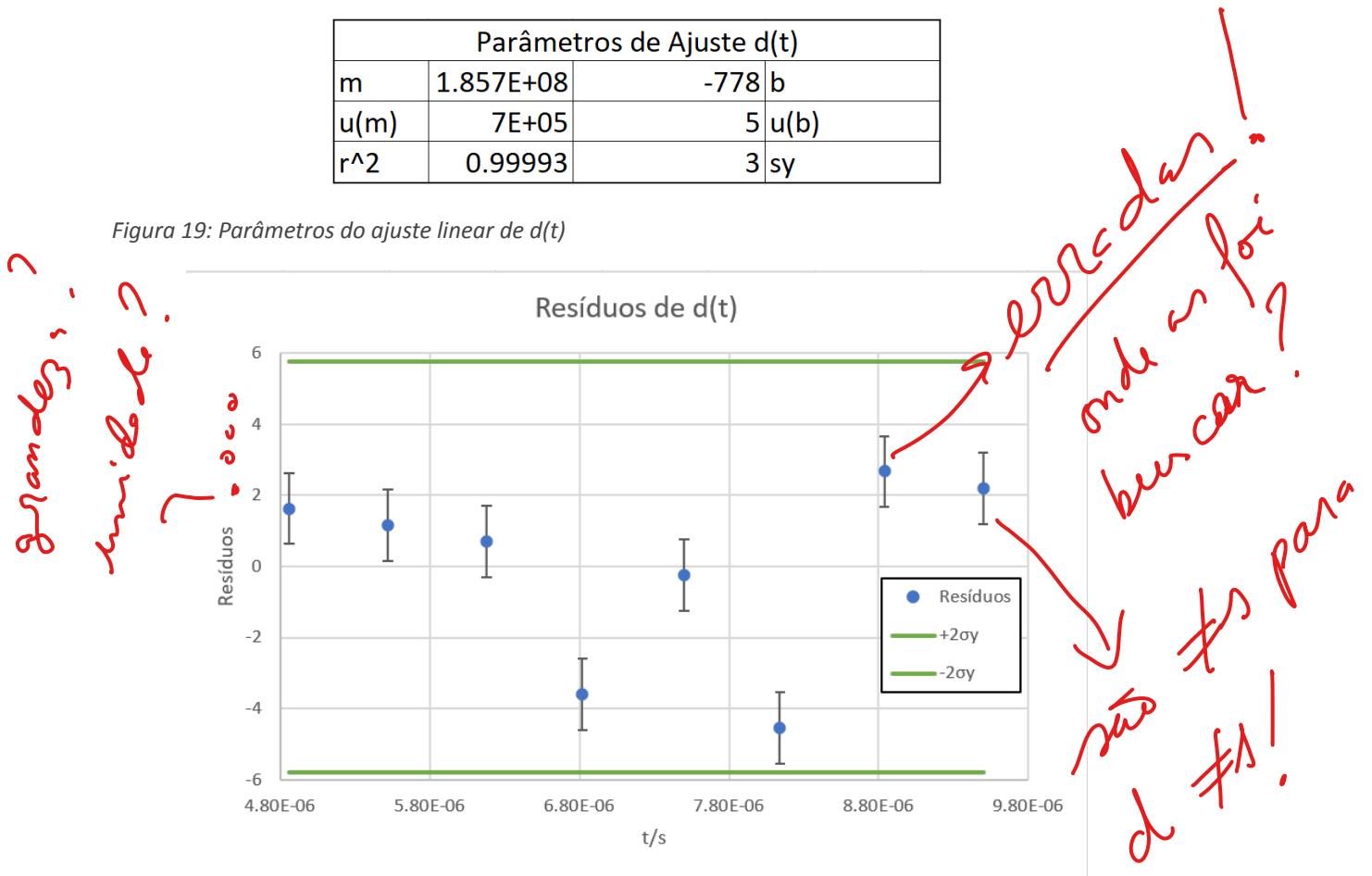


Figura 20: Resíduos do associado ao gráfico de  $d(t)$

Tendo em conta que todos os valores de resíduos se encontram dentro do intervalo de confiança e que o valor de  $r^2$  do ajuste é bastante elevado, podemos considerar que o ajuste feito é bom.

Tendo em conta a equação (3) da introdução teórica, então o valor da velocidade de propagação do sinal é:

$$m = v = 1.857 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

E o valor da incerteza será o mesmo valor da incerteza do declive:

$$\mu(v) = \mu(m) = 7 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

O valor final é:

$$v = (1.875 \pm 0.007) \cdot 10^8 \text{ m/s}^{-1}$$

O erro, comparando com o valor de referência é:

$$\varepsilon_r = 6,22\%$$

### 3.3. Circuito C

De seguida, foi feito o estudo da velocidade de propagação de um sinal tendo em conta a variação da sua frequência à entrada.

Para isso, começamos pela análise das seguintes visualizações no osciloscópio.

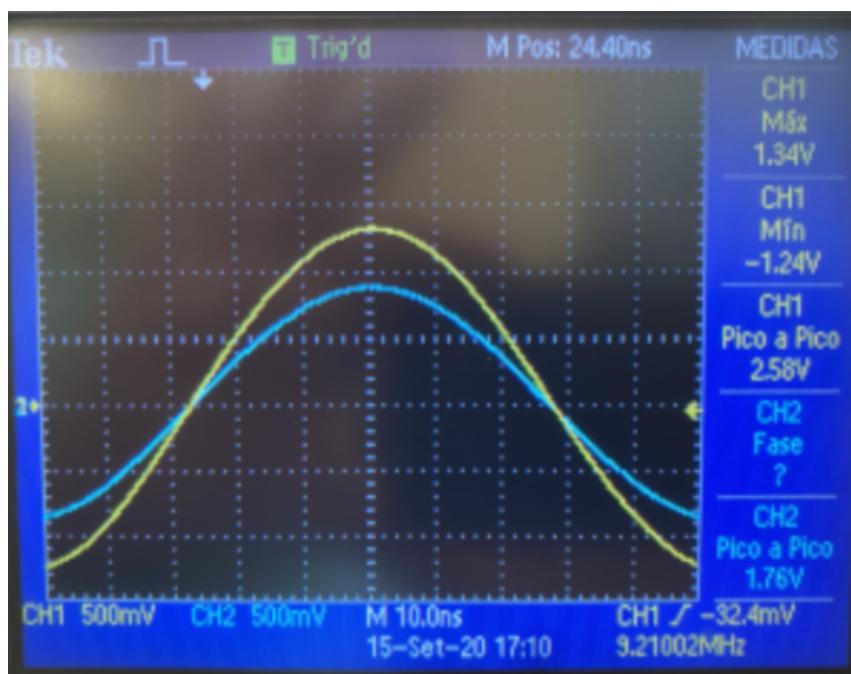


Figura 21: Visualização do sinal no osciloscópio. Sinais em fase. [1]

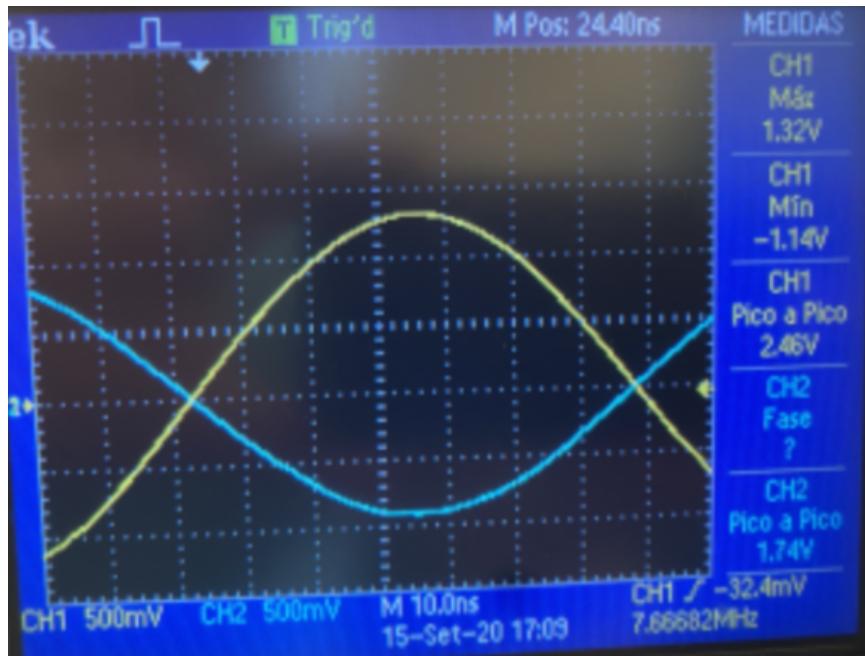


Figura 22: Visualização do sinal no osciloscópio. Sinais em antifase.

Construímos um gráfico da frequência do sinal à entrada da linha coaxial em função da diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal refletido na linha coaxial. [1]

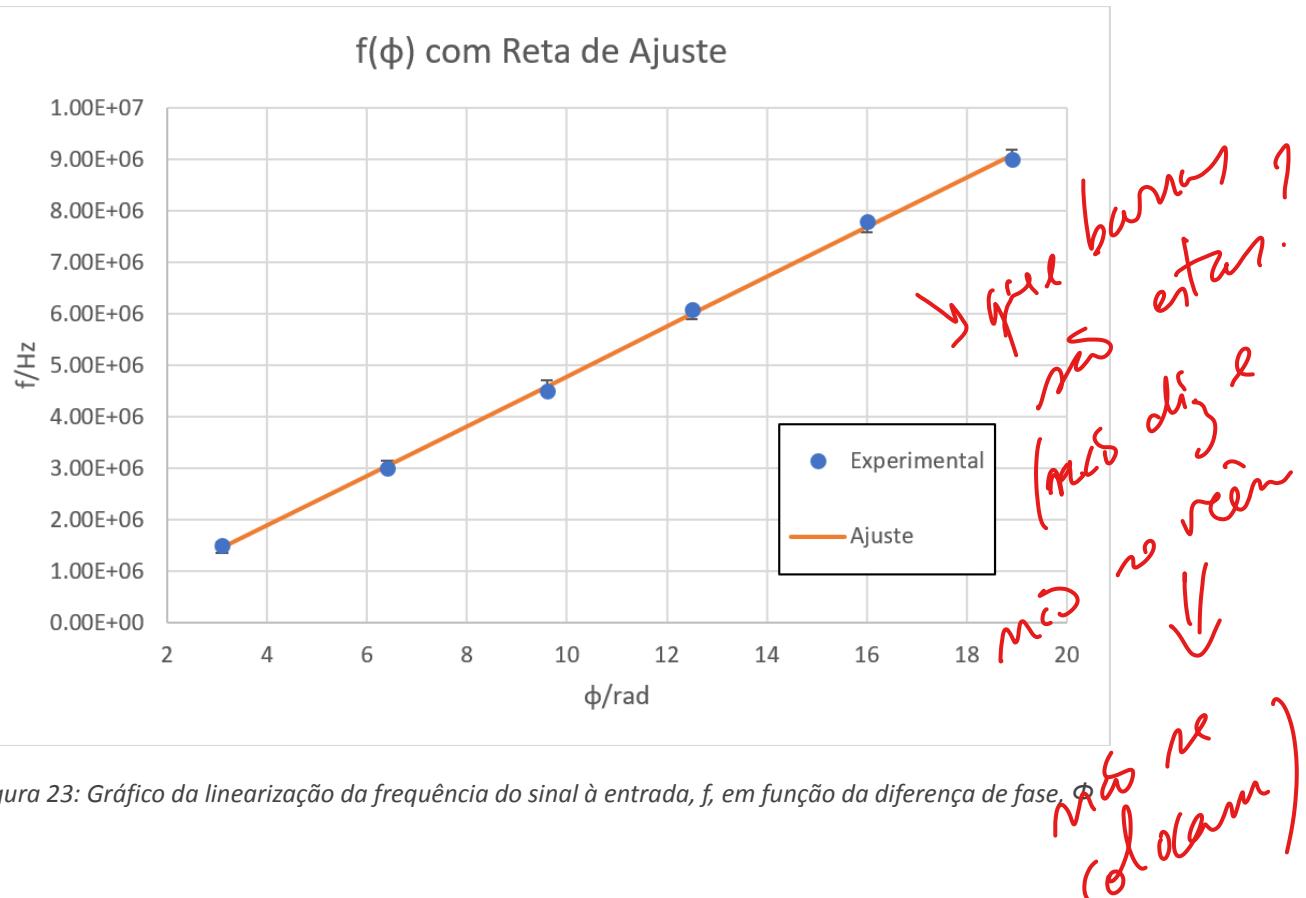


Figura 23: Gráfico da linearização da frequência do sinal à entrada,  $f$ , em função da diferença de fase,  $\phi$ .

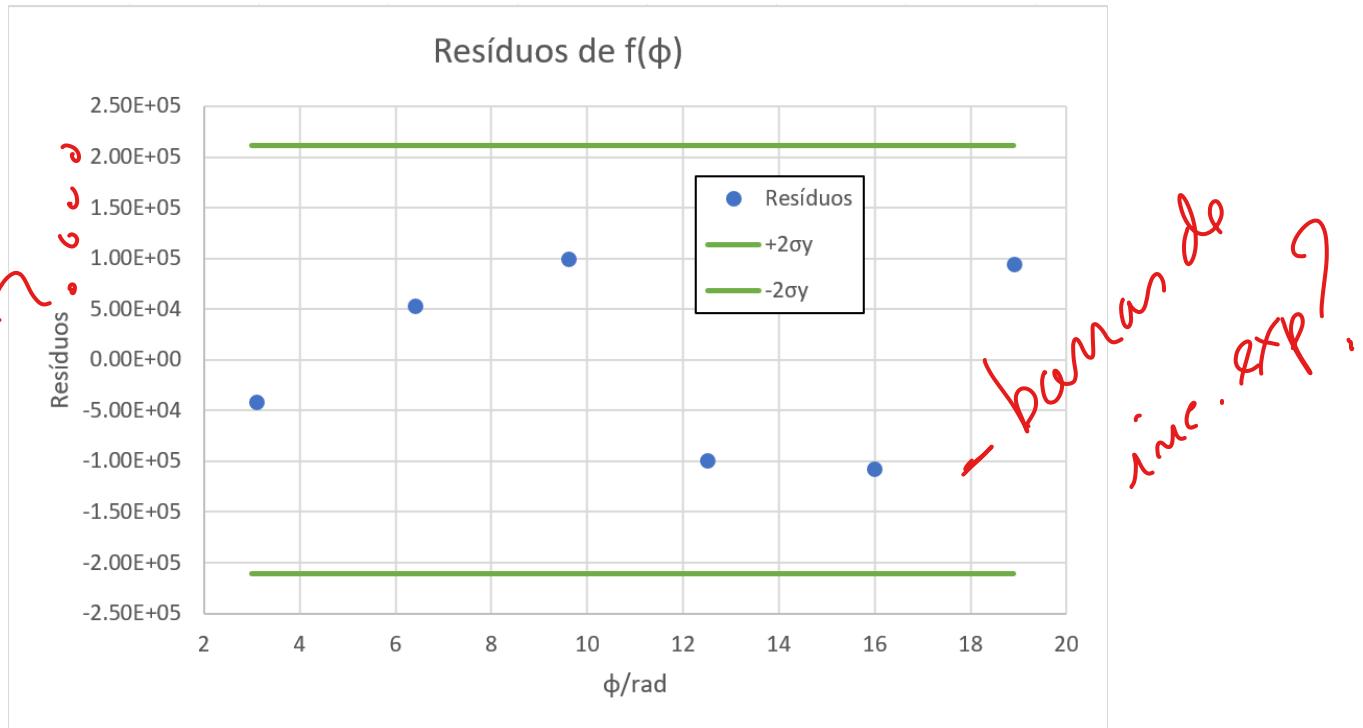


Figura 24: Gráfico de resíduos de  $f(\Phi)$

m	4.83E+05	-3.9E+04	b
u(m)	8E+03	1E+05	u(b)
r^2	0.9989	1E+05	sy

Figura 25: Parâmetros de ajuste de  $f(\Phi)$

Os resíduos encontram-se dentro do intervalo de confiança, o que é um bom indicativo. O valor de  $r^2$  dos parâmetros de ajuste também é bastante elevado, pelo que podemos concluir que é um bom ajuste.

Passou-se, então, ao cálculo da velocidade de propagação do sinal utilizando a equação (4) da introdução teórica:

$$v = 1,92 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$\mu(v) = 0.03$$

O valor final obtido é:

$$v = (1,92 \pm 0,03) \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

%, inc?

O valor do erro é:

$$\varepsilon_r = 3,0 \%$$

## 4. Resultados

- Parte A
  - $Z_c = (50 \pm 9) \Omega$
  - $\varepsilon_r = 1,37\% \sim 1,4\%$
- Parte B
  - $\alpha = (3,6 \pm 0,4) dB mm^{-1} \sim$
  - $\varepsilon_r = 2,70\% \text{ (tendo em conta a média de 2 valores experimentais, não é relativo ao valor real)}$
  - $v = (1.875 \pm 0,007) \cdot 10^8 m s^{-1}$
  - $\varepsilon_r = 6,20\%$
- Parte C
  - $v = (1,92 \pm 0,03) \cdot 10^8 m s^{-1}$
  - $\varepsilon_r = 3,0\%$

## 5. Conclusões

Montou-se o circuito com o cabo coaxial, um gerador de impulsos e uma caixa de resistências. Chegámos ao valor experimental da resistência para a qual o sinal refletido é nulo, valor praticamente igual à impedância teórica.

De seguida, sem a caixa de resistências, analisaram-se os impulsos sucessivos. Perante o gráfico de  $\ln(v)[n]$  foi calculado o coeficiente de atenuação, que está dentro da gama esperada. Através do gráfico de  $d(t)$  foi também calculada a velocidade de propagação, obtendo-se um valor próximo da velocidade da luz neste meio.

Por fim, com a presença de um gerador de sinais, foi possível calcular a velocidade através da relação de  $f(\Phi)$ , tendo-se obtido um valor ainda mais próximo do esperado.

## 6. Anexos

### 6.1. Dados experimentais e figuras adicionais

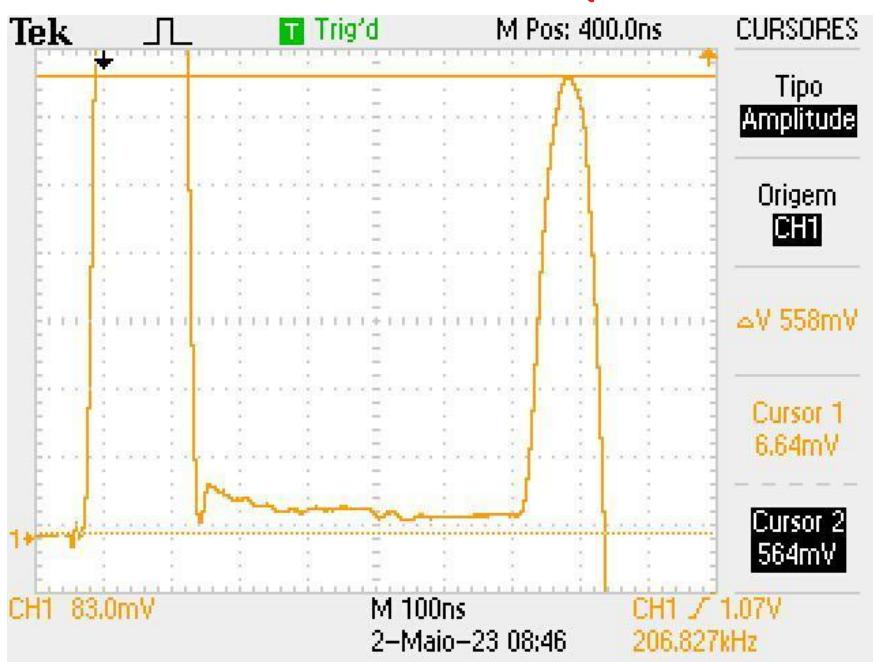


Figura 26: Exemplo da medição da amplitude da parte positiva do sinal refletido com os cursores do osciloscópio. Escala vertical maximizada para medição mais precisa.

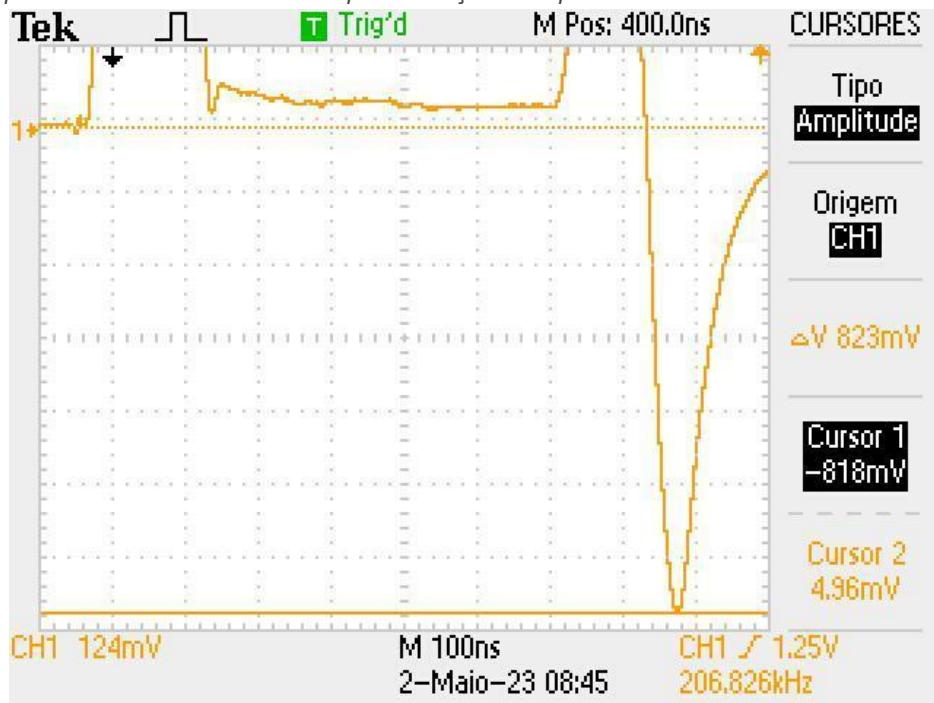


Figura 27: Exemplo da medição da amplitude da parte negativa do sinal refletido com os cursores do osciloscópio. Escala vertical maximizada para medição mais precisa.

ZL/Ω	Impedância do gerador					
	V-/V	V+/V	Vr/V	Incerteza	Ajuste	Resíduos
0	2.34	0	-2.34	0.01	-2.146	0.194
6	2	0.154	-1.85	0.01	-1.811	0.035
12	1.61	0.161	-1.45	0.01	-1.496	-0.047
18	1.45	0.312	-1.14	0.01	-1.204	-0.066
24	1.27	0.374	-0.90	0.01	-0.932	-0.036
30	0.988	0.384	-0.604	0.001	-0.682	-0.078
31	0.994	0.417	-0.577	0.001	-0.642	-0.065
32	0.992	0.436	-0.556	0.001	-0.603	-0.047
33	0.981	0.465	-0.516	0.001	-0.565	-0.049
34	0.976	0.494	-0.482	0.001	-0.527	-0.045
35	0.965	0.52	-0.445	0.001	-0.490	-0.045
36	0.954	0.549	-0.405	0.001	-0.453	-0.048
37	0.949	0.573	-0.376	0.001	-0.417	-0.041
38	0.938	0.601	-0.337	0.001	-0.381	-0.044
39	0.927	0.623	-0.304	0.001	-0.346	-0.042
40	0.816	0.501	-0.315	0.001	-0.312	0.003
41	0.822	0.531	-0.291	0.001	-0.278	0.013
42	0.823	0.564	-0.259	0.001	-0.245	0.014
43	0.806	0.59	-0.216	0.001	-0.213	0.003
44	0.781	0.623	-0.158	0.001	-0.181	-0.023
45	0.786	0.643	-0.143	0.001	-0.149	-0.006
46	0.776	0.673	-0.103	0.001	-0.118	-0.015
47	0.771	0.692	-0.079	0.001	-0.088	-0.009
48	0.776	0.723	-0.053	0.001	-0.059	-0.006
49	0.766	0.753	-0.013	0.001	-0.030	-0.017
50	0.690	0.641	-0.049	0.001	-0.001	0.048
51	0.690	0.67	-0.020	0.001	0.027	0.047
52	0.678	0.699	0.021	0.001	0.054	0.033
53	0.678	0.72	0.042	0.001	0.081	0.039
54	0.674	0.749	0.075	0.001	0.107	0.032
55	0.670	0.778	0.108	0.001	0.132	0.024
56	0.673	0.797	0.124	0.001	0.157	0.033
57	0.657	0.829	0.172	0.001	0.181	0.009
58	0.653	0.854	0.201	0.001	0.205	0.004
59	0.653	0.887	0.234	0.001	0.228	-0.006
60	0.582	0.788	0.206	0.001	0.251	0.045
61	0.595	0.801	0.206	0.001	0.273	0.067
62	0.589	0.827	0.238	0.001	0.294	0.056
63	0.581	0.854	0.273	0.001	0.315	0.042
64	0.572	0.876	0.304	0.001	0.335	0.031
65	0.570	0.898	0.328	0.001	0.354	0.026
66	0.567	0.919	0.352	0.001	0.373	0.021
67	0.567	0.947	0.380	0.001	0.392	0.012
68	0.555	0.963	0.408	0.001	0.409	0.001
69	0.559	0.985	0.426	0.001	0.427	0.001
70	0.469	0.849	0.380	0.001	0.443	0.063
76	0.465	0.979	0.514	0.001	0.531	0.017
82	0.371	0.954	0.583	0.001	0.597	0.014
88	0.374	1.07	0.70	0.01	0.641	-0.055
94	0.291	1.05	0.76	0.01	0.665	-0.094
100	0	0.708	0.708	0.001	0.667	-0.041

Figura 28: Tabela de dados do ajuste 1, parte A. Ponto duvidoso realçado a amarelo.

Impedância do gerador						
Ajuste 2						
ZL/Ω	V-/V	V+/V	Vr/V	Incerteza	Ajuste	Resíduos
30	0.988	0.384	-0.604	0.001	-0.609	-0.005
31	0.994	0.417	-0.577	0.001	-0.576	0.001
32	0.992	0.436	-0.556	0.001	-0.543	0.013
33	0.981	0.465	-0.516	0.001	-0.510	0.006
34	0.976	0.494	-0.482	0.001	-0.478	0.004
35	0.965	0.52	-0.445	0.001	-0.447	-0.002
36	0.954	0.549	-0.405	0.001	-0.415	-0.010
37	0.949	0.573	-0.376	0.001	-0.384	-0.008
38	0.938	0.601	-0.337	0.001	-0.354	-0.017
39	0.927	0.623	-0.304	0.001	-0.324	-0.020
40	0.816	0.501	-0.315	0.001	-0.294	0.021
41	0.822	0.531	-0.291	0.001	-0.265	0.026
42	0.823	0.564	-0.259	0.001	-0.236	0.023
43	0.806	0.59	-0.216	0.001	-0.207	0.009
44	0.781	0.623	-0.158	0.001	-0.179	-0.021
45	0.786	0.643	-0.143	0.001	-0.151	-0.008
46	0.776	0.673	-0.103	0.001	-0.123	-0.020
47	0.771	0.692	-0.079	0.001	-0.096	-0.017
48	0.776	0.723	-0.053	0.001	-0.070	-0.017
49	0.766	0.753	-0.013	0.001	-0.043	-0.030
50	0.690	0.641	-0.049	0.001	-0.018	0.031
51	0.690	0.67	-0.020	0.001	0.008	0.028
52	0.678	0.699	0.021	0.001	0.033	0.012
53	0.678	0.72	0.042	0.001	0.058	0.016
54	0.674	0.749	0.075	0.001	0.082	0.007
55	0.670	0.778	0.108	0.001	0.106	-0.002
56	0.673	0.797	0.124	0.001	0.130	0.006
57	0.657	0.829	0.172	0.001	0.153	-0.019
58	0.653	0.854	0.201	0.001	0.176	-0.025
59	0.653	0.887	0.234	0.001	0.198	-0.036
60	0.582	0.788	0.206	0.001	0.220	0.014
61	0.595	0.801	0.206	0.001	0.242	0.036
62	0.589	0.827	0.238	0.001	0.263	0.025
63	0.581	0.854	0.273	0.001	0.284	0.011
64	0.572	0.876	0.304	0.001	0.305	0.001
65	0.570	0.898	0.328	0.001	0.325	-0.003
66	0.567	0.919	0.352	0.001	0.345	-0.007
67	0.567	0.947	0.380	0.001	0.364	-0.016
68	0.555	0.963	0.408	0.001	0.383	-0.025
69	0.559	0.985	0.426	0.001	0.402	-0.024
70	0.469	0.849	0.380	0.001	0.420	0.040

Figura 29: Tabela de dados do ajuste 2, parte A

Coeficiente de Atenuação						
n	Vn(V)	ln(Vn)	ln(V)	Incerteza	Ajuste 2	Resíduos
1	9.31	2.23	0	0.002	0.19	0.19
2	5.62	1.73	-0.505	0.002	-0.42	0.08
3	3.38	1.22	-1.013	0.003	-1.04	-0.02
4	2.03	0.71	-1.523	0.005	-1.65	-0.13
5	1.25	0.22	-2.008	0.008	-2.26	-0.25
6	0.624	-0.47	-2.703	0.002	-2.87	-0.17
7	0.312	-1.16	-3.396	0.003	-3.49	-0.09
8	0.104	-2.26	-4.494	0.01	-4.10	0.39

Figura 30: Tabela dos dados da atenuação, parte B

Velocidade Impulsos				
n	t/s	d/m	Ajuste	Resíduos
1	4.86E-06	123	125	2
2	5.52E-06	246	247	1
3	6.18E-06	369	370	1
4	6.82E-06	492	489	-3
5	7.50E-06	615	615	0
6	8.14E-06	738	734	-4
7	8.84E-06	861	864	3
8	9.50E-06	984	986	2

Figura 31: Tabela dos dados da velocidade, parte B

Velocidade Frequências				
$\phi/^\circ$	f/Hz (1E+06)	Ajuste	Resíduos	
18.9	9.00E+06	9.09E+06	9.41E+04	
16	7.80E+06	7.69E+06	-1.07E+05	
12.5	6.10E+06	6.00E+06	-9.87E+04	
9.6	4.50E+06	4.60E+06	9.98E+04	
6.4	3.00E+06	3.05E+06	5.34E+04	
3.1	1.50E+06	1.46E+06	-4.13E+04	

Figura 32: Tabela de dados parte C

## 6.2. Equações de Propagação de Incerteza

- Incerteza de Z:

$$y = a x^2 + b x + c$$

$$x = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\mu(x) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \mu^2(a) + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \mu^2(b) + \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)^2 \mu^2(c)}$$

$$\mu(x) = \sqrt{\frac{\left(\frac{b^2 + 2ac}{\sqrt{b^2 - 4ac}} + b\right)^2}{4a^2} \mu^2(a) + \frac{\left(\frac{b}{\sqrt{b^2 - 4ac}}\right)^2}{4a^2} \mu^2(b) + \frac{1}{b^2 - 4ac} \mu^2(c)}$$

- Incerteza do coeficiente de atenuação,  $\alpha$ :

$$\mu(\alpha) = \sqrt{\frac{\mu^2(\Gamma)}{4l^2\Gamma^2} + \frac{\mu^2(m)}{4l^2} + \frac{\ln(\Gamma) - m}{4l^2} \mu^2(l)}$$

- Incerteza de  $\Gamma_L$

$$\mu(\Gamma_L) = \sqrt{\frac{2 \cdot Z_c}{(Z_L + Z_c)^2}}$$

- Incerteza de  $v$

$$\mu(v) = \sqrt{(2 \pi l \mu(m))^2 + (2 \pi m \mu(l))^2}$$



## 7. Referências

- [1] FCUP. "Protocolo do Trabalho T4A de Laboratórios de Física II: Estudo da Transmissão por Cabo Coaxial". Em 2022/2023
- [2] "Coaxial Cable Equations". URL: <https://web.archive.org/web/20120119092929/http://www.rfcafe.com/references/electrical/coax.h>
- [3] "RF Coaxial Feeder: Coax Cable Tutorial". URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/rf-feeders-transmission-lines/rf-coaxial-feeder-cable.php>

Nota: Apesar de ter sido realizada toda a experiência, não foram guardadas imagens em todas as partes. A figura 7 é do colega Guilherme Botelho. As figuras 21 e 22 são do protocolo.

As figuras 2, 3 e 4 também são do protocolo, mas a figura 4 foi adaptada.