

Transmissão por Cabo Coaxial

Carlos Luís Pouzada

Departamento de Física e Astronomia

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Resumo

Realizamos o estudo da propagação de sinais no cabo coaxial nomeadamente o cabo RG58. Este tipo de cabo é usado como conector de áudio pois permite transmissões a frequências muito altas para longas distâncias. Confirmamos que em circuitos aproximadamente abertos (resistência a tender para infinito) o sinal é quase totalmente refletido e em circuitos que aproximadamente estão em curto-circuito (resistência próxima de zero) o sinal é invertido. Determinamos o valor da impedância da carga para quando $V_r(Z_L)=0$, $Z_c=53,3\Omega$ com um erro de 7%. Calculamos também a constante de atenuação, $\alpha=0,00245$ dB/m, através da análise de impulsos refletidos que vai ao encontro a especificada no cabo. A velocidade de propagação de sinal foi determinada através da distância percorrida em função do tempo e pela medição de frequências para quais os sinais estão em fase e antifase. Obtivemos o valor de $v=(1,861\pm 0,007)\text{E}+8$ m/s e $v=1,935\text{E}+8$ m/s com um erro de 6% e 2,1% respetivamente.

Objetivos

1. Determinar a impedância característica do cabo coaxial e verificar a reflexão e inversão do sinal para o circuito aberto e curto-circuito respetivamente.
2. Determinar α , a partir da medição das amplitudes V_n de uma sequência de n impulsos refletidos e das correspondentes distâncias d percorridas pelo sinal.
3. Incluindo, nos dados registados para o objetivo anterior, o registo dos instantes t_n a que ocorrem as amplitudes V_n , calcular v a partir de $V_n(t)$.
4. Determinar a velocidade de propagação de sinal v numa linha coaxial, variando a frequência do sinal à entrada.

a incluir na
"Introdução"

grandes

mas
que dão
os de
facto!

o documento tem
vários erros de formatação
e de organização
"tipo artigo/report"

% u(d)?
% inc?
motop de onde d

v fase
v antifase

1.Introdução

1.1 Cabo coaxial

O cabo coaxial é uma linha de transmissão constituída por um condutor interno envolvido por um condutor externo, ambos cilíndricos e estão separados por um dielétrico. Este cabo é usado frequentemente em ligações de áudio ou de radio



Figura 1: Imagem do interior do cabo coaxial

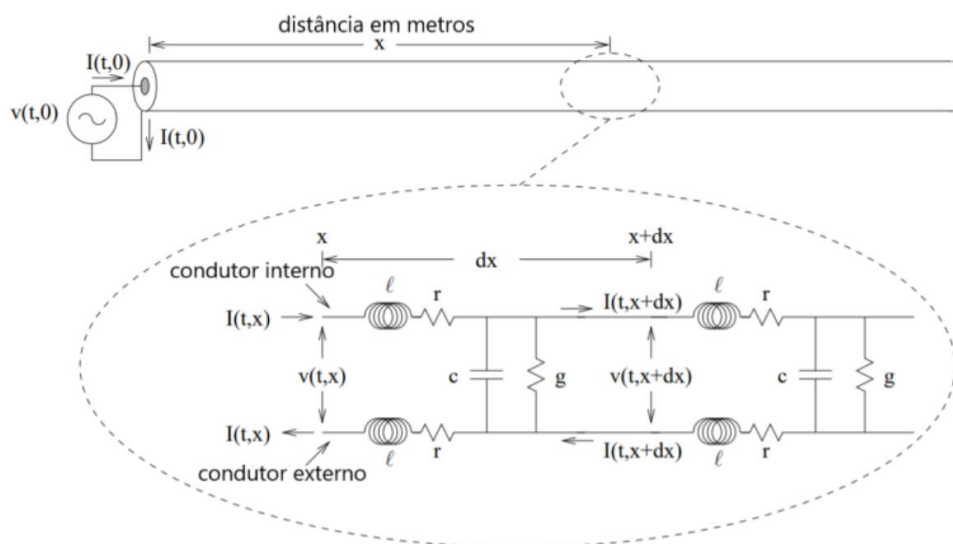


Figura 2: Circuito da linha de transmissão para um cabo coaxial

A partir da figura 2 que ilustra o modelo que vamos utilizar poder ver que o cabo é constituído por um conjunto infinito de segmentos de reta dx , onde cada segmento a sua indutância (L), condutância (G), resistência (R) e capacidade (C).

1.2 Determinação da impedância característica

Considerando uma linha de transmissão ideal:

$$Z_c = \frac{V_i(z, t)}{I_i(z, t)} = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C}} = \frac{1\sqrt{\mu}}{2\pi\sqrt{\epsilon}} \ln\left(\frac{a}{b}\right)$$

V_i -Tensão de onda;

I_i - Corrente de onda;

z - Distância percorrida pelo sinal;

t - Tempo decorrido;

μ - Permeabilidade magnética do dielétrico;

ϵ - Permitividade elétrica do dielétrico;

a - Diâmetro do condutor interno

b - Diâmetro do condutor externo

1.3 Constante de atenuação α e velocidade de propagação do sinal

A constante de atenuação α está relacionada com a perda de amplitude do sinal, ou seja, a potência dissipada. A perda de amplitude entre o osciloscópio e o gerador(l) pode ser dada por $\exp(-\alpha l)$. Num cabo ideal α seria 0, mas considerando cabos reais onde há sempre perdas $\alpha > 0$.

$$\frac{V_n}{V_0} = \Gamma^n e^{-2\alpha l n} \quad (2)$$

l - Comprimento do segmento de reta do fio percorrido

A velocidade de propagação do sinal no cabo é a mesma que a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas num dielétrico:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (3)$$

1.4 Reflexão num cabo coaxial

A reflexão num cabo coaxial ocorre quando uma onda eletromagnética que se propaga pelo cabo encontra uma mudança brusca na impedância, como uma descontinuidade ou uma junção entre cabos. Isto causa uma reflexão parcial ou total do sinal.

A razão entre o sinal refletido e o inicial é dado pelo parâmetro Γ na equação:

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (4)$$

Z_L - Impedância em direção a carga

Z_C - Impedância em direção a fonte

Podemos então deduzir que num circuito aberto $\Gamma = 1$ e em curto-circuito $\Gamma = -1$.

1.5 Material utilizado

- Gerador de impulsos (com fonte de alimentação anexa): resistência interna comutável (50 Ω ou 600 Ω); saída coaxial BNC.
- Gerador sinusoidal: resistência interna de 50 Ω ; saída coaxial BNC.
- Linha coaxial: cabo coaxial RG58; dielétrico polietileno; impedância característica 50 Ω ; atenuação < 0.02 dB/m.
- Osciloscópio digital: duas saídas coaxiais BNC.
- Caixa de resistências.
- Adaptador de impedâncias.

2. Análise experimental

2.1 Estudo da amplitude do impulso refletido, em função da impedância da carga ligada à linha coaxial, $V_r(Z_L)$.

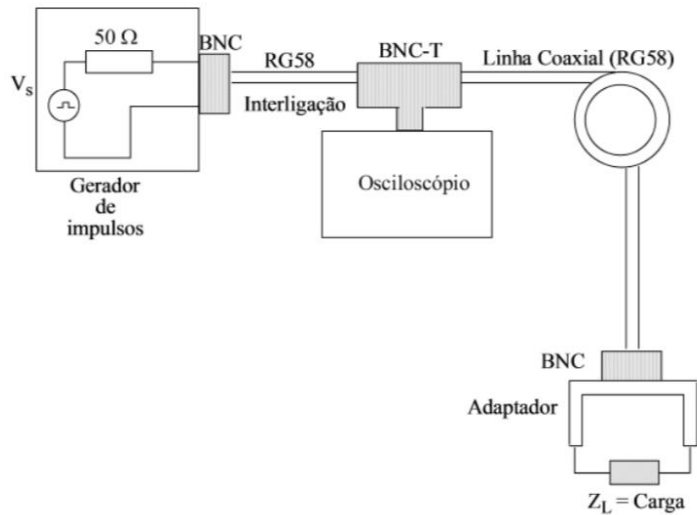
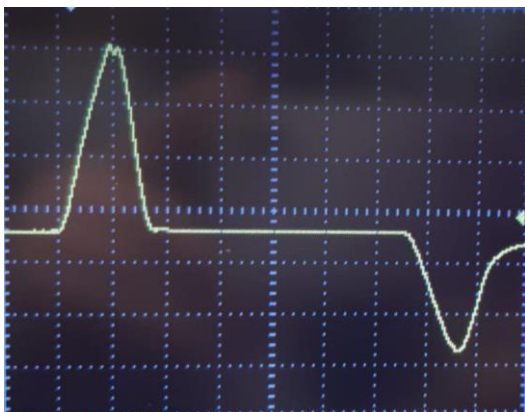
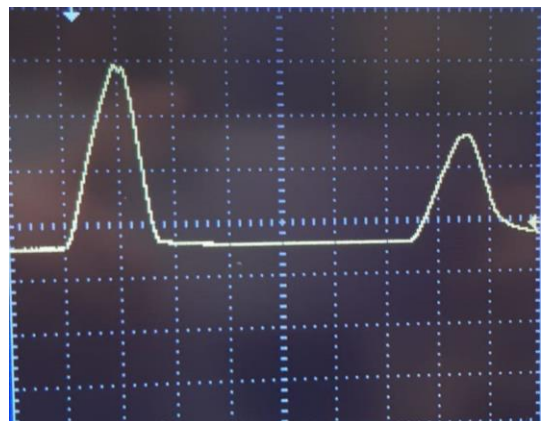


Figura 3: Circuito para o estudo da amplitude refletida em função da carga à saída da linha coaxial.

Após efetuarmos a montagem do circuito da figura 3, pusemos a caixa de incertezas com $0\ \Omega$ e tiramos uma foto. A seguir subimos o valor da caixa para o máximo e tiramos outra foto. Assim conseguimos uma aproximação do curto-circuito e circuito aberto respectivamente.



A



B

foram estas as escalas usadas para registro de V_{ca} e V_{cc} ? Se sim, estão erradas

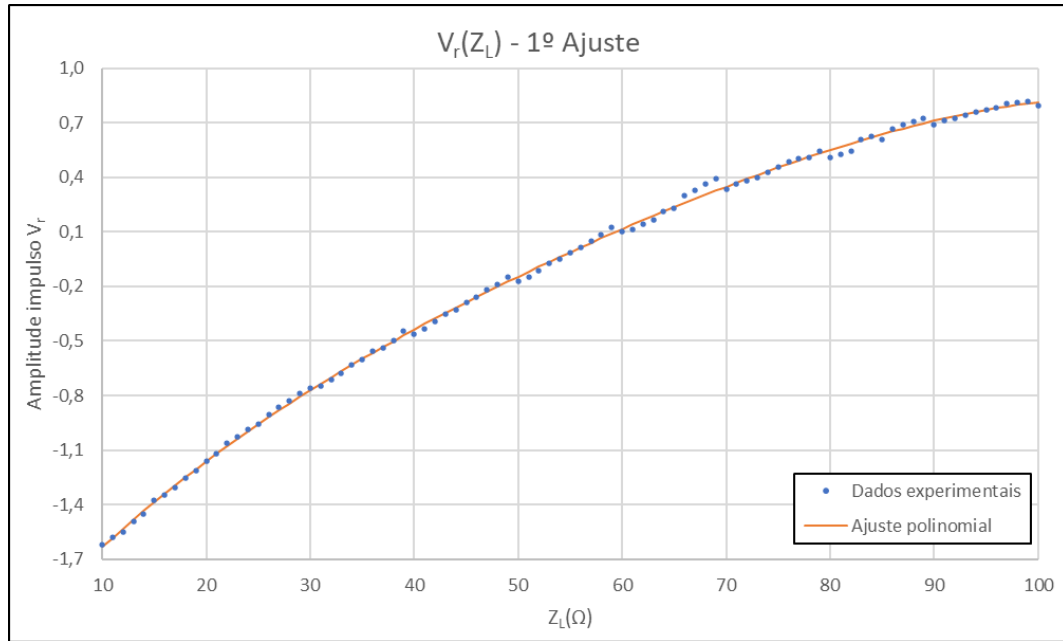
fora do eixo x

Figura 4:(A) Perfil aproximado do curto-circuito; (B) Perfil aproximado do circuito aberto

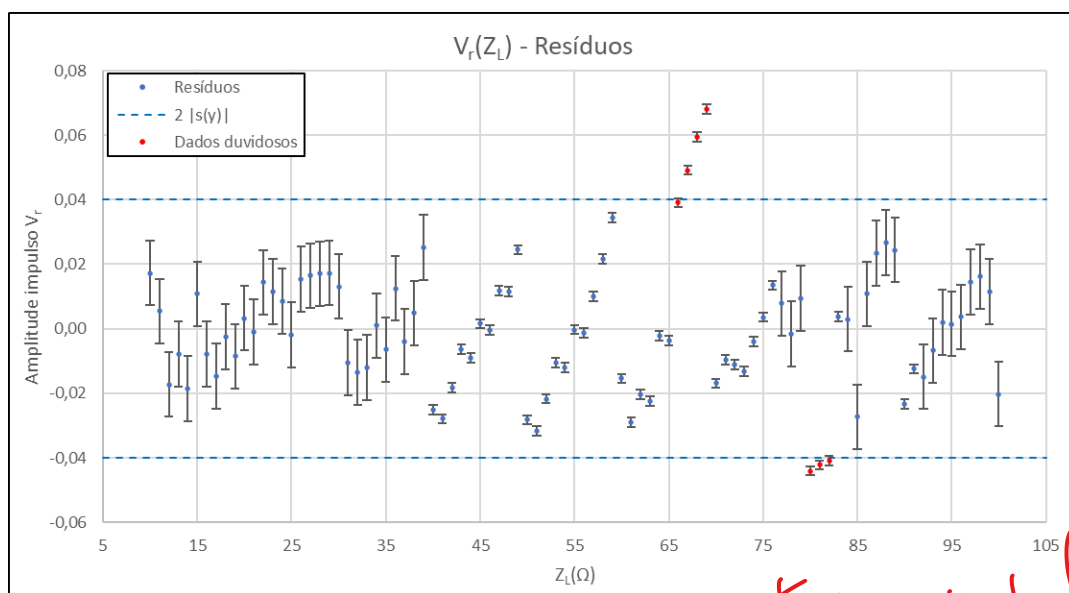
Os comportamentos teóricos foram experimentalmente verificados, embora o sinal refletido em B tenha ligeiramente menos amplitude.

De seguida realizamos o estudo de V_r em função de Z_L onde com $Z_L \in [0; 100\Omega]$ com intervalos de 1Ω .

Nota: $V_r = V_{\min} + V_{\max}$



	Grau 4 - 1º Ajuste				
	a_4	a_3	a_2	a_1	b
a_i	-2,9E-08	6,84E-06	-0,00075	0,065	-2,22
Δa_i	7E-09	1E-06	1E-04	0,003	0,03
r^2	0,9992	0,02	#N/D	#N/D	#N/D



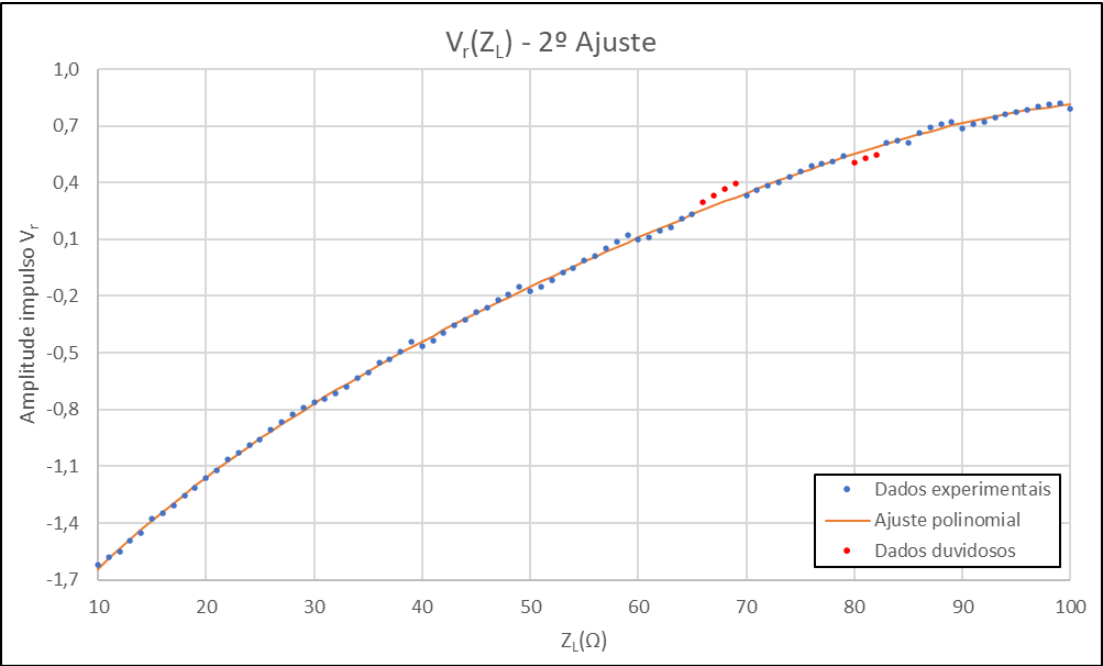
Falta a mº e a legenda destas figuras/tabelas!

Foi considerado que o ajuste de grau 4 era o que se adequava melhor aos dados experimentais por isso foi feito o estudo a volta do mesmo.

O perfil obtido é o previsto teoricamente embora haja umas descontinuidades sempre que é mudada a dezena (ex:19 para 20Ω).

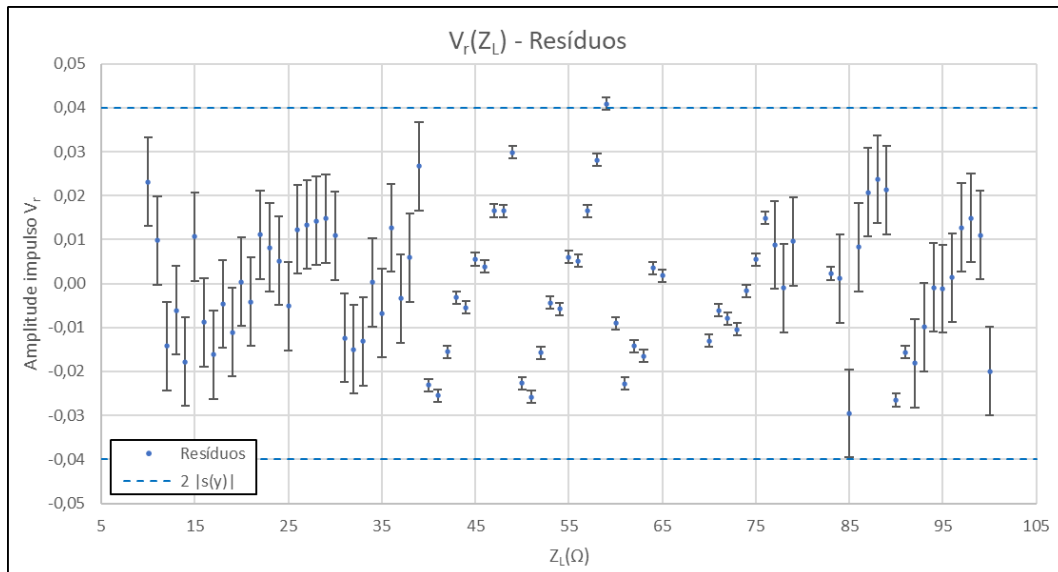
Dado que quase todos os pontos nos resíduos apresentam a mesma tendência, o critério escolhido foi a dispersão, sendo que se excluiu pontos maiores que $2|(s)y|$.

Assim foi feito um segundo ajuste



	Grau 4 - 2º Ajuste				
	a_4	a_3	a_2	a_1	b
a_i	-3,6E-08	9E-06	-0,00088	0,069	-2,25
Δa_i	5E-09	1E-06	8E-05	0,003	0,02
r^2	0,9996	0,02	#N/D	#N/D	#N/D

NOTA : toda a análise preliminar deve ser remetida para anexos



Usando os dados do segundo ajuste calculamos Z_c , que é aproximadamente $53,3 \pm 0,2 \Omega$.

O erro foi de 7% com uma precisão de 0,4%. O erro foi elevado, o que pode mostrar que o valor real difere o valor teórico de 50Ω .

3.2 Determinação da constante de atenuação α do cabo coaxial e da velocidade v de propagação de fase

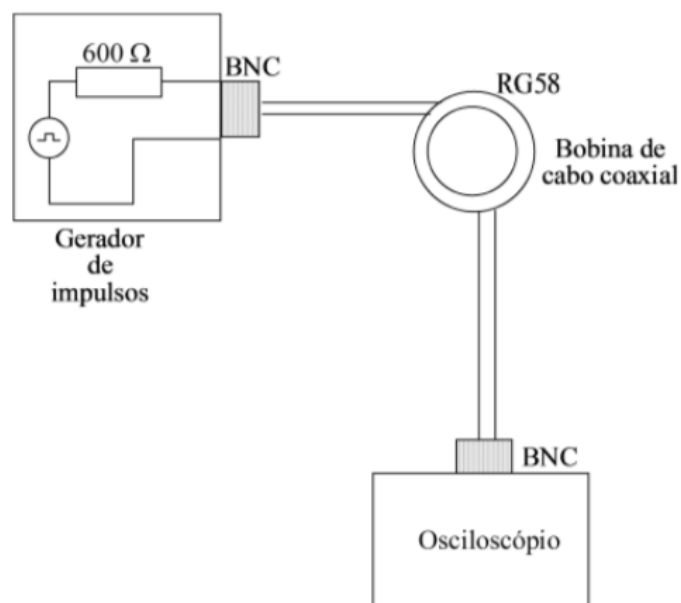
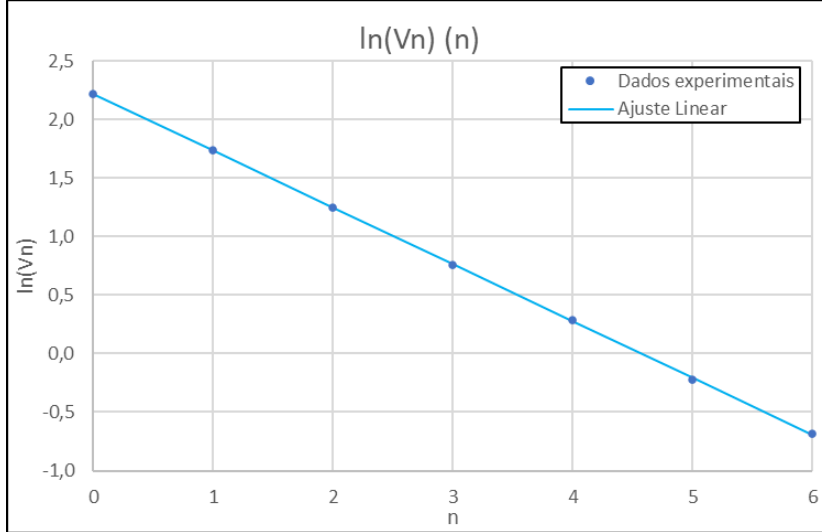
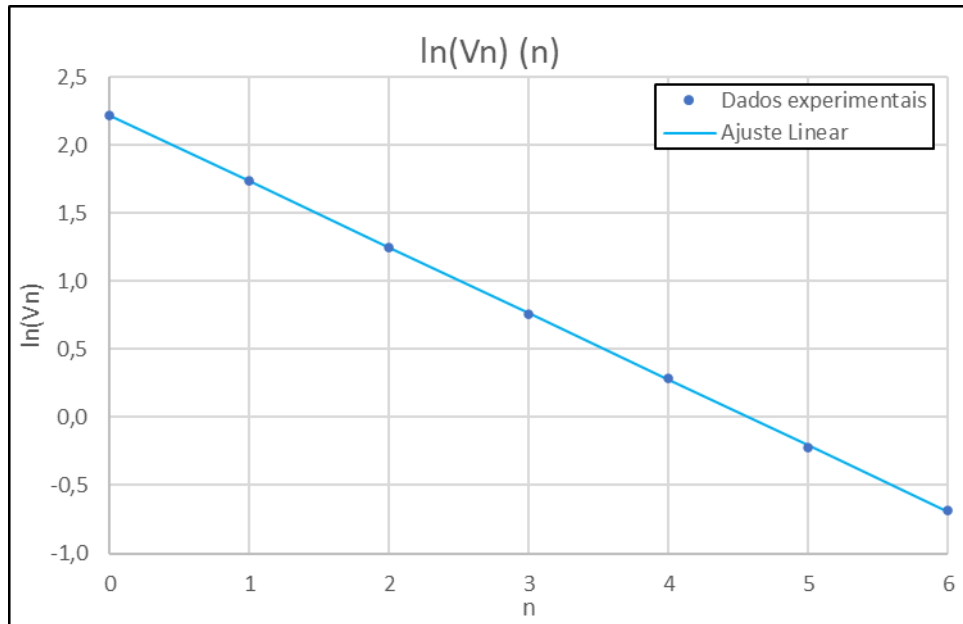


Figura 5: Circuito adequado ao cálculo do coeficiente de atenuação da linha coaxial

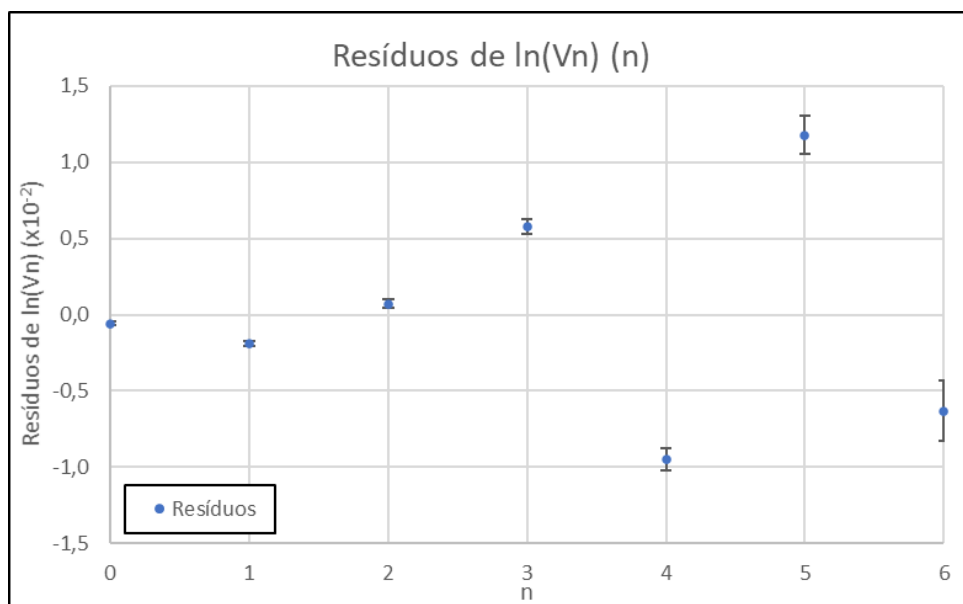
Montamos o circuito da figura 5 e fomos registrar o valor do comprimento do cabo coaxial, $l=63,50\text{mm}$ com uma precisão de 0,8%. Após isto medimos os valores de t e V_n para cada



impulso de maneira a calcular a velocidade de propagação de fase. Como já calculamos o valor de Z_c através da equação (4) concluímos que $\Gamma=0,84$.



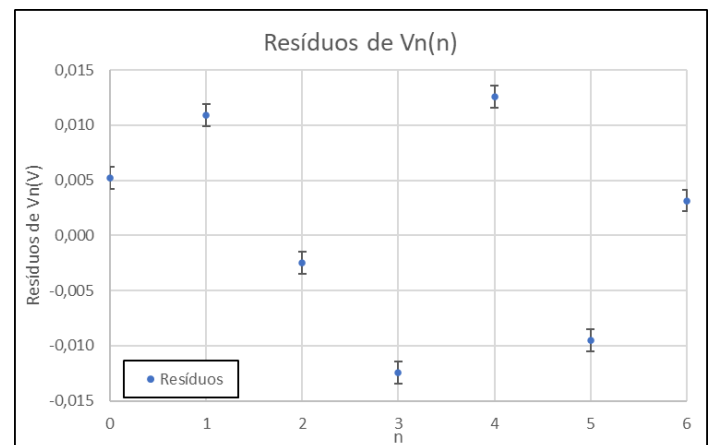
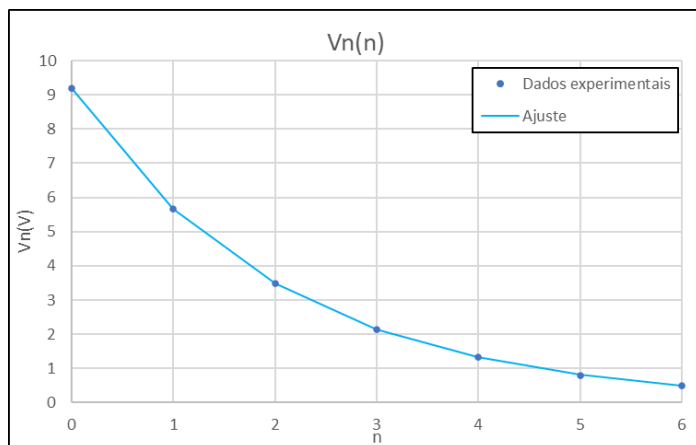
1º Ajuste $\ln(V_n)$ (n)			
m	-0,485	2,22	b
Δm	0,001	0,01	Δb
r^2	0,99995	0,01	s(y)



Para chegarmos ao valor de α temos de linearizar a equação (2), obtendo a expressão: $\alpha = \frac{\ln(\Gamma) - m}{2l}$

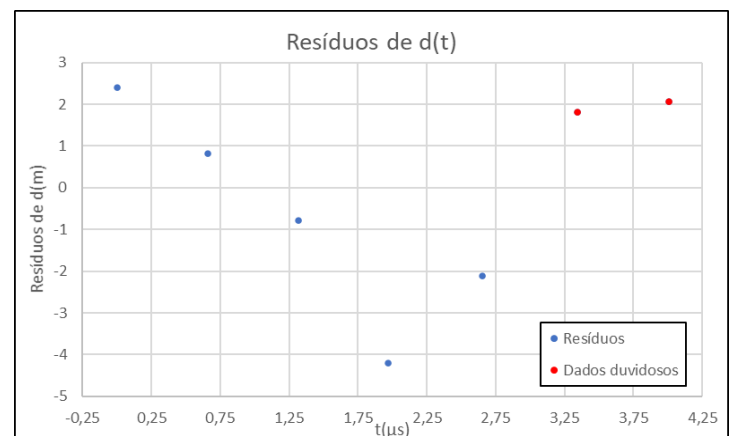
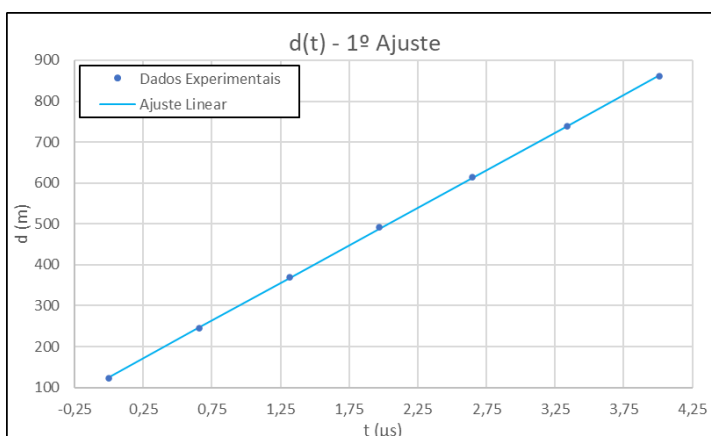
Obtemos assim um $\alpha = 0,00245$ dB/m com uma precisão de 0,8% que é concordante com o valor especificado no cabo $\alpha < 0,02$ dB

Usando parâmetros que calculamos na equação 4 e nos resultados experimentais obtidos obtemos os seguintes gráficos:



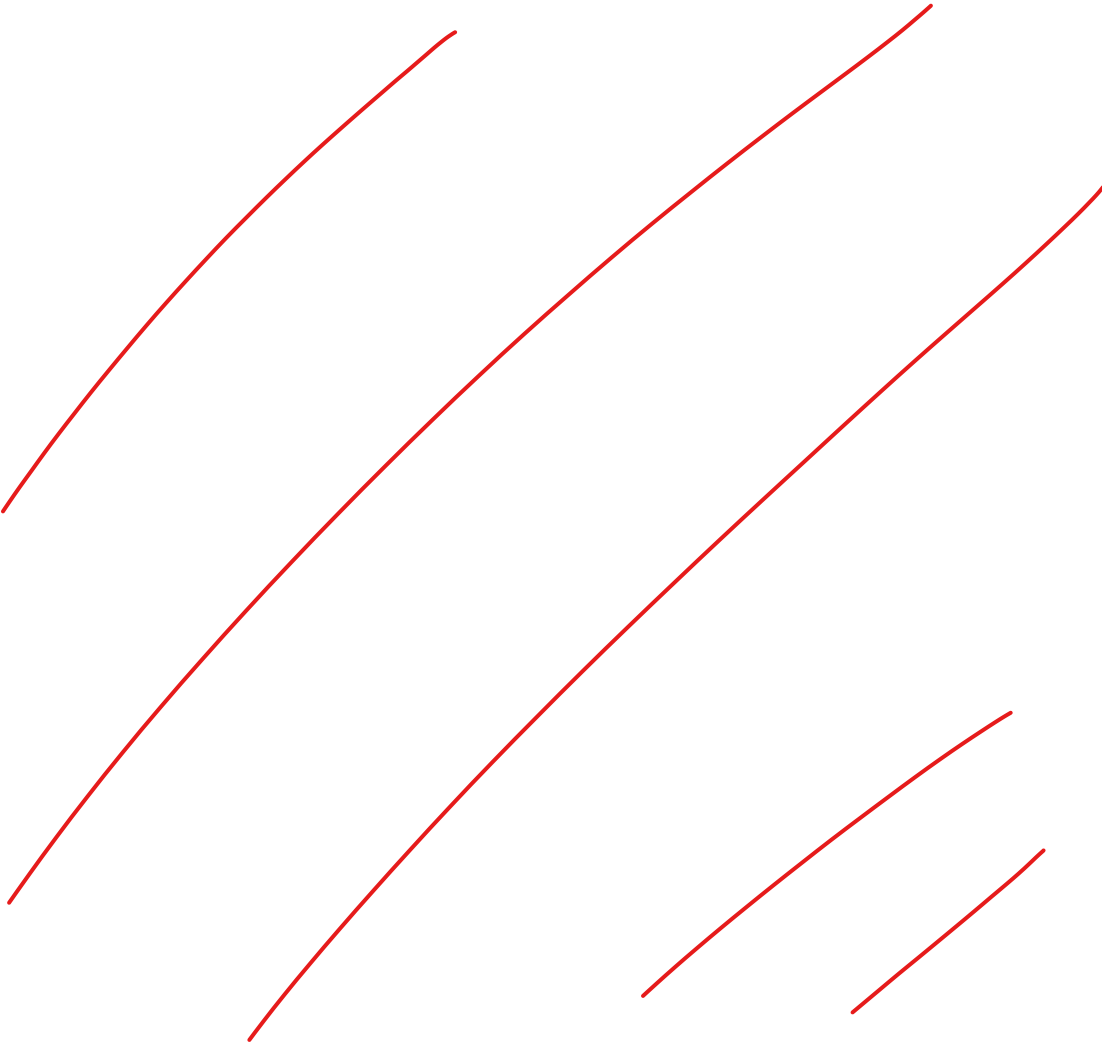
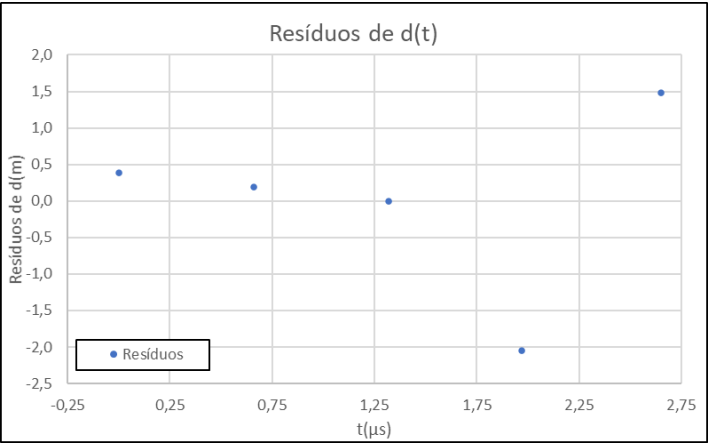
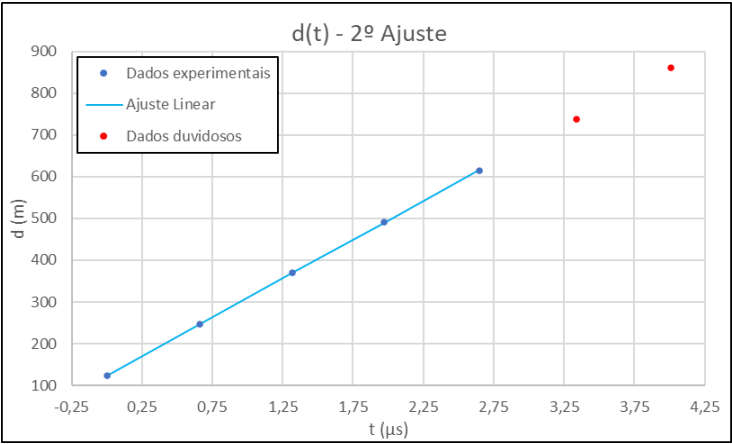
Os resíduos não apresentam nem uma tendência e a dispersão é reduzida, então todos os pontos foram considerados. A incerteza é muito pequena por isso não se vê no gráfico de resíduos, mas é calculada no anexo.

Agora calculando a velocidade de propagação de sinal, v , obtivemos os seguintes resultados:



1º Ajuste d(t)			
m	1,840E+08	125	b
Δm	8E+05	2	Δb
r^2	0,99991	3	u(y)

Retiramos os últimos dois pontos pois fugiam mais da tendência e queríamos no mínimo 5 pontos para fazer o ajuste. Então após retirar os pontos obtivemos:



2º Ajuste d(t)			
m	1,861E+08	123	b
Δm	7E+05	1	Δb
r^2	0,99996	1	u(y)

No gráfico o 4º ponto não parece respeitar a mesma tendência que os outros, mas para ter um número de dados mínimo foi mantido.

Calculamos então o v_{exp} dado que $v_{\text{exp}}=m$ então $v= (1,861\pm0,007)\text{E}+8$ m/s.

Resolvendo a equação 3 obtemos um $v_{\text{teórico}}=1,97724\text{E}+8$ m/s. Obtivemos então um erro de aproximadamente 6%, que ainda é algo elevado.

3.3 Determinação da velocidade de propagação de sinal, v , numa linha coaxial, variando a frequência do sinal à entrada

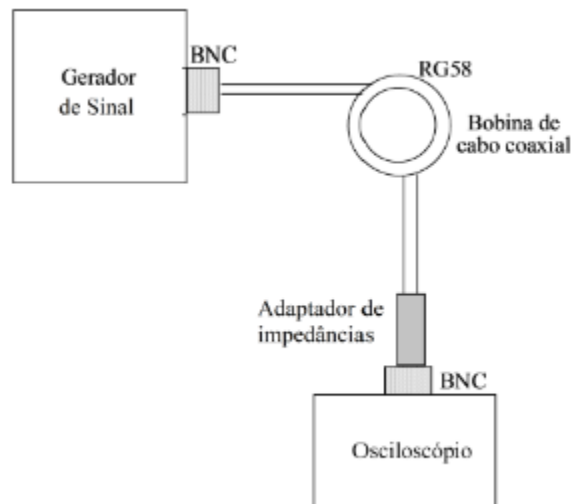
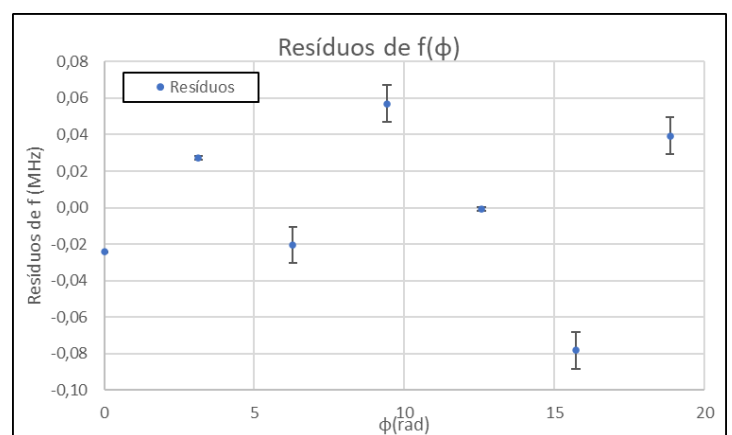
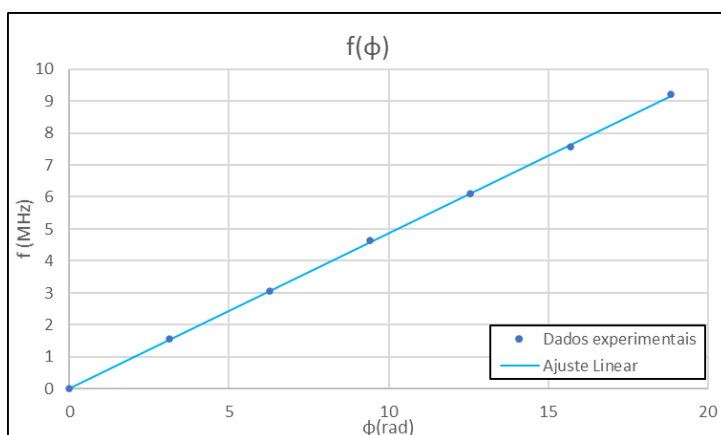


Figura 6: Circuito adequado à determinação da velocidade de propagação de sinal na linha coaxial

Montamos o circuito conforme a figura 6, após isso variamos a frequência entre 1kHz e 10MHz e registamos a diferença de fase Φ . Seguimos o método do protocolo e apenas medimos os pontos em fase e em anti-fase.



1º Ajuste $f(\phi)$			
m	0,485	0,03	b
Δm	0,003	0,03	Δb
r^2	0,9998	0,05	$u(y)$

" Resultados " ?
Fimais !

Nota: Para o cálculo da velocidade utilizamos a fórmula $v = \frac{2\pi l f}{\phi}$

Sabendo que $f/\phi=m$, então $v=2\pi l m$, ou seja, $v= 1,935E+8$ m/s com uma precisão de 0,6%, comparando com a $v_{ref}=1,97724$ m/s, obtemos um erro de 2,1% mais baixo que pelo usado anteriormente.

4. Conclusão e Discussão

Separar as duas!

Na foto tirada ao circuito aberto, não é possível verificar a reflexão completa do sinal, isto poderá ser dado a atenuação do sinal que diminua ligeiramente a amplitude do sinal, portanto consideramos que o sinal foi completamente refletido. No perfil de curto-circuito, é verificada a inversão completa do sinal.

Identificar e só

Os gráficos da tensão em função da impedância têm descontinuidades que coincidem com as alterações das dezenas na caixa de resistências, isto pode indicar uma descalibração na caixa, o que será o principal responsável pelo % inc. no resultado. Obtivemos o valor de $Z_c=53,3\Omega$, com um erro de precisão percentual de 0,6%.

depois apresentar

Este valor tem um erro de 7% quando comparado ao valor teórico de 50Ω . Este erro é relativamente elevado e pode ser devido mais uma vez á descalibração da caixa das resistências que muda o valor real de Z_c .

" a " Conclusão

Relativamente ao cálculo da constante de atenuação e a velocidade de propagação do sinal, obtivemos os valores $\Gamma=0,84$ e $\alpha=0,00245$ dB/m com uma precisão de 0,8%.

Estes valores vão de encontro aos previstos teoricamente, portanto foram

- ✓ considerados válidos. A velocidade de propagação do sinal calculada através do estudo de d em função de t é de $v= (1,861 \pm 0,007)E+8$ m/s e tem um erro de exatidão de aproximadamente 6%.

% inc ?

O valor de v pelo estudo da mudança de fase em função da frequência é de $v= 1,935E+8$ m/s com uma precisão de 0,6% e um erro de 2,1%. Este último valor é mais exato então que o anterior, então é considerado o melhor método para o cálculo da velocidade de propagação do sinal.

V_{fase} ; V_{sinal}
 $\pm \Delta$?
 $= \Delta$?

devido

o que

Referências

[1] “A wave lab inside a coaxial cable”, J.M.Serra, M.C.Brito, J.Maia Alves and A.M.Vallêra, Europ. Journal of Physics, 25, 581-591 (2004)

[2] “Practical Physics”, G.L.Squires, Cambridge University Press (4ª Ed.)

Anexo

$Z_L (\Omega)$	Vr max (V)	Vr min (V)	$V_r (V)$	u(Vr max) (V)	u(Vr min) (V)	u(V_r)(V)	1º Ajuste	Resíduos 1	2º Ajuste	Resíduos 2
0	0,0000	-2,38	-2,3800	0,0001	0,01	0,01				
1	0,0000	-2,30	-2,3000	0,0001	0,01	0,01				
2	0,0187	-2,25	-2,2313	0,0001	0,01	0,01				
3	0,0374	-2,19	-2,1526	0,0001	0,01	0,01				
4	0,0562	-2,13	-2,0738	0,0001	0,01	0,01				
5	0,0749	-2,08	-2,0051	0,0001	0,01	0,01				
6	0,112	-2,02	-1,908	0,001	0,01	0,01				
7	0,131	-1,98	-1,849	0,001	0,01	0,01				
8	0,150	-1,93	-1,780	0,001	0,01	0,01				
9	0,187	-1,89	-1,703	0,001	0,01	0,01				
10	0,092	-1,71	-1,618	0,001	0,01	0,01	-1,64	0,02	-1,64	0,0231
11	0,092	-1,67	-1,578	0,001	0,01	0,01	-1,58	0,01	-1,59	0,0098
12	0,110	-1,66	-1,550	0,001	0,01	0,01	-1,53	-0,02	-1,54	-0,0142
13	0,129	-1,62	-1,491	0,001	0,01	0,01	-1,48	-0,01	-1,48	-0,0061
14	0,147	-1,60	-1,453	0,001	0,01	0,01	-1,43	-0,02	-1,44	-0,0178
15	0,184	-1,56	-1,376	0,001	0,01	0,01	-1,39	0,01	-1,39	0,0107
16	0,202	-1,55	-1,348	0,001	0,01	0,01	-1,34	-0,01	-1,34	-0,0088
17	0,221	-1,53	-1,309	0,001	0,01	0,01	-1,29	-0,01	-1,29	-0,0162
18	0,258	-1,51	-1,252	0,001	0,01	0,01	-1,25	0,00	-1,25	-0,0046
19	0,276	-1,49	-1,214	0,001	0,01	0,01	-1,21	-0,01	-1,20	-0,0111
20	0,221	-1,38	-1,159	0,001	0,01	0,01	-1,16	0,00	-1,16	0,0004
21	0,239	-1,36	-1,121	0,001	0,01	0,01	-1,12	0,00	-1,12	-0,0042
22	0,276	-1,34	-1,064	0,001	0,01	0,01	-1,08	0,01	-1,08	0,0111
23	0,294	-1,32	-1,026	0,001	0,01	0,01	-1,04	0,01	-1,03	0,0082
24	0,331	-1,32	-0,989	0,001	0,01	0,01	-1,00	0,01	-0,99	0,0051
25	0,350	-1,31	-0,960	0,001	0,01	0,01	-0,96	0,00	-0,95	-0,0052
26	0,386	-1,29	-0,904	0,001	0,01	0,01	-0,92	0,02	-0,92	0,0123
27	0,405	-1,27	-0,865	0,001	0,01	0,01	-0,88	0,02	-0,88	0,0134
28	0,423	-1,25	-0,827	0,001	0,01	0,01	-0,84	0,02	-0,84	0,0143
29	0,460	-1,25	-0,790	0,001	0,01	0,01	-0,81	0,02	-0,80	0,0148
30	0,342	-1,10	-0,758	0,001	0,01	0,01	-0,77	0,01	-0,77	0,0109
31	0,364	-1,11	-0,746	0,001	0,01	0,01	-0,74	-0,01	-0,73	-0,0123
32	0,396	-1,11	-0,714	0,001	0,01	0,01	-0,70	-0,01	-0,70	-0,0150
33	0,412	-1,09	-0,678	0,001	0,01	0,01	-0,67	-0,01	-0,66	-0,0131
34	0,459	-1,09	-0,631	0,001	0,01	0,01	-0,63	0,00	-0,63	0,0003
35	0,475	-1,08	-0,605	0,001	0,01	0,01	-0,60	-0,01	-0,60	-0,0068
36	0,507	-1,06	-0,553	0,001	0,01	0,01	-0,57	0,01	-0,57	0,0127
37	0,523	-1,06	-0,537	0,001	0,01	0,01	-0,53	0,00	-0,53	-0,0034
38	0,554	-1,05	-0,496	0,001	0,01	0,01	-0,50	0,00	-0,50	0,0059
39	0,586	-1,03	-0,444	0,001	0,01	0,01	-0,47	0,03	-0,47	0,0267
40	0,462	-0,925	-0,463	0,001	0,001	0,001	-0,44	-0,03	-0,44	-0,0231
41	0,503	-0,938	-0,435	0,001	0,001	0,001	-0,41	-0,03	-0,41	-0,0255
42	0,530	-0,925	-0,395	0,001	0,001	0,001	-0,38	-0,02	-0,38	-0,0155
43	0,558	-0,911	-0,353	0,001	0,001	0,001	-0,35	-0,01	-0,35	-0,0032
44	0,585	-0,911	-0,326	0,001	0,001	0,001	-0,32	-0,01	-0,32	-0,0055
45	0,612	-0,898	-0,286	0,001	0,001	0,001	-0,29	0,00	-0,29	0,0055
46	0,639	-0,898	-0,259	0,001	0,001	0,001	-0,26	0,00	-0,26	0,0039
47	0,666	-0,884	-0,218	0,001	0,001	0,001	-0,23	0,01	-0,23	0,0166
48	0,694	-0,884	-0,190	0,001	0,001	0,001	-0,20	0,01	-0,21	0,0165
49	0,721	-0,870	-0,149	0,001	0,001	0,001	-0,17	0,02	-0,18	0,0298
50	0,612	-0,786	-0,174	0,001	0,001	0,001	-0,15	-0,03	-0,15	-0,0226

51	0,636	-0,786	-0,150	0,001	0,001	0,001	-0,12	-0,03	-0,12	-0,0258
52	0,661	-0,774	-0,113	0,001	0,001	0,001	-0,09	-0,02	-0,10	-0,0157
53	0,699	-0,774	-0,075	0,001	0,001	0,001	-0,06	-0,01	-0,07	-0,0044
54	0,724	-0,774	-0,050	0,001	0,001	0,001	-0,04	-0,01	-0,04	-0,0058
55	0,749	-0,761	-0,012	0,001	0,001	0,001	-0,01	0,00	-0,02	0,0061
56	0,774	-0,761	0,013	0,001	0,001	0,001	0,01	0,00	0,01	0,0052
57	0,811	-0,761	0,050	0,001	0,001	0,001	0,04	0,01	0,03	0,0165
58	0,836	-0,749	0,087	0,001	0,001	0,001	0,07	0,02	0,06	0,0281
59	0,861	-0,736	0,125	0,001	0,001	0,001	0,09	0,03	0,08	0,0409
60	0,762	-0,662	0,100	0,001	0,001	0,001	0,12	-0,02	0,11	-0,0091
61	0,784	-0,673	0,111	0,001	0,001	0,001	0,14	-0,03	0,13	-0,0228
62	0,806	-0,662	0,144	0,001	0,001	0,001	0,16	-0,02	0,16	-0,0142
63	0,828	-0,662	0,166	0,001	0,001	0,001	0,19	-0,02	0,18	-0,0165
64	0,861	-0,651	0,210	0,001	0,001	0,001	0,21	0,00	0,21	0,0035
65	0,883	-0,651	0,232	0,001	0,001	0,001	0,24	0,00	0,23	0,0018
66	0,927	-0,629	0,298	0,001	0,001	0,001	0,26	0,04	0,25	
67	0,949	-0,618	0,331	0,001	0,001	0,001	0,28	0,05	0,28	
68	0,978	-0,614	0,364	0,001	0,001	0,001	0,30	0,06	0,30	
69	0,998	-0,603	0,395	0,001	0,001	0,001	0,33	0,07	0,32	
70	0,849	-0,517	0,332	0,001	0,001	0,001	0,35	-0,02	0,34	-0,0130
71	0,878	-0,517	0,361	0,001	0,001	0,001	0,37	-0,01	0,37	-0,0061
72	0,898	-0,517	0,381	0,001	0,001	0,001	0,39	-0,01	0,39	-0,0079
73	0,917	-0,517	0,400	0,001	0,001	0,001	0,41	-0,01	0,41	-0,0105
74	0,947	-0,517	0,430	0,001	0,001	0,001	0,43	0,00	0,43	-0,0017
75	0,966	-0,508	0,458	0,001	0,001	0,001	0,45	0,00	0,45	0,0055
76	0,996	-0,508	0,488	0,001	0,001	0,001	0,47	0,01	0,47	0,0149
77	1,01	-0,508	0,502	0,01	0,001	0,01	0,49	0,01	0,49	0,0088
78	1,02	-0,508	0,512	0,01	0,001	0,01	0,51	0,00	0,51	-0,0010
79	1,04	-0,498	0,542	0,01	0,001	0,01	0,53	0,01	0,53	0,0096
80	0,917	-0,410	0,507	0,001	0,001	0,001	0,55	-0,04	0,55	
81	0,937	-0,410	0,527	0,001	0,001	0,001	0,57	-0,04	0,57	
82	0,956	-0,410	0,546	0,001	0,001	0,001	0,59	-0,04	0,59	
83	0,984	-0,376	0,608	0,001	0,001	0,001	0,60	0,00	0,61	0,0023
84	1,00	-0,376	0,624	0,01	0,001	0,01	0,62	0,00	0,62	0,0011
85	1,02	-0,410	0,610	0,01	0,001	0,01	0,64	-0,03	0,64	-0,0295
86	1,04	-0,376	0,664	0,01	0,001	0,01	0,65	0,01	0,66	0,0083
87	1,06	-0,368	0,692	0,01	0,001	0,01	0,67	0,02	0,67	0,0207
88	1,07	-0,360	0,710	0,01	0,001	0,01	0,68	0,03	0,69	0,0237
89	1,09	-0,368	0,722	0,01	0,001	0,01	0,70	0,02	0,70	0,0213
90	0,968	-0,280	0,688	0,001	0,001	0,001	0,71	-0,02	0,71	-0,0265
91	0,992	-0,280	0,712	0,001	0,001	0,001	0,72	-0,01	0,73	-0,0156
92	1,01	-0,288	0,722	0,01	0,001	0,01	0,74	-0,01	0,74	-0,0181
93	1,03	-0,288	0,742	0,01	0,001	0,01	0,75	-0,01	0,75	-0,0099
94	1,05	-0,288	0,762	0,01	0,001	0,01	0,76	0,00	0,76	-0,0009
95	1,06	-0,288	0,772	0,01	0,001	0,01	0,77	0,00	0,77	-0,0012
96	1,08	-0,296	0,784	0,01	0,001	0,01	0,78	0,00	0,78	0,0014
97	1,10	-0,296	0,804	0,01	0,001	0,01	0,79	0,01	0,79	0,0127
98	1,11	-0,296	0,814	0,01	0,001	0,01	0,80	0,02	0,80	0,0149
99	1,14	-0,323	0,817	0,01	0,001	0,01	0,81	0,01	0,81	0,0110
100	1,08	-0,288	0,792	0,01	0,001	0,01	0,81	-0,02	0,81	-0,0199
Aberto	2,36	0,00	2,36	0,01	0,01	0,014				

Impulso	n	d(m)	t(μs)	t(s)	Vn (V)	u(Vn) (V)	ln(Vn)	u(ln(Vn))
1	0	123	0	0	9,204	0,001	2,2196	0,0001
2	1	246	0,66	6,6E-07	5,674	0,001	1,7359	0,0002
3	2	369	1,32	1,32E-06	3,484	0,001	1,2482	0,0003
4	3	492	1,97	1,97E-06	2,134	0,001	0,7580	0,0005
5	4	615	2,65	2,65E-06	1,334	0,001	0,2882	0,0007
6	5	738	3,34	3,34E-06	0,804	0,001	-0,2182	0,0012
7	6	861	4,01	4,01E-06	0,504	0,001	-0,6852	0,0020

f (MHz)	u(f(MHz))	f(Hz)	u(f(Hz))	$\phi(^{\circ})$	$\phi(\text{rad})$	
0,00105	0,00001	1,05E+03	1,00E-11	0	0,000	fase
1,575	0,001	1,58E+06	1,00E-09	180	3,142	contrafase
3,05	0,01	3,05E+06	1,00E-08	360	6,283	fase
4,65	0,01	4,65E+06	1,00E-08	540	9,425	contrafase
6,115	0,001	6,12E+06	1,00E-09	720	12,566	fase
7,56	0,01	7,56E+06	1,00E-08	900	15,708	contrafase
9,20	0,01	9,20E+06	1,00E-08	1080	18,850	fase

Cálculo das incertezas

Incerteza do logaritmo nipo do V simplista:

$$u(\ln(V)) = \frac{u(V)}{V}$$

Incerteza da distância percorrida pelo sinal

$$u(d) = \frac{\partial d}{\partial u(c)} \times 2n = u(c) \times 2n$$

Incerteza da corrente de atenuação

$$u(c) = \alpha \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(l)}{l}\right)^2}$$

condições que $u(\ln(c)) = m$:

Incerteza do ajuste do V

$$u(V) = r^n e^{-\alpha n l} \sqrt{u(c)^2 + (2l\alpha)^2 u(c)^2 + (2\alpha n)^2 u(c)^2}$$

Incerteza da velocidade de propagação segundo a variação da frequência

$$u(c) = V \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(l)}{l}\right)^2}$$