



Universidade de São Paulo
Instituto de Física

4323202 Física Experimental B

Linhas de Transmissão (cabos coaxiais)

OBJETIVOS:

1. Estudar os efeitos da impedância de terminação em uma linha de transmissão (cabo coaxial).
2. Medir a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética em uma linha de transmissão (cabo coaxial).

Material experimental

Osciloscópio



Gerador de ondas



Cabos coaxiais, com 30, 40 e 50m.

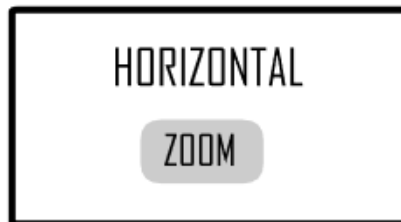
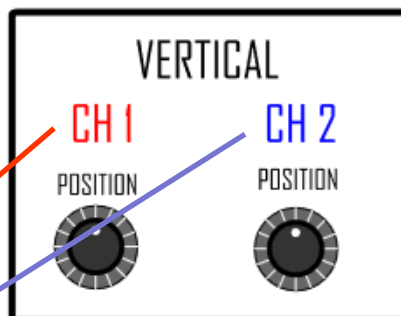
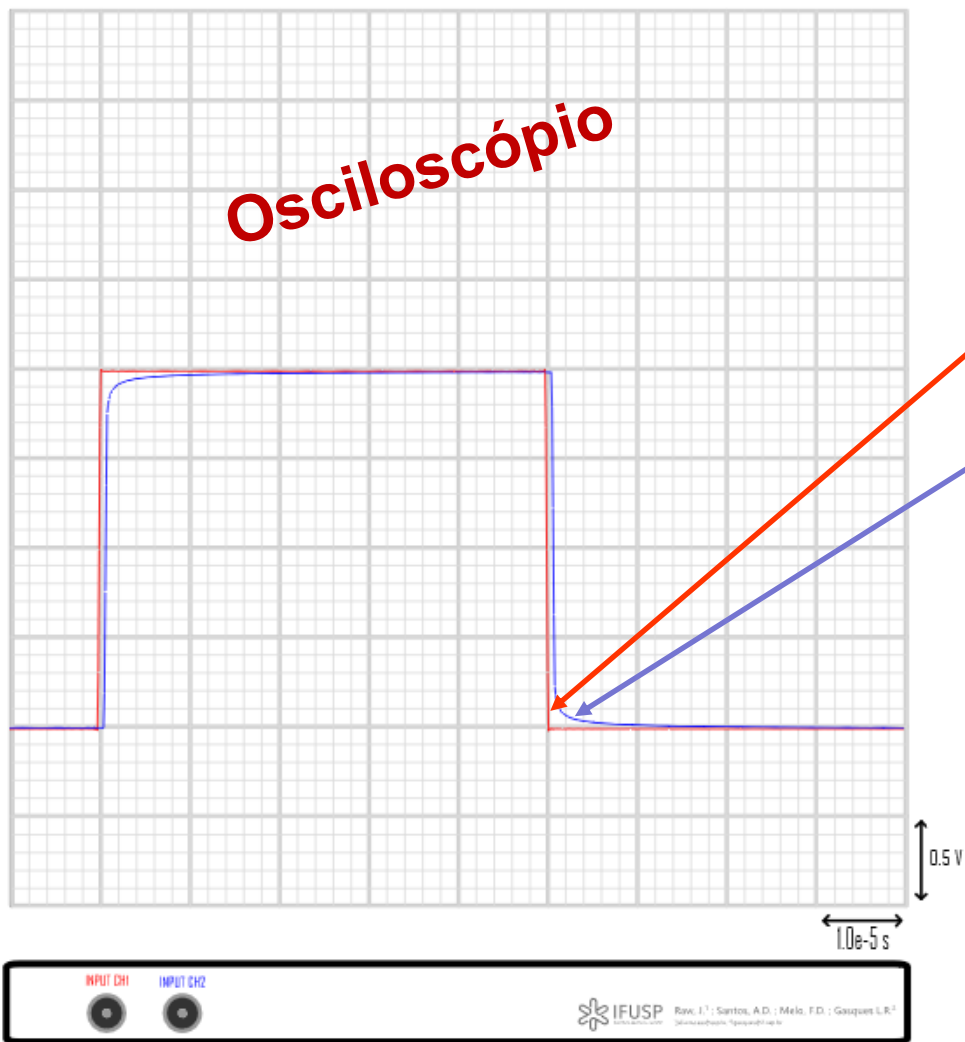


Conectores BNC, tipo T, terminação 50 Ω , terminação em curto circuito $R = 0\Omega$.



Simulação Numérica

Osciloscópio



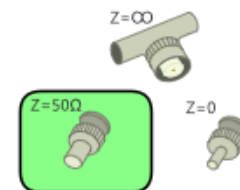
Comprimento do cabo coaxial



Cabos coaxiais

- L1 19 m
- L2 47 m
- L3 74 m

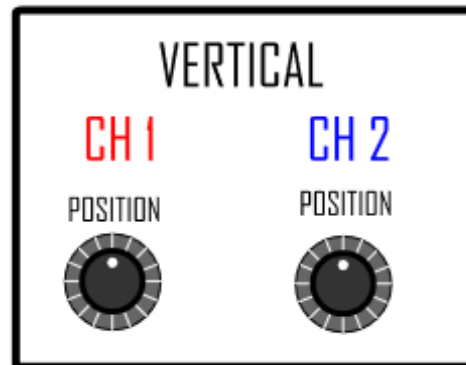
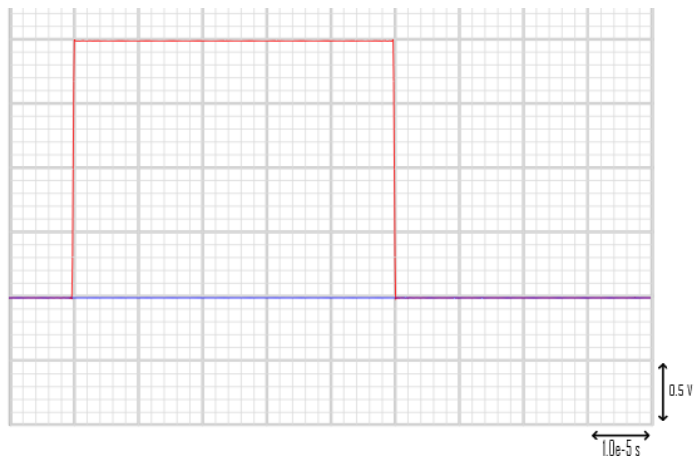
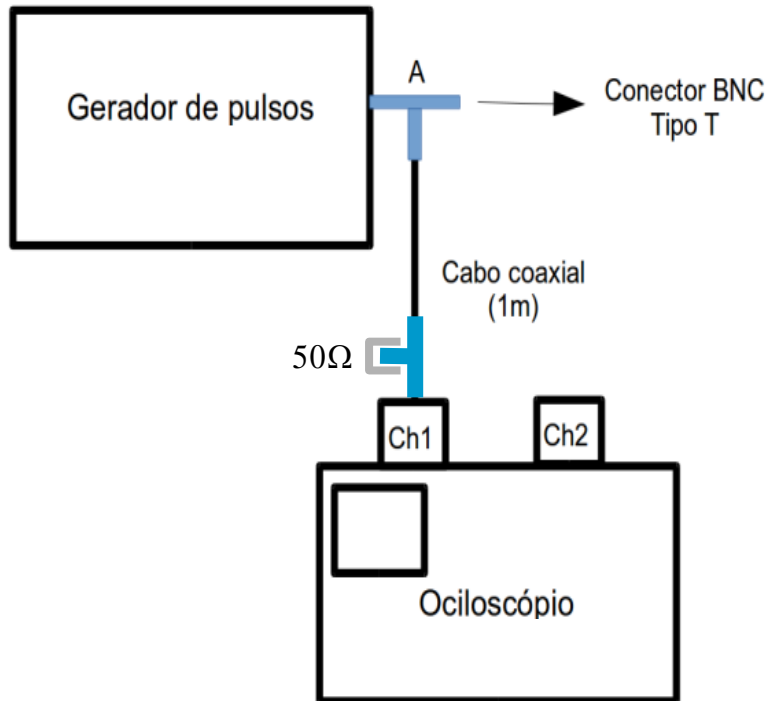
Terminador



Terminadores BNC

Gerador de onda quadrada

Familiarização com o aplicativo



V



Comprimento do cabo coaxial



L1

19 m

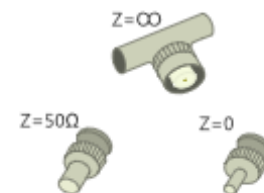
L2

47 m

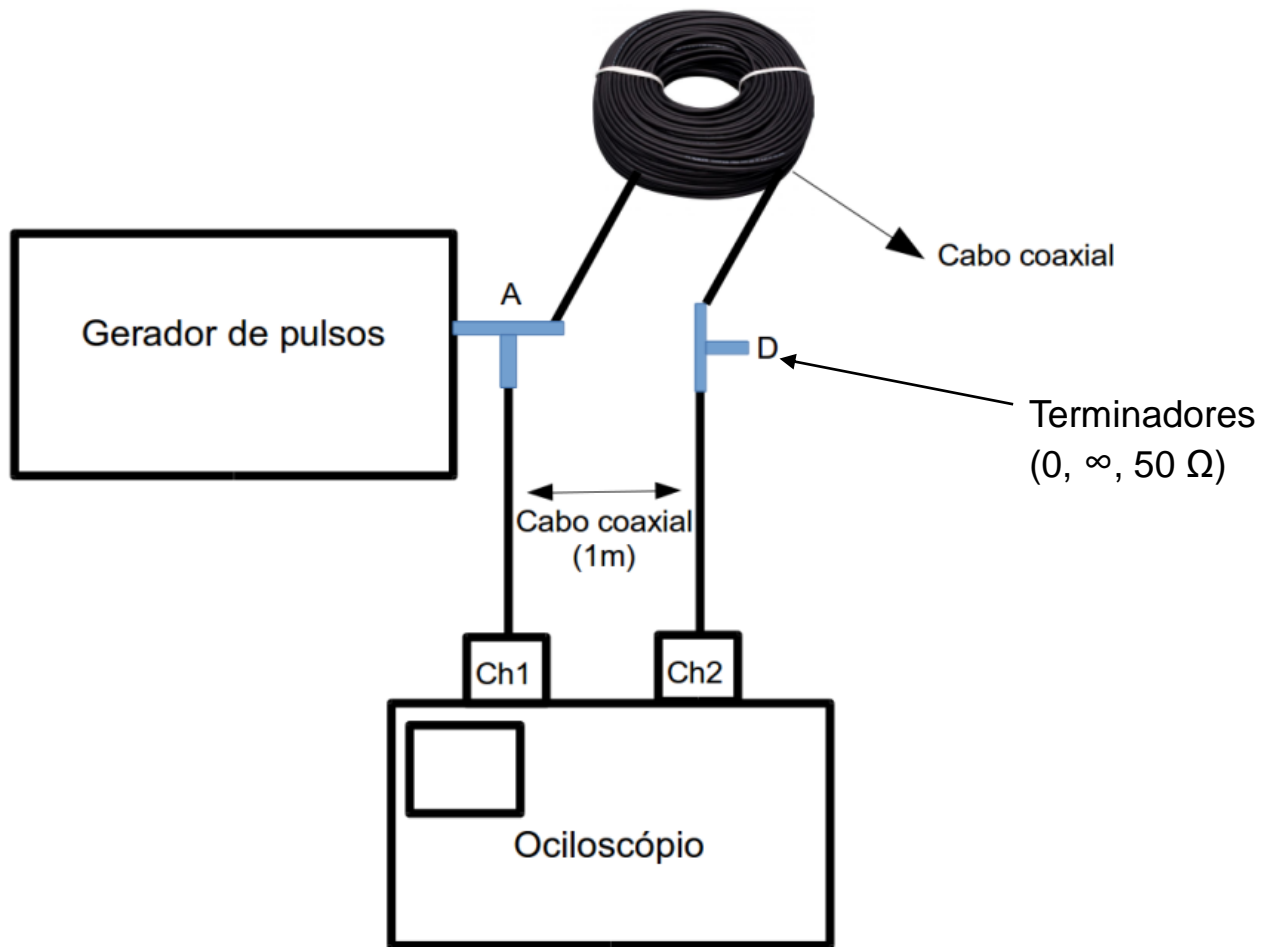
L3

74 m

Terminador



Analisando o efeito dos terminadores



Medida de dois sinais obtidos em distintos pontos de uma linha de transmissão (cabo coaxial), sob distintas condições de medida.

O campo elétrico e capacitância do cabo

Aplicando a lei de Gauss:

$$E = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 r}$$

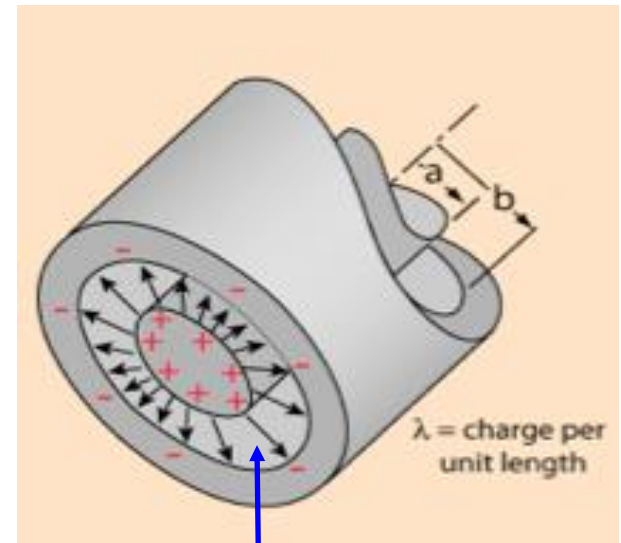
λ carga por comprimento

A ddp entre os 2 cilindros se obtém integrando **E** de **a** a **b**:

$$DV = \frac{I}{2\pi\epsilon_0} \int_a^b \frac{1}{r} dr = \frac{I}{2\pi\epsilon_0} \ln\left[\frac{b}{a}\right]$$

E a capacitância:

$$\frac{C}{I} = \frac{I}{DV} = \frac{2\pi k\epsilon_0}{\ln\left[\frac{b}{a}\right]}$$



Isolante: polietileno

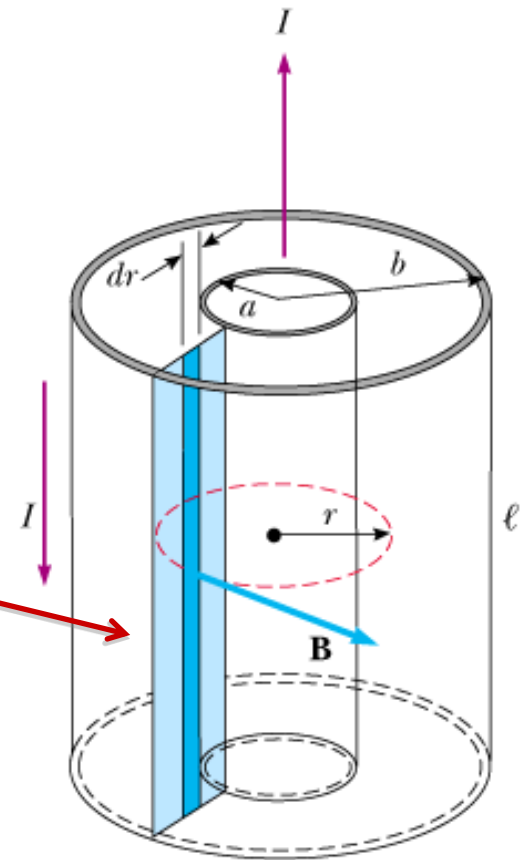
Campo magnético e indutância do cabo coaxial

B dentro do condutor interno é zero e fora do condutor externo também.

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad F_B = \int B dA \quad dA = l dr$$

$$L = N \frac{F_B}{i} \quad N = 1 \quad F_B = \frac{\mu_0 i l}{2\pi} \int_a^b \frac{l}{r} dr = \frac{\mu_0 i l}{2\pi} \ln \left[\frac{b}{a} \right]$$

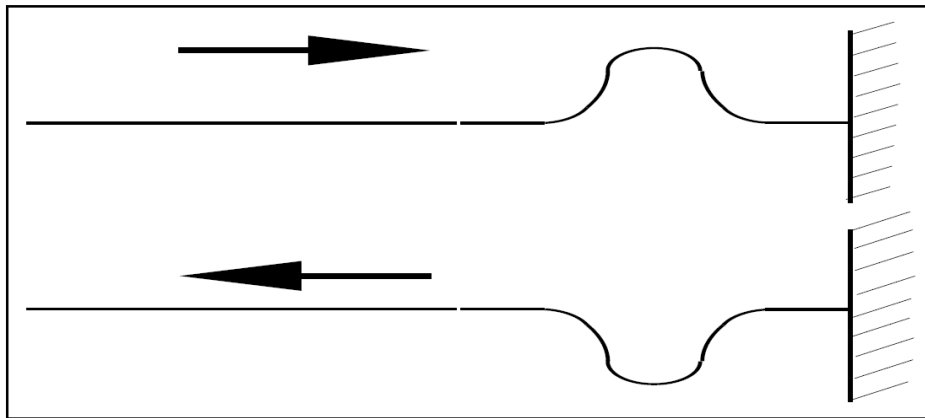
$$\frac{L}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{b}{a} \right]$$



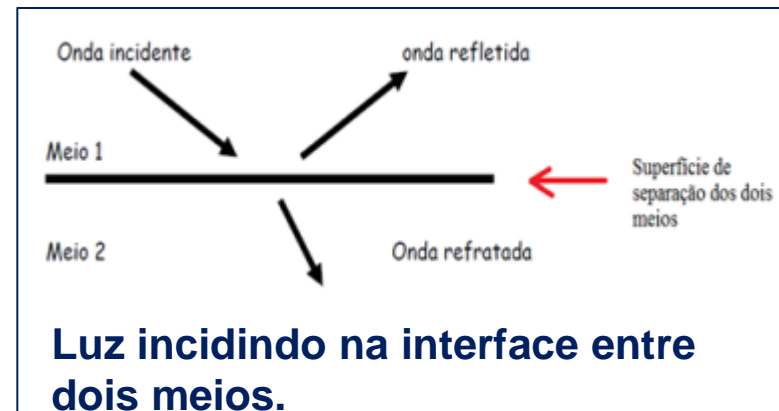
A onda quadrada injetada no cabo coaxial produz em seu interior uma onda eletromagnética propagativa.

Analogia com uma corda estendida

Todo obstáculo no caminho de uma **onda** gera algum tipo de **reflexão**.

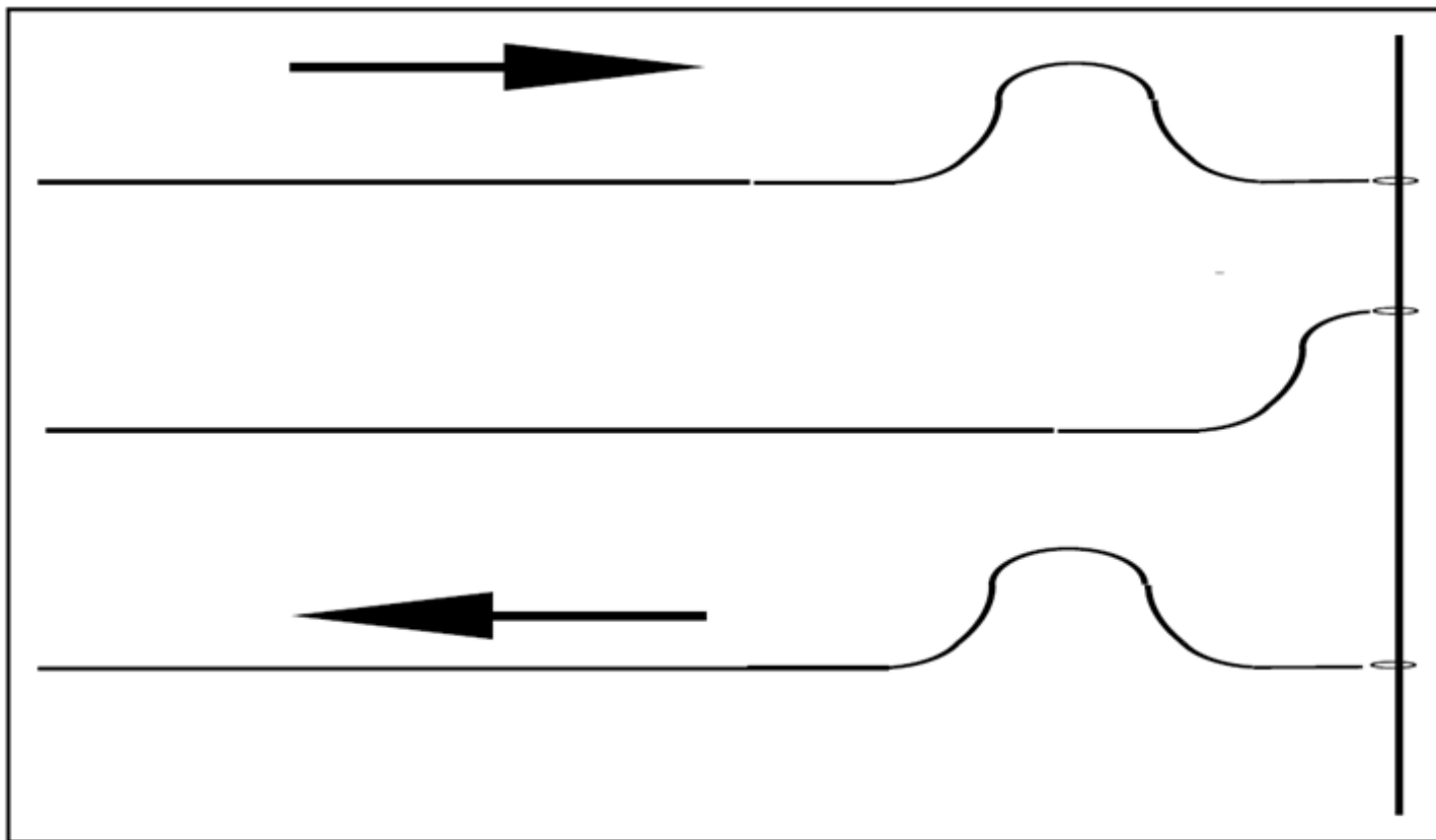


Numa corda com a **extremidade fixa**, o **pulso de onda refletido** mantém todas as características iniciais, porém com **inversão de fase de 180°** .

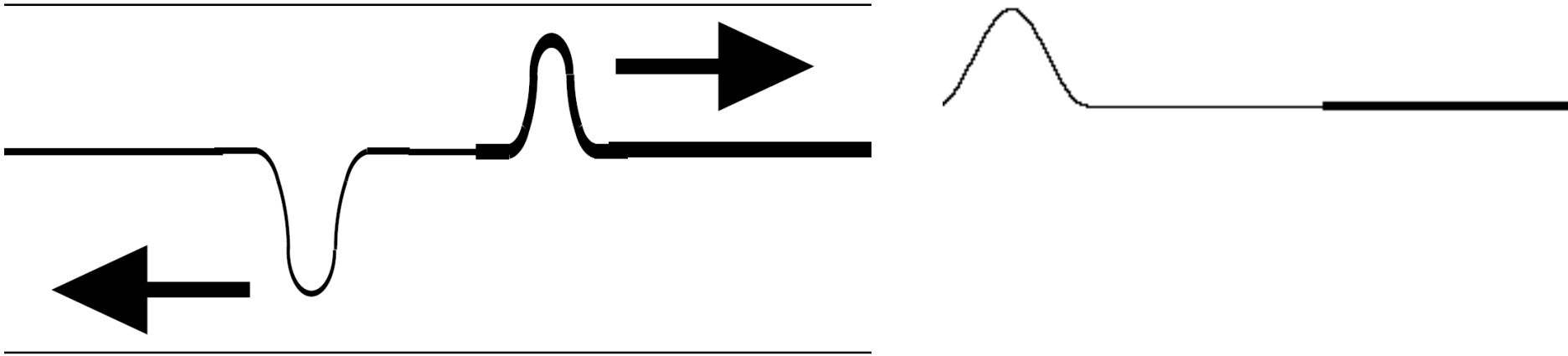


Reflexão em extremidade aberta

Numa corda com a **extremidade movel**, o pulso de onda refletido mantém todas as características iniciais, sem **inversão de fase**.



Emendas



Um **pulso** de uma corda de menor densidade de massa, é **parcialmente refletido e parcialmente transmitido** numa emenda com mudança de densidade.

Na mudança para densidade maior a reflexão ocorre com inversão de fase. Na mudança de densidade maior para menor a reflexão terá mesma fase.

O pulso transmitido mantém a fase do pulso incidente, qualquer que seja o caso.

O coeficiente de reflexão em uma linha de transmissão é dado por:

$$K = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0};$$

$Z_L \equiv$ impedância da terminação (carga) à que a linha está conectada;

$Z_0 \equiv$ impedância da própria linha.

ABERTA ($Z_L = \infty$):

$$K = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} = 1 \text{ (reflexão em fase)}$$

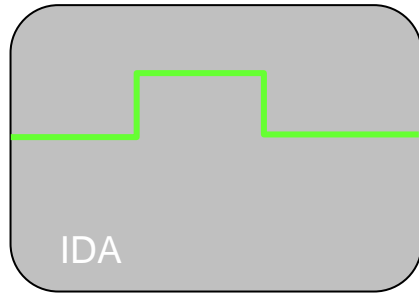
CURTO CIRCUITO (0 V) ($Z_L = 0$):

$$K = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1 \text{ (reflexão fora de fase)}$$

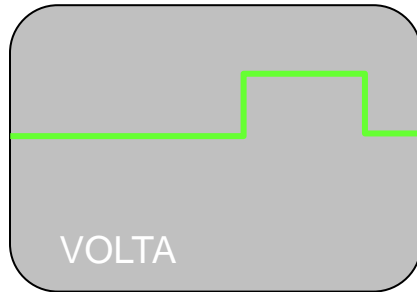
TERMINAÇÃO 50Ω ($Z_L = Z_0$)

$$K = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{0}{Z_L + Z_0} = 0 \text{ (não há reflexão)}$$

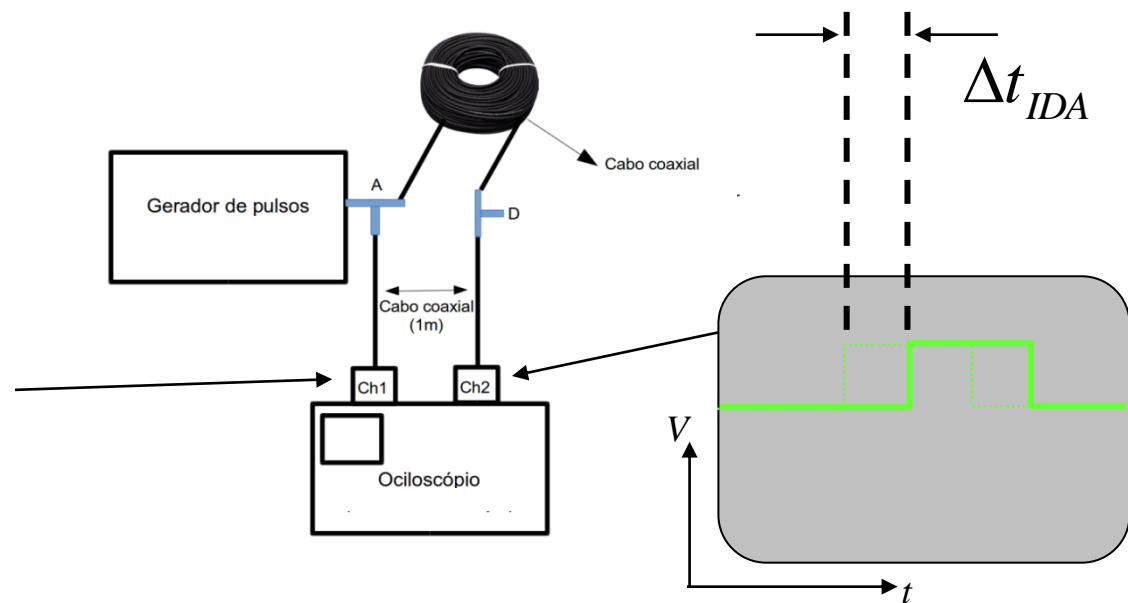
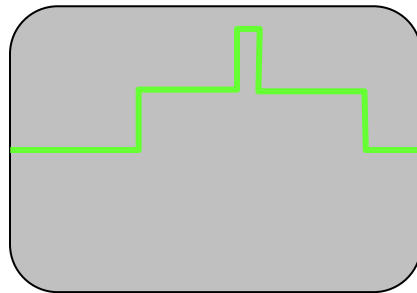
Analizando o efeito dos terminadores



+

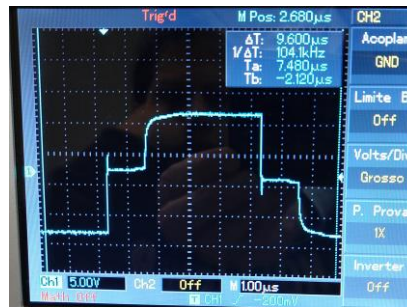


=



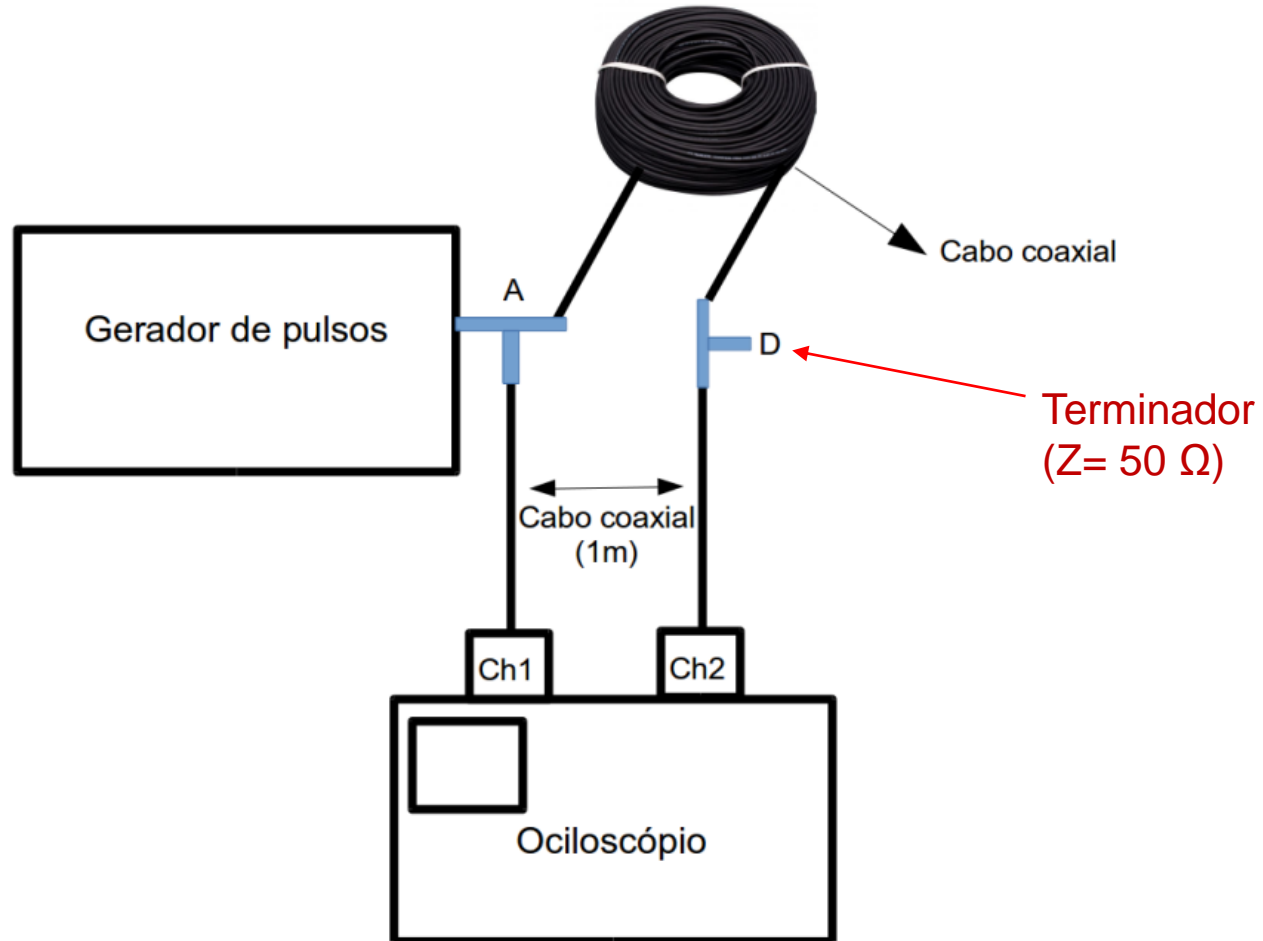
Terminação aberta.
Reflexão em (D)
sem inversão.

Feche o final do cabo (D)
em curto e verifique
como muda o sinal.



Vida real

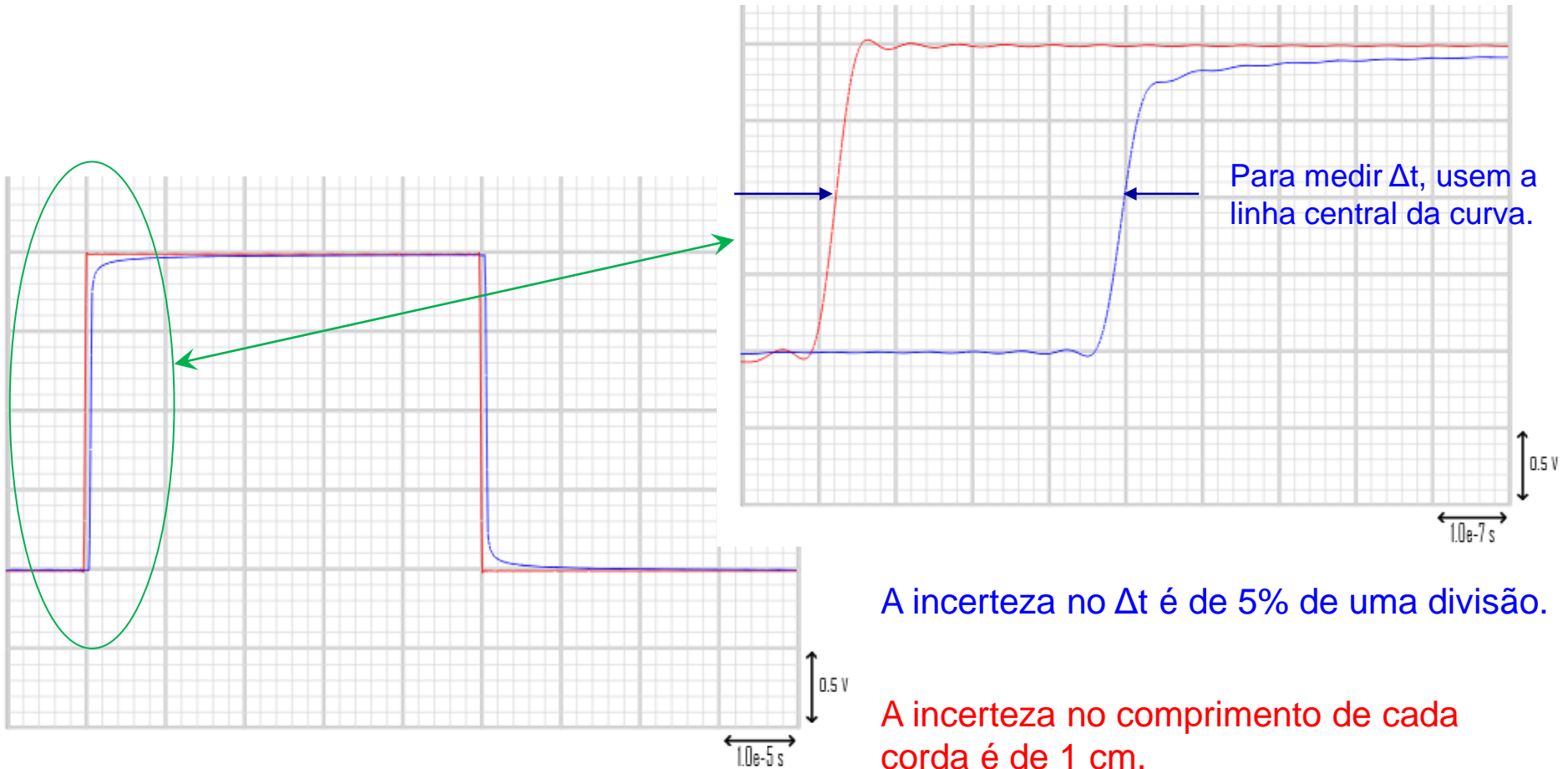
Medindo a velocidade de propagação da onda



Medida de dois sinais obtidos em distintos pontos de uma linha de transmissão (cabo coaxial), sob distintas condições de medida.

Medindo a velocidade de propagação da onda

ZOOM



A incerteza no Δt é de 5% de uma divisão.

A incerteza no comprimento de cada corda é de 1 cm.

Medida de dois sinais obtidos em distintos pontos de uma linha de transmissão (cabo coaxial), sob distintas condições de medida.

Tratamento e análise dos dados experimentais

Determine a velocidade de propagação de onda no cabo coaxial.

$$100 \left(\frac{v_{\text{exp}} - v_{\text{nom}}}{v_{\text{nom}}} \right)$$

Compare com o valor fornecido pelo fabricante:

$$V_{\text{nominal}} = 0.66 \cdot c$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Índice de refração “ n ” de um meio é dado por:

$$n = \frac{c}{v}$$

Verificando o acordo com valores nominais

Supondo a permeabilidade magnética do material isolante (polietileno) igual a do vácuo

$$\mu = \mu_0$$

Seja constante dielétrica k definida pelo quociente entre as permissividades do polietileno e do vácuo:

$$\left(k = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)$$

Determine k a partir da velocidade de propagação medida.

A velocidade da onda no meio com permeabilidade magnética μ e permissividade elétrica ε é dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}}$$

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \Rightarrow \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} = \sqrt{k}$$

$$v_{\text{nominal}} = 0,66 \cdot c$$
$$\Rightarrow k_{\text{nominal}} \approx 2,3$$