

# Pós-Prática

## Velocidade da Luz

Edmur C. Neto - 12558492  
Rafael F. Gigante - 12610500

Instituto de Física de São Carlos  
Universidade de São Paulo

10/04/2024

# INTRODUÇÃO

- **Galileu Galilei (séc. XVII):** Experimento das duas lanternas separadas por uma grande distância;
- Resultados inconclusivos.



Galileu Galilei



Experimento das lanternas

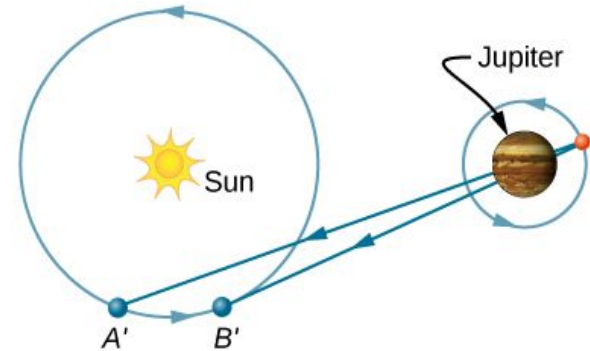
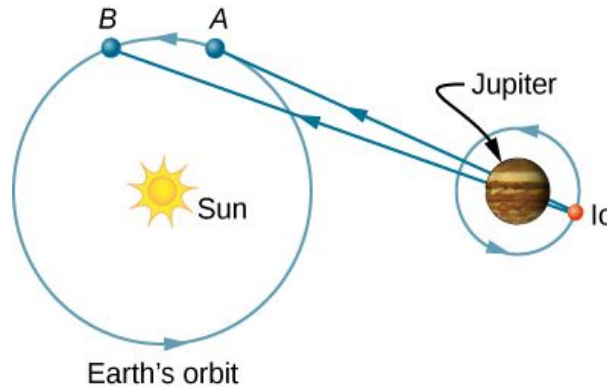


# INTRODUÇÃO

- **Ole Romer (1676):** Observação das luas de Júpiter;
- Obteve  $c = 2.20 \times 10^5 km/s$ .



Ole Romer



Eclipse da lua de Júpiter  
observada em diferentes épocas

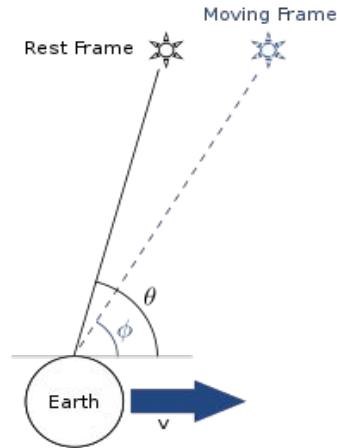


# INTRODUÇÃO

- **James Bradley (1729):** Aberração da luz;
- Obteve  $c = 3.01 \times 10^5 km/s$ .



James Bradley



Source's rest frame



Observer's rest frame

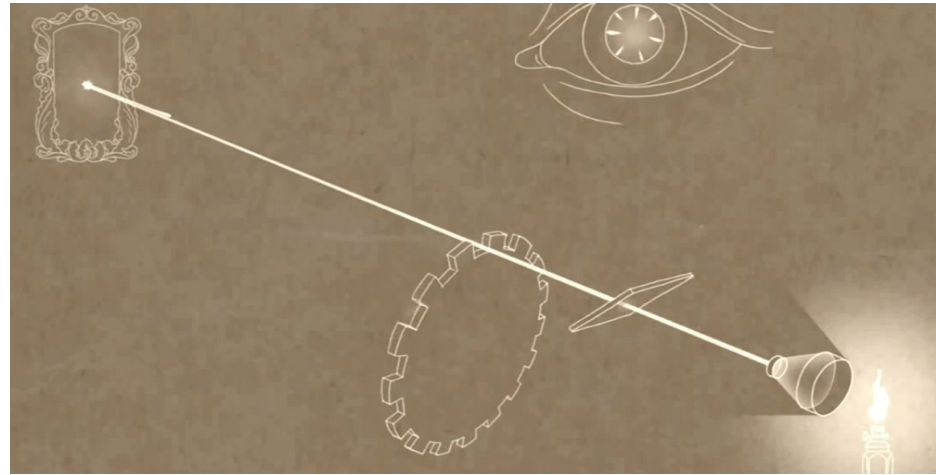


# INTRODUÇÃO

- **Hippolyte Fizeau (1849):** Experimento da Roda Dentada;
- Obteve  $c = 3.15 \times 10^5 km/s$  .



Hippolyte Fizeau



Experimento da roda dentada

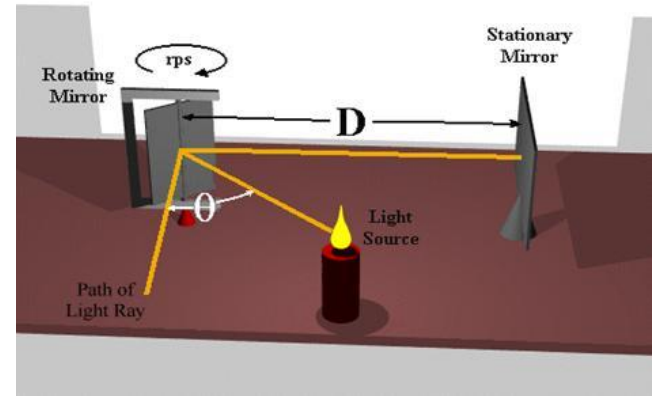
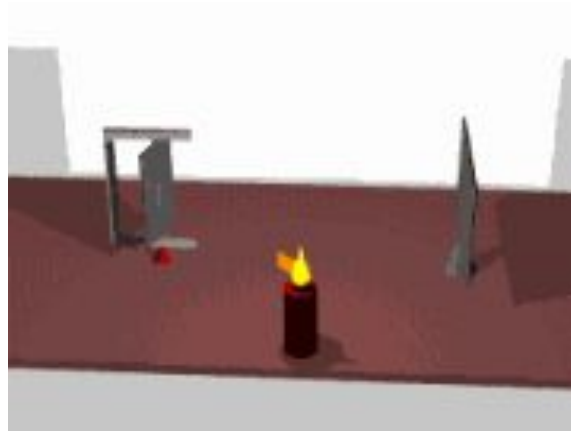


# INTRODUÇÃO

- **Léon Foucault (1862):** Experimento do espelho giratório;
- Obteve  $c = 2.98 \times 10^5 km/s$ .



Léon Foucault



Experimento do espelho giratório

# INTRODUÇÃO

- **Rosa&Drosey (1906):**  $(\mu_0\epsilon_0)^{-\frac{1}{2}}$ ,  $c = 2.99710 \times 10^5 km/s$  ;
- **Albert Michelson (1878):** espelho giratório,  $c = 2.99796 \times 10^5 km/s$  ;
- **Essen&Gordon-Smith (1950):** cavidade ressonante,  $c = 2.99792 \times 10^5 km/s$  ;
- **Froome (1958):** interferometria com ondas de rádio,  $c = 2.99792 \times 10^5 km/s$  ;
- **Evenson & Colab (1972):** interferometria laser,  $c = 2.99792 \times 10^5 km/s$  ;
- **Valor atualmente definido:**  $c = 299792.458 \text{ km/s}$  .

# INTRODUÇÃO

- Importância da definição do valor da Velocidade da Luz:
  - Determinação de unidades SI (m);
  - Sistemas de Comunicação (Fibra óptica);
  - Sistemas de Localização (GPS)



# OBJETIVOS

- Experimento 1 (Espelho giratório):
  1. Familiarizar-se com técnicas de alinhamento óptico;
  2. Utilização do conjunto fotodetector-osciloscópio para determinar a velocidade de rotação do espelho giratório;
  3. Determinar experimentalmente a velocidade da luz e comparar com o resultado esperado;

# Experimento

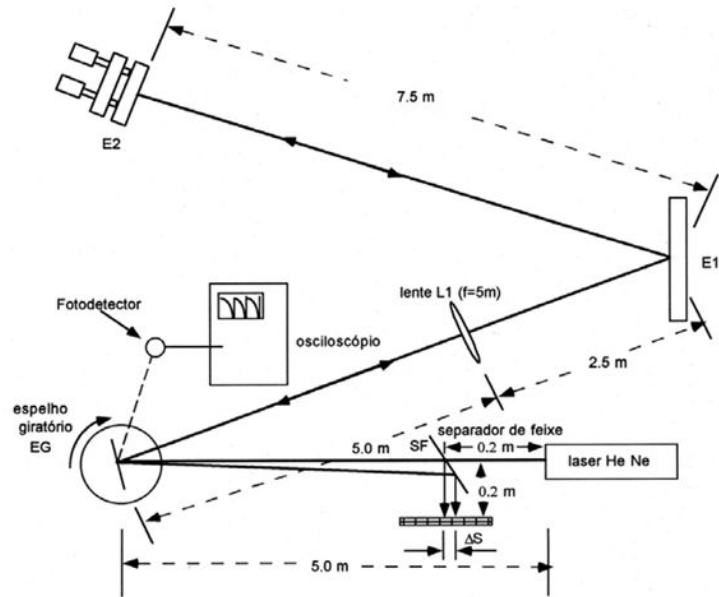


Diagrama da montagem experimental

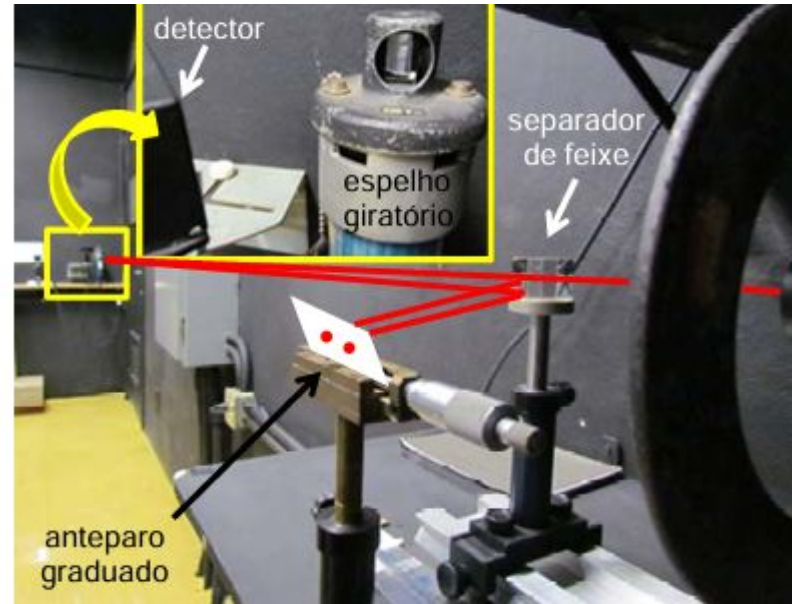


Foto-montagem do experimento

# Experimento

- Tempo de vôleo do pulso ( $\sim \mu s$ ):

$$\omega t = \phi \Rightarrow t = \frac{\phi}{2\pi f}$$

- Separação dos pulsos:

$$\Delta S = 2\phi R$$

- Velocidade da luz:

$$v = \frac{2d}{t} \Rightarrow v = \frac{8\pi R f d}{\Delta S}$$

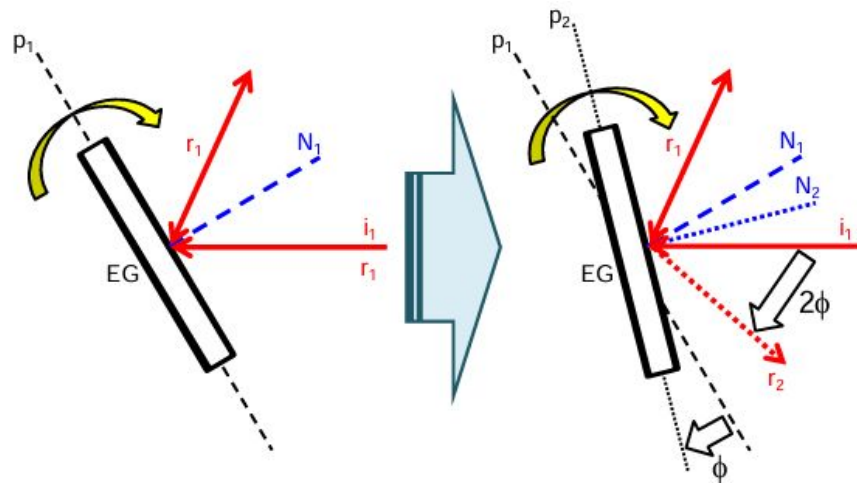


Diagrama dos espelhos girantes

# Resultados esperados

- Espera-se obter que  $\Delta S \propto f$ ;
- Análise dos dados experimentais:
  1. Determinar a velocidade da luz a partir de um gráfico de  $\Delta S$  em função de  $f$ ;
  2. Determinar a velocidade da luz através de um histograma das velocidades obtidas com cada valor de  $\Delta S$  e  $f$ .

$$c_0 = 2.988 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$c_{ar} = 2.987 \times 10^8 \text{ m/s}$$

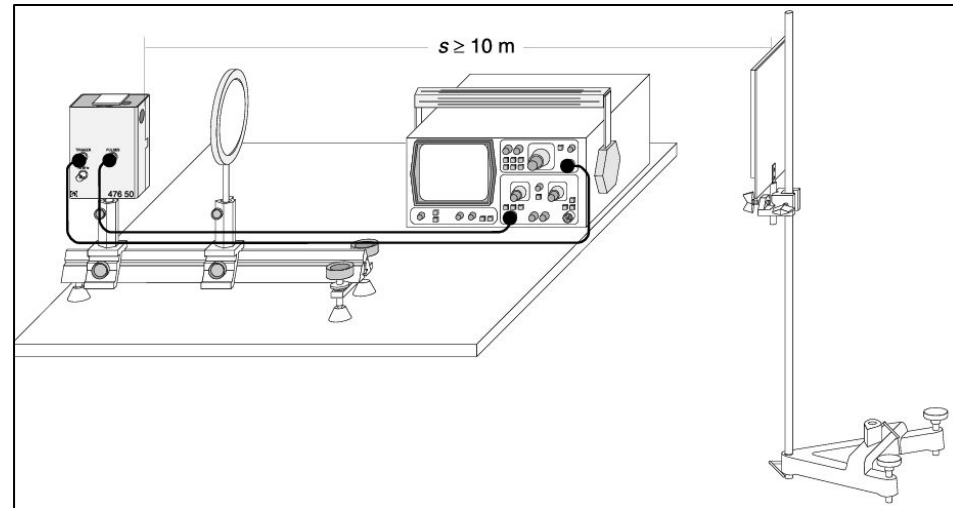
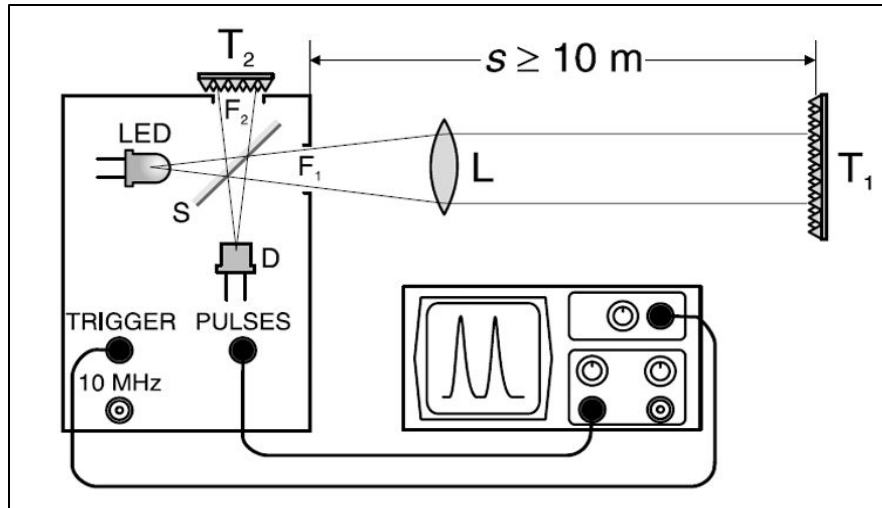


# OBJETIVOS

➤ Experimento 2 (Pulsos):

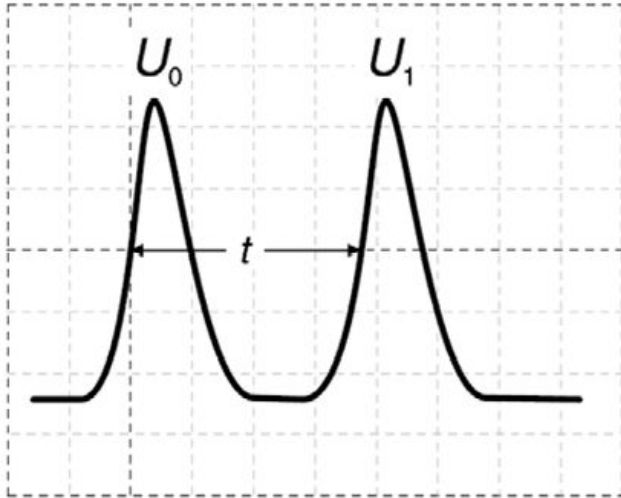
1. Familiarizar-se com técnicas de alinhamento óptico;
2. Utilização de um osciloscópio para medir o tempo gasto por um pulso para percorrer uma distância pré-estabelecida;
3. Determinar experimentalmente a velocidade da luz e comparar com o resultado esperado.

# Experimento



Diagramas da montagem experimental

# Resultados esperados



Pulsos observados no osciloscópio

$$c_0 = 2.988 \times 10^8 \text{ m/s}$$

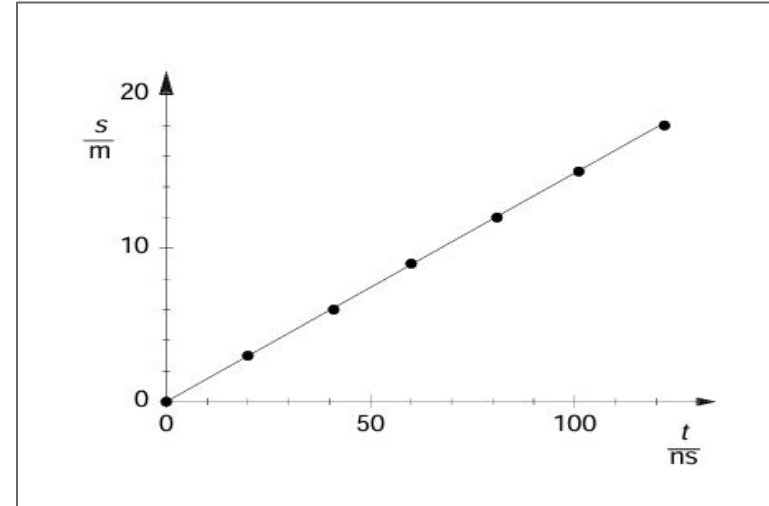


Gráfico esperado, onde o coeficiente angular é a velocidade da luz

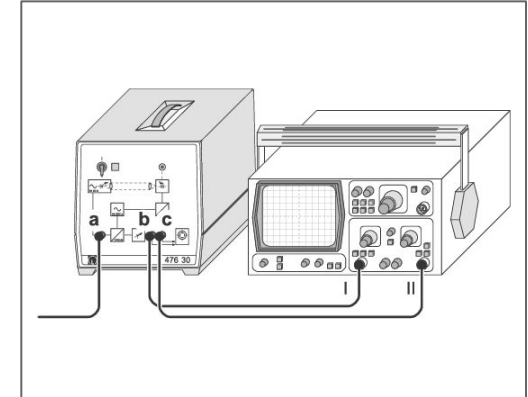
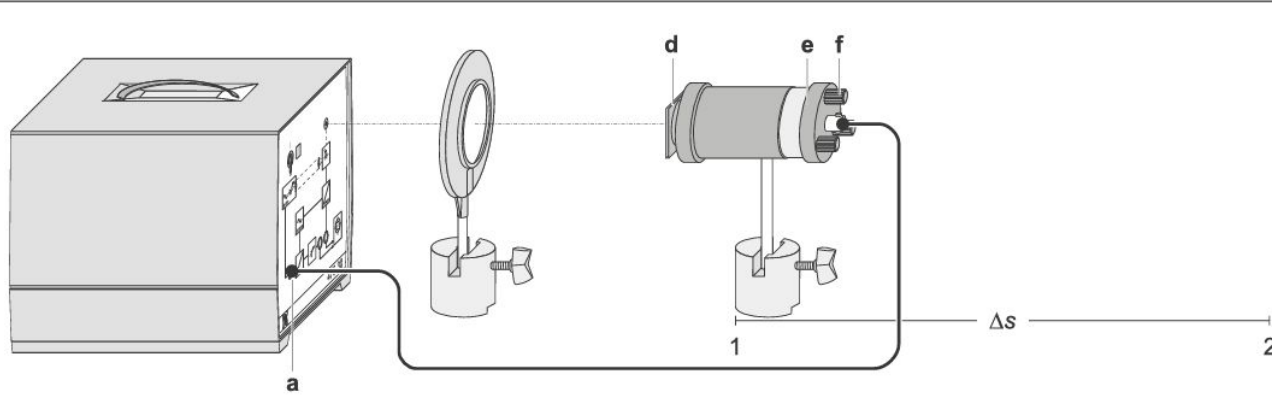
$$c_{ar} = 2.987 \times 10^8 \text{ m/s}$$

# OBJETIVOS

- Experimento 3 (Modulação temporal):
  1. Medir a diferença de fase  $\Delta\varphi$  de um sinal periódico baixo em um pequeno caminho  $\Delta S$  e determinar a velocidade da luz;
  2. Determinar a velocidade da luz e o índice de refração de diferentes meios: água, líquido orgânico e vidro.



# Experimento



Diagramas da montagem experimental

# Experimento

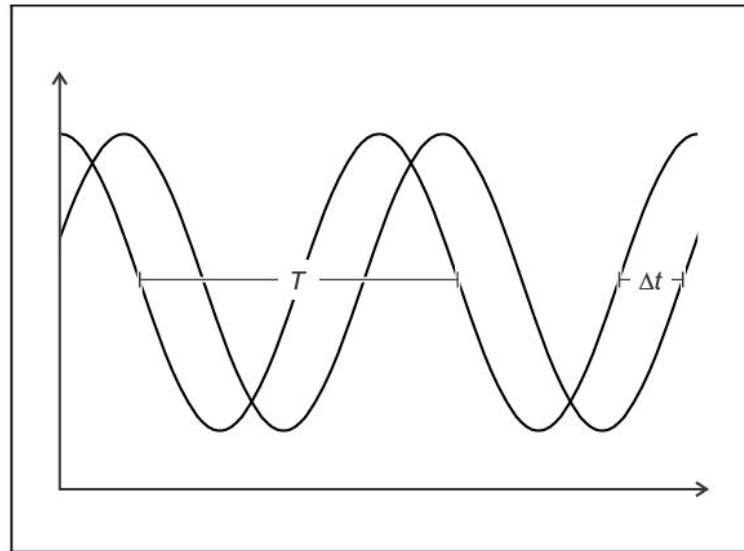
- Sinal emitido:  $I = I_0 + \Delta I_0 \cos(2\pi\nu t)$
- Sinal recebido:  $U = A \cos(2\pi\nu t)$
- Afastando o emissor do receptor por  $\Delta S$  geramos um atraso no sinal:

$$\Delta t = \frac{\Delta S}{c} \Rightarrow \Delta\varphi = 2\pi\nu\Delta t$$

$$U = A \cos(2\pi\nu t - \Delta\varphi)$$

- Juntando as equações, obtemos:

$$c = \frac{\Delta S}{\Delta\varphi} 2\pi\nu$$



Sinal emissor e receptor atrasado por  $\Delta t$



# Experimento

- Misturamos dois sinais:

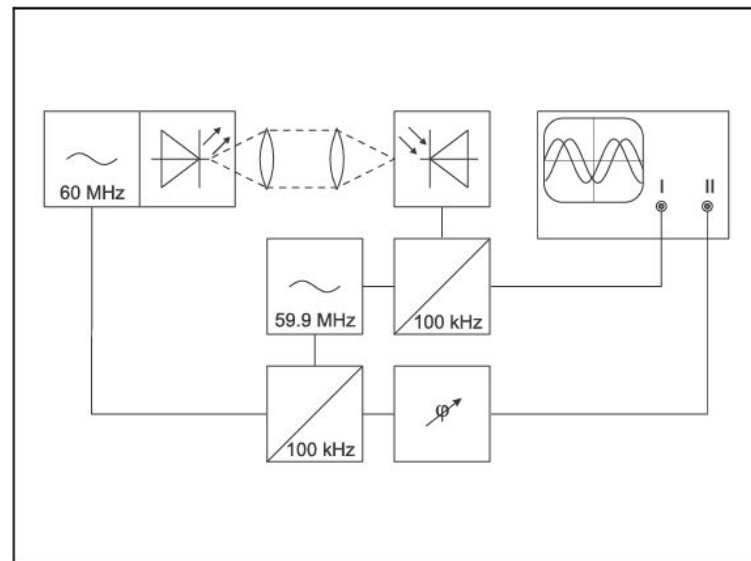
$$\nu = 60 \text{ MHz} \qquad \nu' = 59.9 \text{ MHz}$$

$$U = A \cos(2\pi\nu t - \Delta\varphi) \cos(2\pi\nu' t)$$

- Resulta em um sinal alto e um sinal baixo, filtramos apenas o sinal baixo:

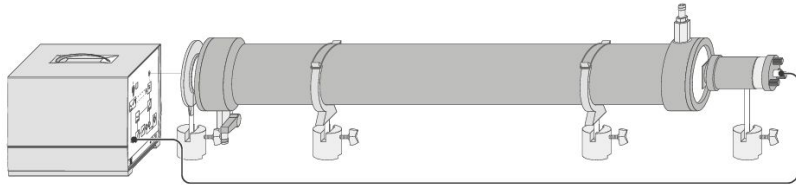
$$U_1 = \frac{1}{2} A \cos(2\pi(\nu - \nu')t - \Delta\varphi)$$

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t_1}{T_1} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta t_1}{T_1 \nu} \Rightarrow \boxed{c = \frac{\Delta S}{\Delta t_1} T_1 \nu}$$



Esquema do equipamento  
modulador de frequência

# Experimento



➤ Tubo com água;

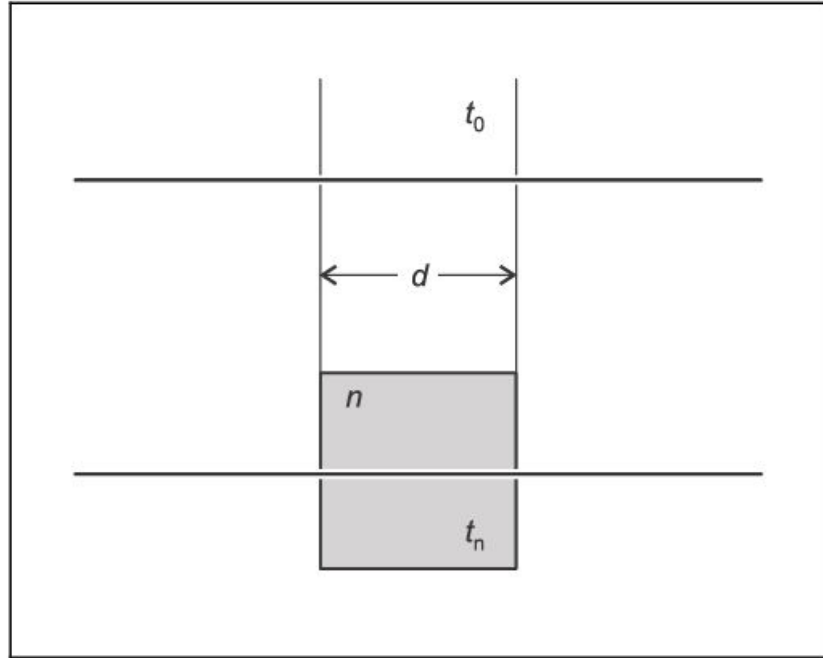
➤ Cilindro com líquidos orgânicos:  
etanol e glicerina;



➤ Cilindro de acrílico;



# Experimento



Propagação da luz em diferentes meios

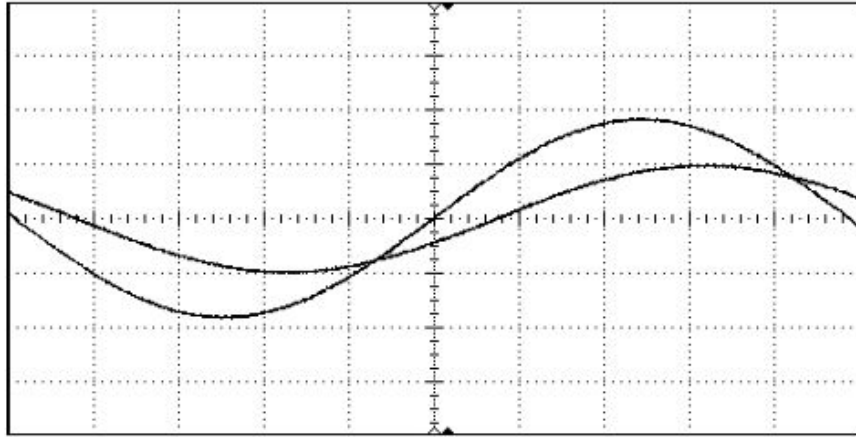
$$c_n = \frac{c_0}{n} \Rightarrow t_n = \frac{d}{c_n}, \quad t_0 = \frac{d}{c_0}$$

$$\Delta t = t_n - t_0 \Rightarrow \boxed{\begin{aligned} c_n &= \frac{c_0}{1 + \frac{\Delta t}{d} c_0} \\ n &= 1 + \frac{\Delta t}{d} c_0 \end{aligned}}$$

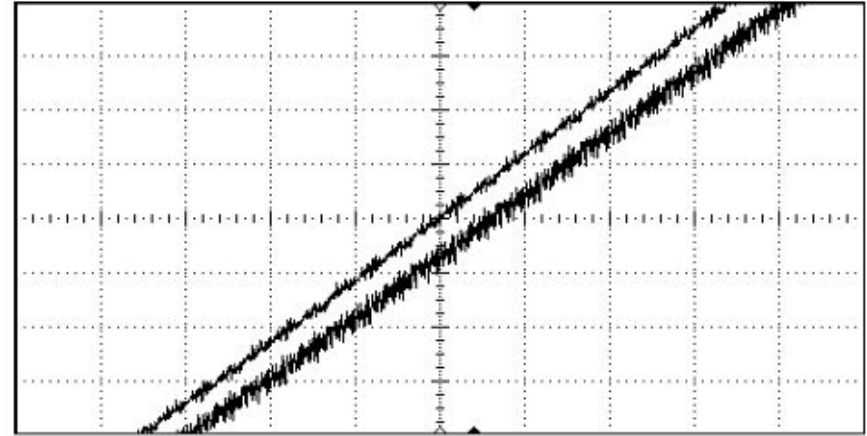
$$\Delta t = \frac{\Delta t_1}{T_1 \nu} \Rightarrow \boxed{\begin{aligned} c_n &= \frac{c_0}{1 + \frac{c_0}{d\nu} \frac{\Delta t_1}{T_1}} \\ n &= 1 + \frac{c_0}{d\nu} \frac{\Delta t_1}{T_1} \end{aligned}}$$



# Resultados esperados



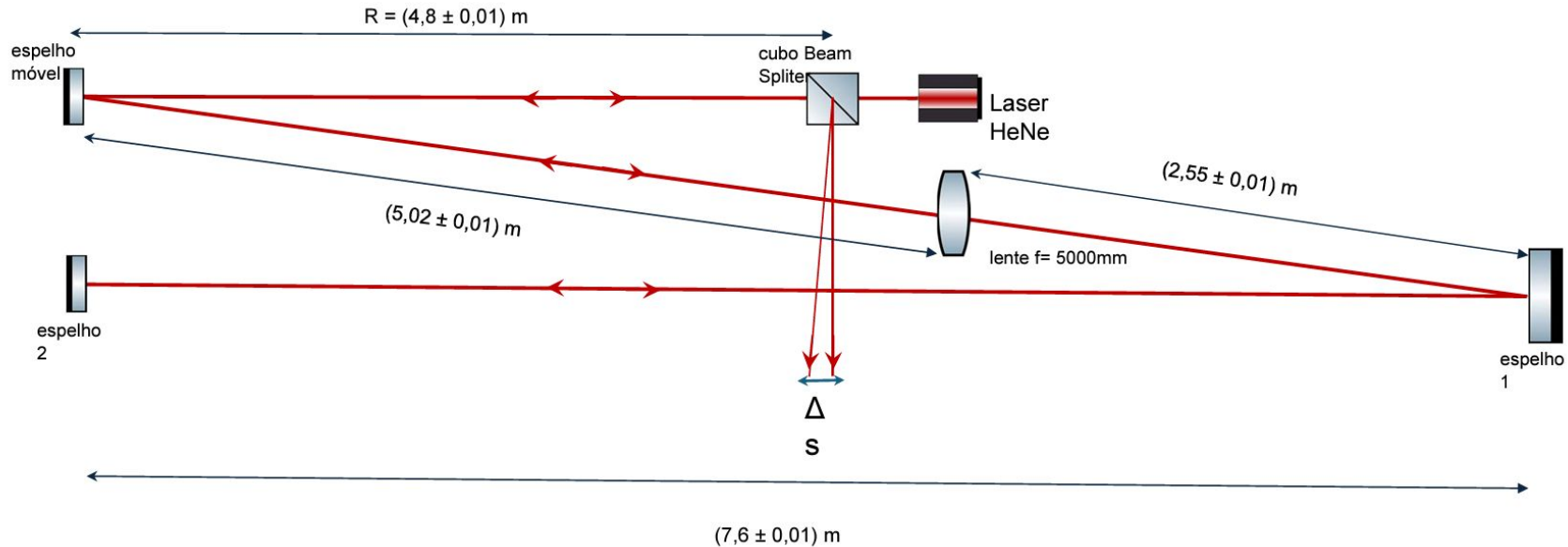
Exemplo de sinal para água



Exemplo de sinal para o acrílico

- Valores da literatura: Água:  $n = 1.333$   
Etanol:  $n = 1.36$   
Glicerina:  $n = 1.47$   
Acrílico:  $n = 1.5$

## Resultados e discussões: Espelhos Girantes



## Montagem experimental com os valores medidos

# Resultados e discussões: Espelhos Girantes

f(Hz)	$\sigma$ f(Hz)	S $\pm$ 1 (mm)
263.6	0.8	1.3
328.4	0.7	1.1
395.2	1	1.9
457.9	0.6	2.3
548	1	2.5
631.5	0.2	3.2
655.7	0.2	3.2
749	2	3.3
885.3	0.7	4.2
899.5	0.0	4.5
964.8	3.8	4.5
1110	1	5.6
1148	2	5.8
1270	29	5.9

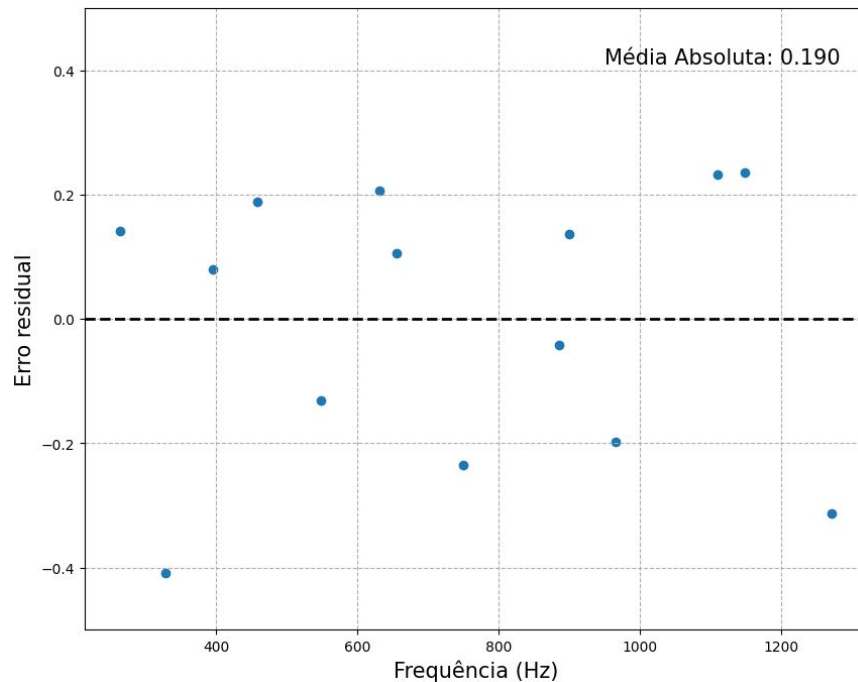
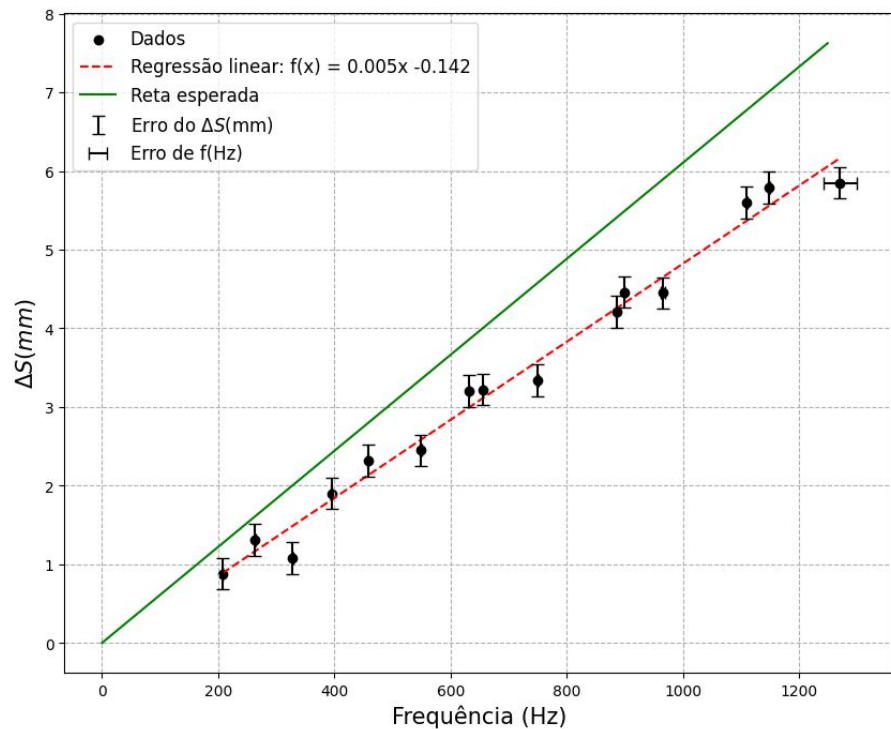
$$d = (15.17 \pm 0.03)m$$

$$R = (4.8 \pm 0.01)m$$

$$v = \frac{8\pi R f d}{\Delta S}$$



# Resultados e discussões: Espelhos Girantes



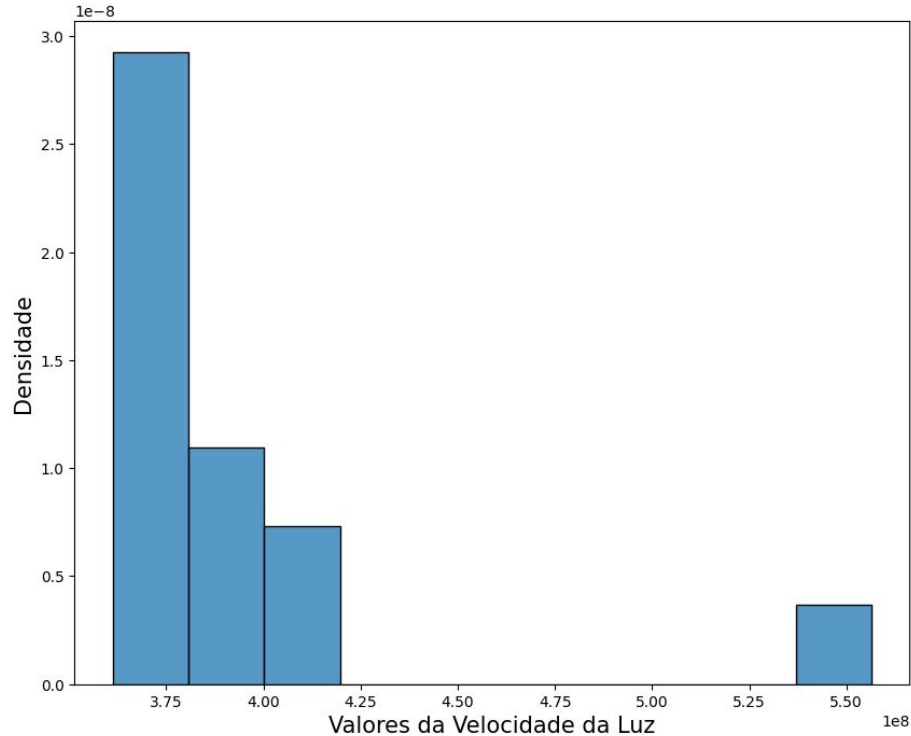
# Resultados e discussões: Espelhos Girantes

➤ Velocidade obtida:

$$v = (3.7 \pm 0.2) \times 10^8 m/s$$

➤ Erro relativo ao valor da literatura:  $\epsilon = 22.97\%$

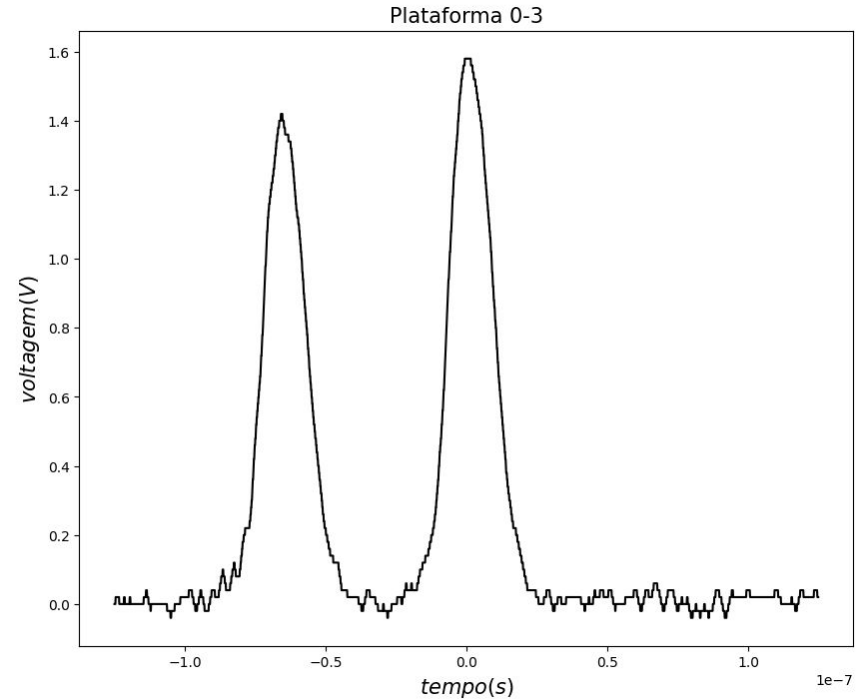
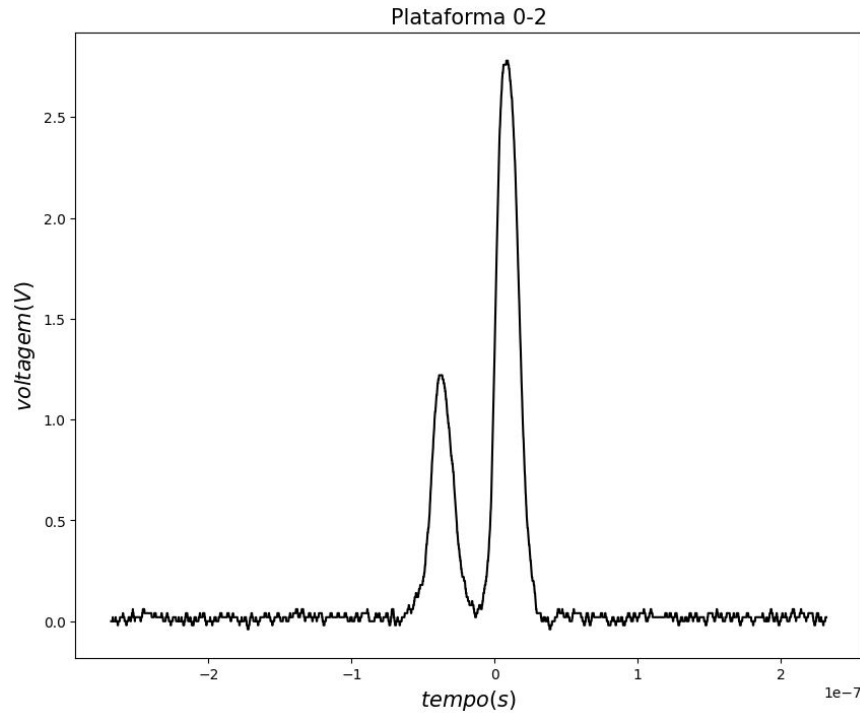
# Resultados e discussões: Espelhos Girantes



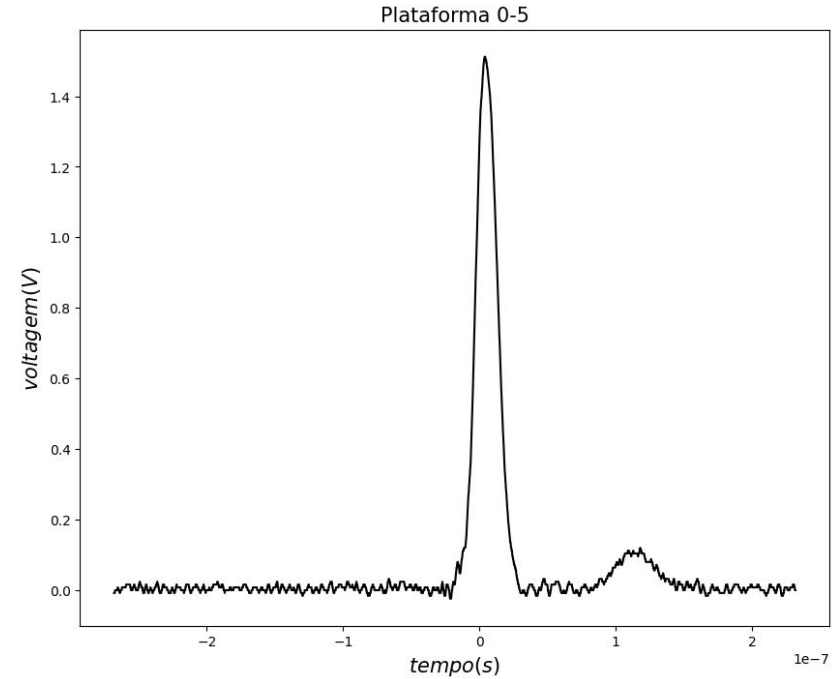
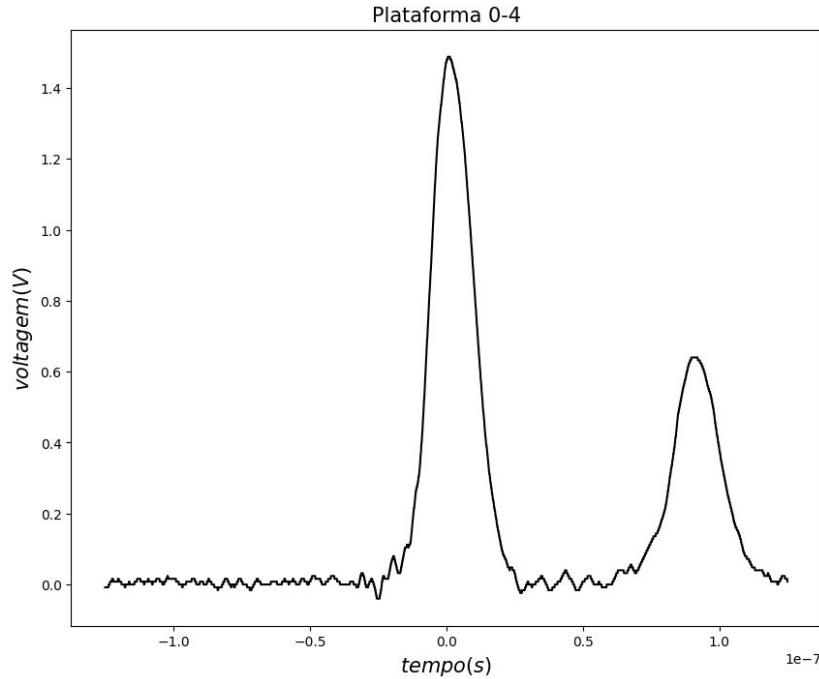
# Resultados e discussões: Espelhos Girantes

- Velocidade média obtida:  $v = (3.9 \pm 1.6) \cdot 10^8 m/s$
- Erro relativo ao valor da literatura:  $\epsilon = 30.9\%$

# Resultados e discussões: Pulsos

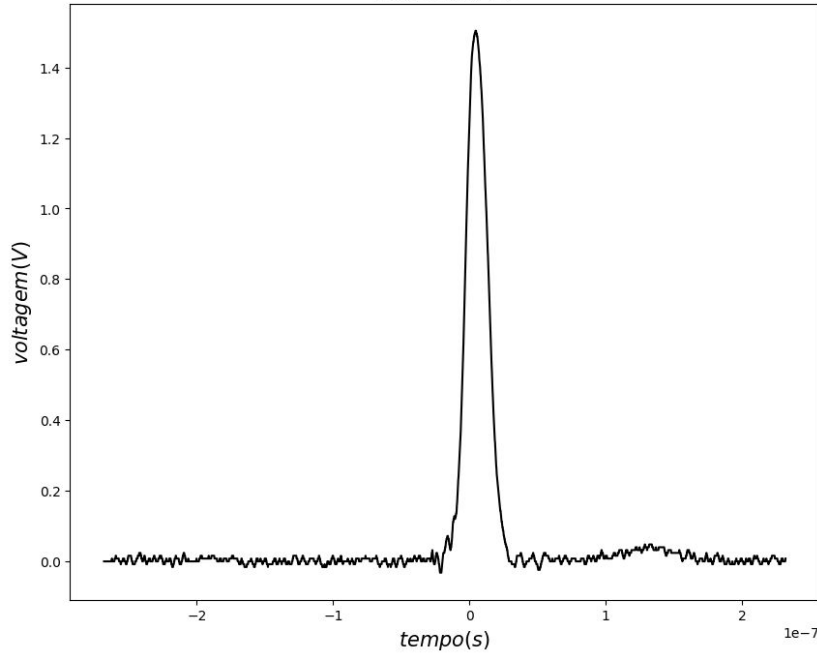


# Resultados e discussões: Pulsos

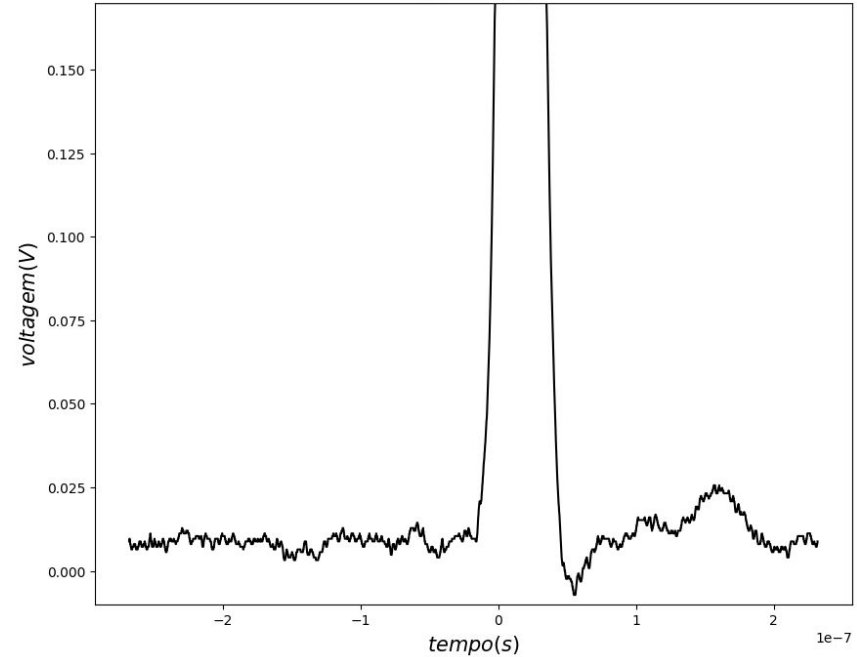


# Resultados e discussões: Pulsos

Plataforma 0-6



Plataforma 0-7



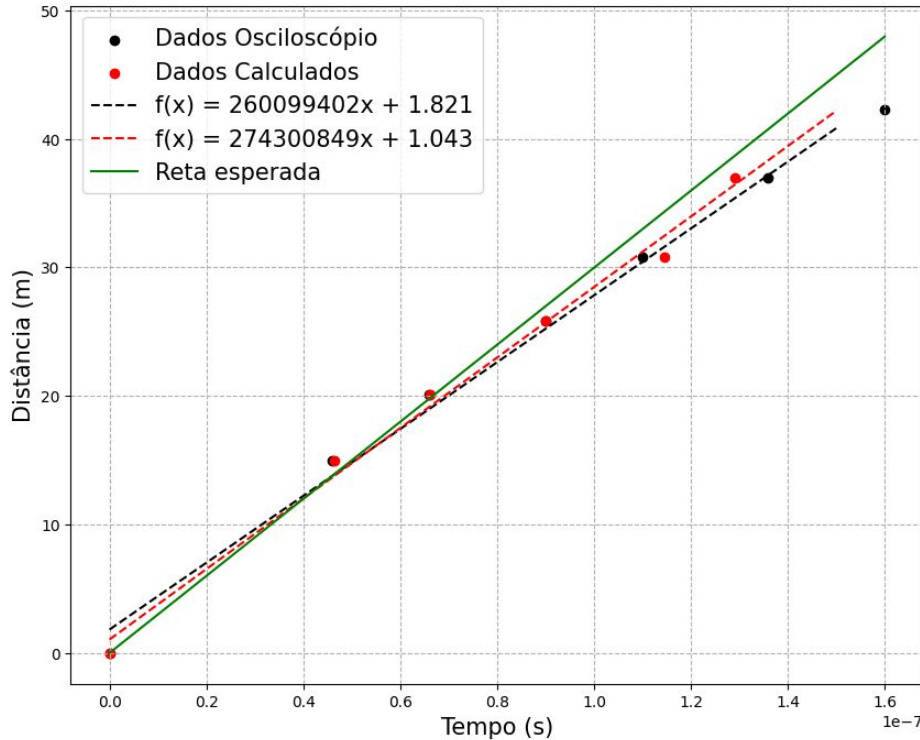
# Resultados e discussões: Pulsos

Distância (m)	$\sigma$ Distância (m)	Tempo Osc. $\pm 2.10^{-9}$ (s)	Tempo Calc. $\pm 2.10^{-9}$ (s)
0	0	0	0
14.97	0.02	0.000000046	0.000000046
20.064	0.02	0.000000066	0.000000066
25.81	0.03	0.000000090	0.000000090
30.84	0.04	0.000000110	0.000000146
36.94	0.05	0.000000136	0.000000129
42.26	0.06	0.000000160	

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$



# Resultados e discussões: Pulsos



➤ Velocidades obtidas:

$$v_{osciloscópio} = (2.6 \pm 0.4) \cdot 10^8 (m/s)$$

$$v_{calculado} = (2.7 \pm 0.4) \cdot 10^8 (m/s)$$

➤ Erros relativos:

$$\epsilon_{osciloscópio} = 13.1\%$$

$$\epsilon_{calculado} = 8.5\%$$

# Resultados e discussões: Pulsos

$v_{osc.} \text{ (m/s)} \cdot 10^8$	$\sigma v_{osc.} \text{ (m/s)} \cdot 10^8$	$\epsilon \text{ (\%)}$	$v_{calc.} \text{ (m/s)} \cdot 10^8$	$\sigma v_{calc.} \text{ (m/s)} \cdot 10^8$	$\epsilon \text{ (\%)}$
3.25	0.1	8.55	3.25	0.1	8.55
3.0	0.09	1.40	3.04	0.09	1.40
2.87	0.07	4.34	2.87	0.7	4.34
2.8	0.05	6.48	2.11	0.3	29.54
2.72	0.04	9.40	2.86	0.5	4.48
2.64	0.04	11.90			

➤ Velocidades obtidas:  $v_{osciloscópio} = (2.89 \pm 0.07) \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$$v_{calculado} = (2.83 \pm 0.08) \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

➤ Erros relativos  $\epsilon_{osciloscópio} = 3.69\%$

$$\epsilon_{calculado} = 5.68\%$$

# Resultados e discussões: Modulação Temporal

- Cálculo da velocidade por meio da expressão:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t_1} \cdot T_1 \nu$$

- Utilizando  $\nu = 60MHz$

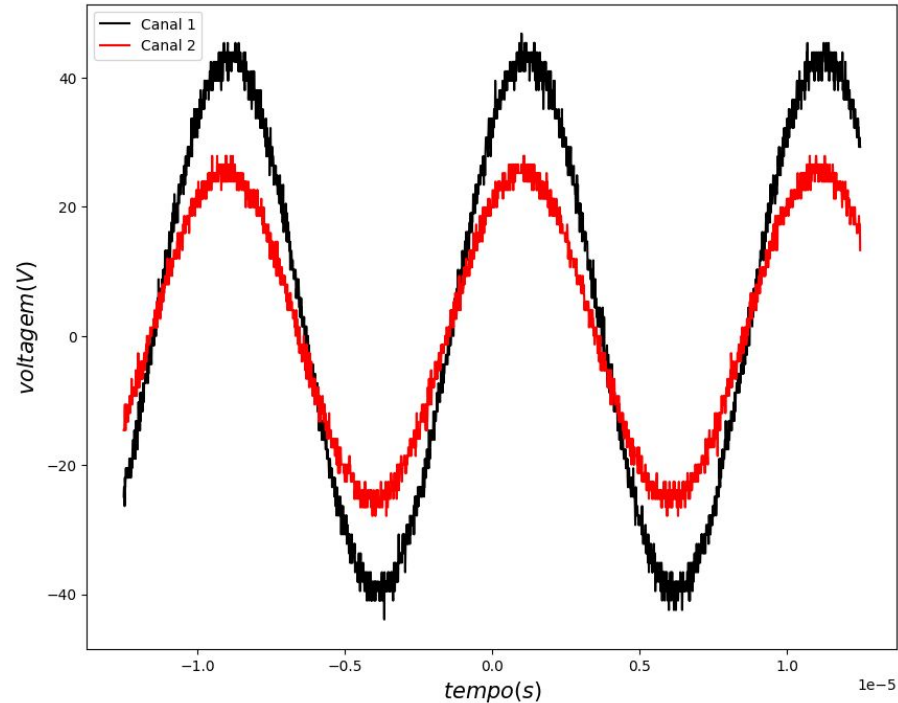
# Resultados e discussões: Modulação Temporal

$$\Delta S = (0.55 \pm 0.01)m$$

$$\Delta t_1 = (0.07 \pm 0.01)\mu s$$

$$T_1 = (10.1 \pm 0.2)\mu s$$

$$v = (3.7 \pm 0.5) \cdot 10^8 (m/s)$$



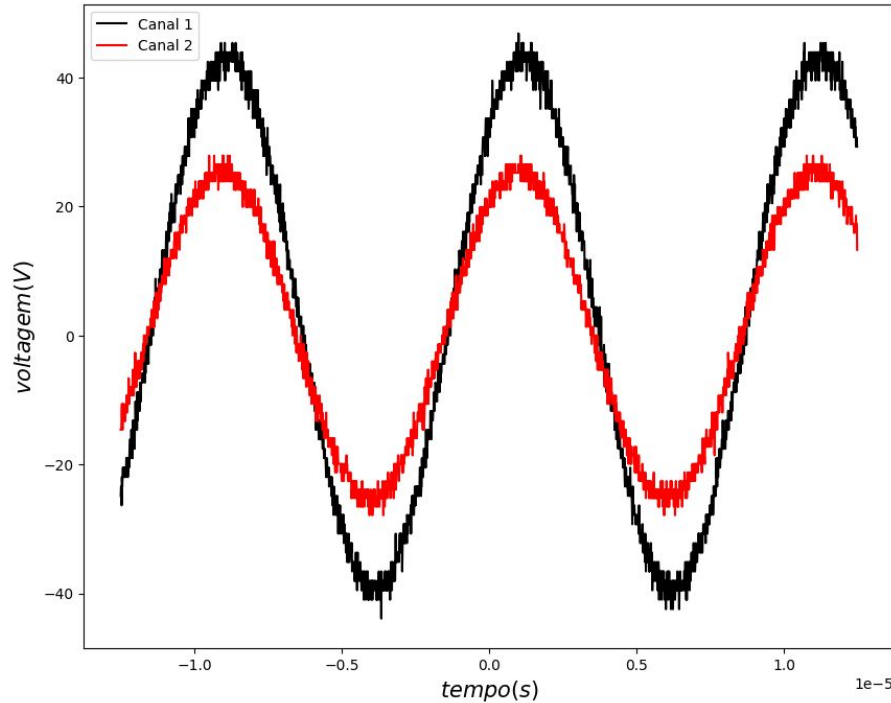
# Resultados e discussões: Modulação Temporal

$$\Delta S = (0.66 \pm 0.01)m$$

$$\Delta t_1 = (0.89 \pm 0.01)\mu s$$

$$T_1 = (10.0 \pm 0.2)\mu s$$

$$v = (4.4 \pm 0.5) \cdot 10^8 (m/s)$$



# Resultados e discussões: Modulação Temporal

- Cálculo da velocidade no meio, a partir da expressão:

$$v_n = \frac{v_0}{1 + \frac{v_0}{d \cdot \nu} \cdot \frac{\Delta t_1}{T_1}}$$

- Cálculo dos índices de refração por meio da expressão:

$$n = 1 + \frac{v_0}{d \cdot \nu} \cdot \frac{\Delta t_1}{T_1}$$



# Resultados e discussões: Modulação Temporal

## ➤ Líquido 1

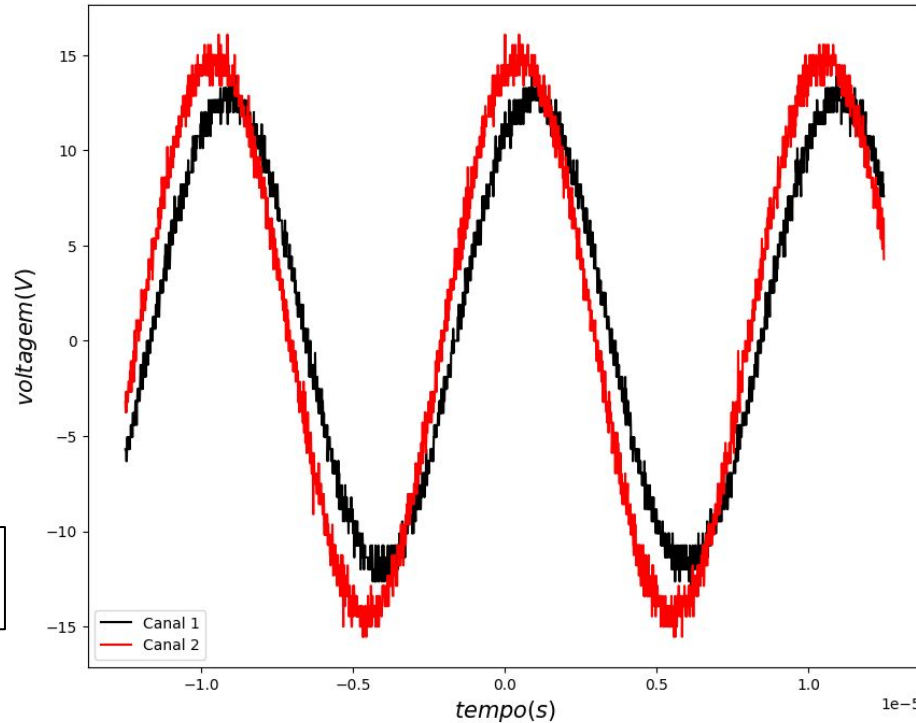
$$d = (0.05 \pm 0.01)m$$

$$\Delta t_1 = (0.13 \pm 0.01)\mu s$$

$$T_1 = (9.8 \pm 0.2)\mu s$$

$$v_1 = (1.3 \pm 0.6) \cdot 10^8 (m/s)$$

$$n_1 = 2.3 \pm 1.2$$



# Resultados e discussões: Modulação Temporal

## ➤ Líquido 2

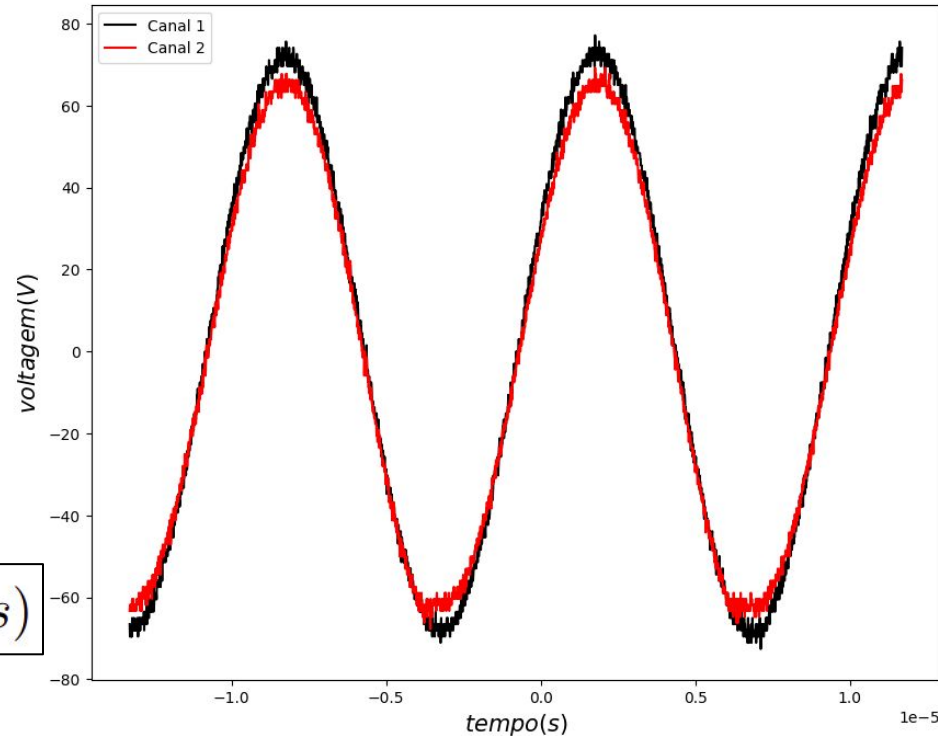
$$d = (0.05 \pm 0.01)m$$

$$\Delta t_1 = (0.14 \pm 0.01)\mu s$$

$$T_1 = (10.0 \pm 0.2)\mu s$$

$$v_2 = (1.2 \pm 0.6) \cdot 10^8 (m/s)$$

$$n_2 = 2.4 \pm 1$$





# Resultados e discussões: Modulação Temporal

## ➤ Sólido 1

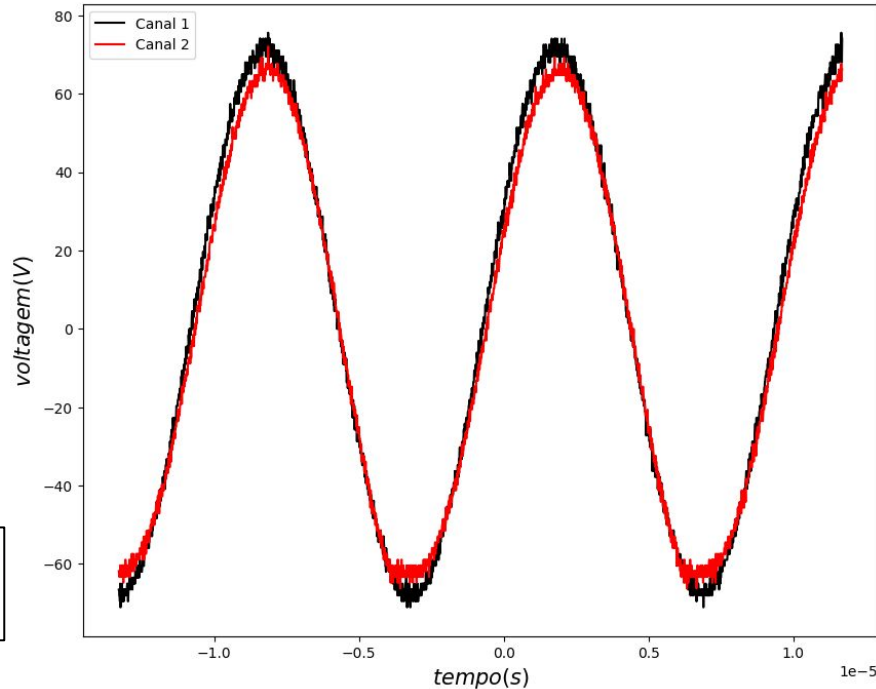
$$d = (0.05 \pm 0.01)m$$

$$\Delta t_1 = (0.10 \pm 0.01)\mu s$$

$$T_1 = (9.8 \pm 0.2)\mu s$$

$$v_3 = (1.5 \pm 0.8) \cdot 10^8 (m/s)$$

$$n_3 = 2 \pm 1.2$$



# Resultados e discussões: Modulação Temporal

## ➤ Sólido 2

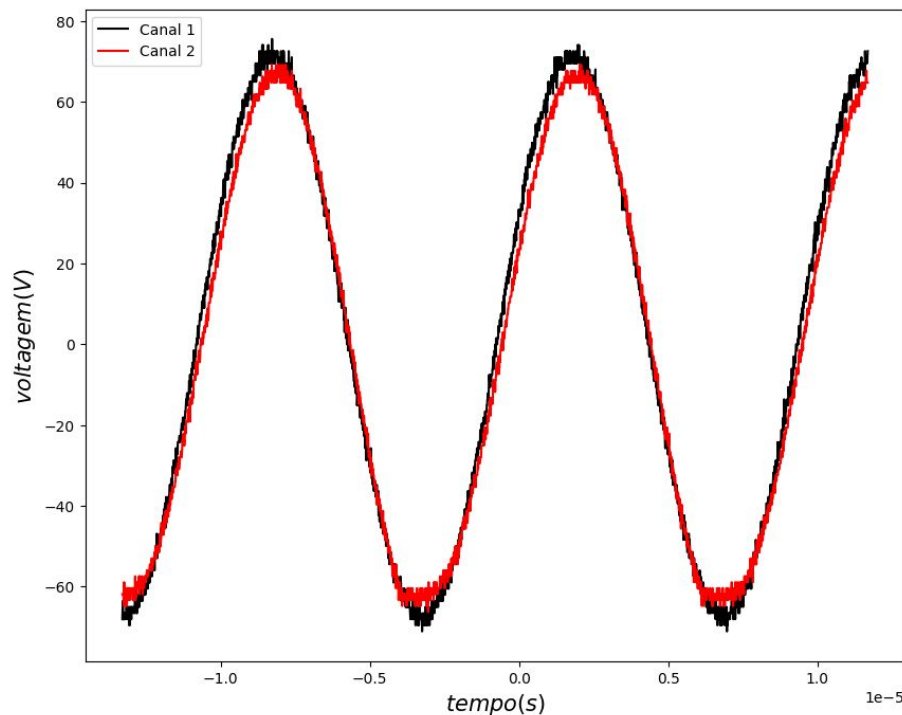
$$d = (0.05 \pm 0.01)m$$

$$\Delta t_1 = (0.07 \pm 0.01)\mu s$$

$$T_1 = (10.3 \pm 0.2)\mu s$$

$$v_4 = (1.8 \pm 0.9) \cdot 10^8 (m/s)$$

$$n_4 = 1.68 \pm 1.3$$



# Resultados e discussões: Modulação Temporal

Material	$\Delta t_1$ ( $10^{-6}$ s)	$T_1$ ( $10^{-6}$ s)	n	$c_n$ ( $10^8$ m/s)
Líquido 1	$0.13 \pm 0.01$	$9.8 \pm 0.2$	$2.3 \pm 1.2$	$1.3 \pm 0.6$
Líquido 2	$0.14 \pm 0.01$	$10.0 \pm 0.2$	$2.4 \pm 1$	$1.2 \pm 0.6$
Sólido 1	$0.10 \pm 0.01$	$9.8 \pm 0.2$	$2 \pm 1.2$	$1.5 \pm 0.8$
Sólido 2	$0.07 \pm 0.01$	$10.3 \pm 0.2$	$1.7 \pm 1.3$	$1.8 \pm 0.9$

# Comparação entre experimentos

<b>C<sub>espelho</sub> (<math>10^8</math> m/s)</b>	<b>c<sub>pulsos</sub> (<math>10^8</math> m/s)</b>	<b>c<sub>mod</sub> (<math>10^8</math> m/s)</b>	<b>c<sub>materiais</sub> (<math>10^8</math> m/s)</b>
<b><math>3.7 \pm 0.2</math></b>	<b><math>2.60 \pm 0.39</math></b>	<b><math>3.7 \pm 0.5</math></b>	<b><math>1.3 \pm 0.5</math></b>
<b><math>3.9 \pm 1.6</math></b>	<b><math>2.74 \pm 0.43</math></b>	<b><math>4.4 \pm 0.5</math></b>	<b><math>1.2 \pm 0.6</math></b>
<b>-</b>	<b><math>2.89 \pm 0.07</math></b>	<b>-</b>	<b><math>1.5 \pm 0.8</math></b>
<b>-</b>	<b><math>2.83 \pm 0.08</math></b>	<b>-</b>	<b><math>1.8 \pm 0.9</math></b>