
MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DA LUZ

em diferentes materiais homogêneos e isotrópicos

1 Introdução

Em muitas das experiências descritas na literatura para determinação da velocidade da luz foram utilizados feixes luminosos pulsados (ou modulados), que percorrem determinados trajetos de maior ou menor comprimento (um exemplo é a Fig. 1). No presente trabalho, utiliza-se como fonte luminosa um díodo (LED) que emite radiação visível com um comprimento de onda (c.d.o.) na zona do vermelho. A intensidade da luz emitida pelo díodo, $I_{\text{díodo}}(t)$, é *modulada em amplitude* (AM, do inglês *amplitude modulation*), através da aplicação de uma tensão de alimentação sinusoidal de frequência $f_{\text{mod}} = 50 \text{ MHz}$, de acordo com a expressão

$$I_{\text{díodo}}(t) = A_0(1 + \sin(2\pi \cdot 50 \times 10^6 t))/2$$

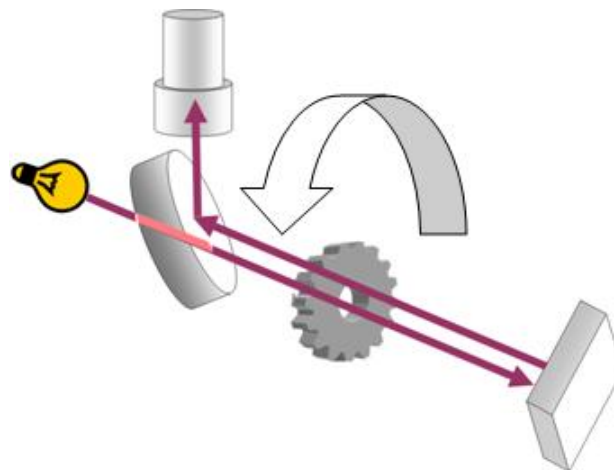


Figura 1: Esquema do aparelho (Roda de Fizeau) para determinar a velocidade da luz utilizado por Fizeau em 1849.

2 Base do Método

No presente trabalho, o feixe luminoso proveniente do LED emissor é forçado a percorrer um determinado trajeto de comprimento L , sendo em seguida a sua intensidade detetada por um fotodíodo receptor (Fig. 2). O sistema solidário de espelhos E_1, E_2 pode deslocar-se ao longo de uma calha graduada, sendo assim possível variar o comprimento do trajeto. Os sinais de amplitude impostos ao emissor e captados no receptor são registados¹ nos canais de um osciloscópio funcionando em modo “XY” (sem base de tempo).

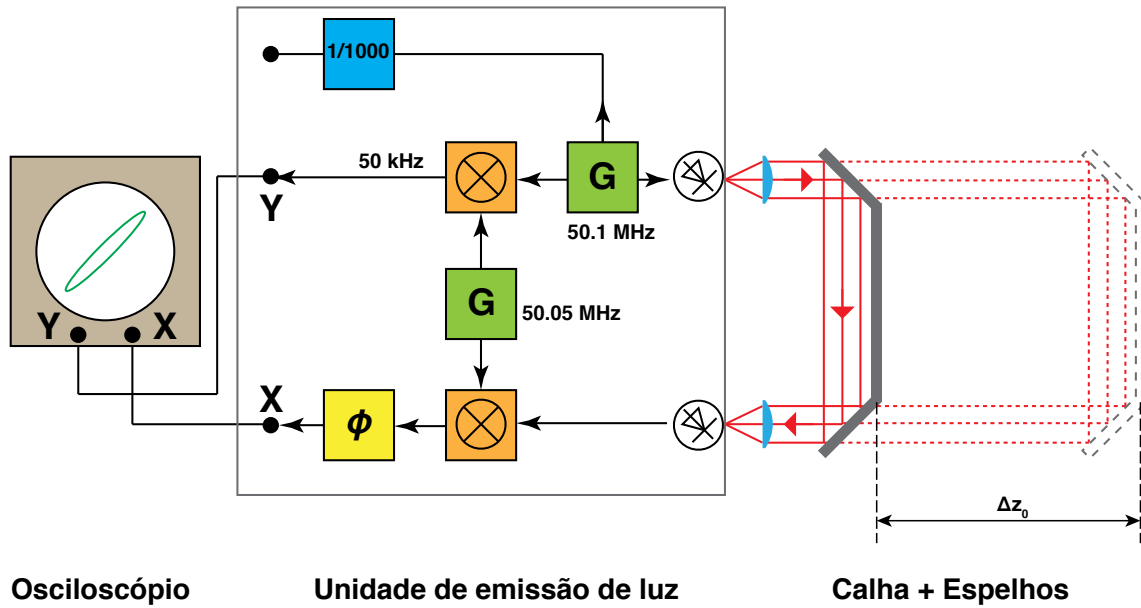


Figura 2: Montagem para determinação da velocidade da luz.

Em ambos os canais X e Y (vertical e horizontal) a frequência é a mesma². No caso mais geral em que os sinais não estão em fase um com o outro, o padrão visualizado no osciloscópio é uma *figura de Lissajous*, neste caso uma elipse (Fig. 3), com um parâmetro δ dado pela equação geral:

$$\sin^2 \delta = \frac{A_x^2}{A_{x0}^2} + \frac{A_y^2}{A_{y0}^2} - \frac{2A_y A_x}{A_{y0} A_{x0}} \cos \delta \quad (1)$$

sendo $A_x(t)$ o sinal de intensidade captado no emissor, $A_y(t)$ o sinal proveniente do recetor, A_{x0} , A_{y0} as respectivas amplitudes e δ a desfasagem entre os dois sinais. A desfasagem relativa entre os sinais (e, logo, o ângulo δ) varia com o comprimento do trajeto L percorrido pelo raio luminoso. Este efeito traduz-se numa variação da forma da elipse observada. A elipse pode degenerar em retas quando os dois sinais estiverem em fase, $\delta = 2n\pi$ (nos quadrantes ímpares) ou em oposição de fase, $\delta = (2n + 1)\pi$ (nos quadrantes pares).

¹Depois de uma deteção *heteródina*, em que a frequência modulada é desviada de $f_{\text{bat}} = 50.050 \text{ MHz} - 50 \text{ MHz} = 50 \text{ kHz}$. Esta operação permite a utilização de um osciloscópio simples de banda de frequências mais estreita.

²Os sinais são *coerentes*, pois provêm da mesma fonte.

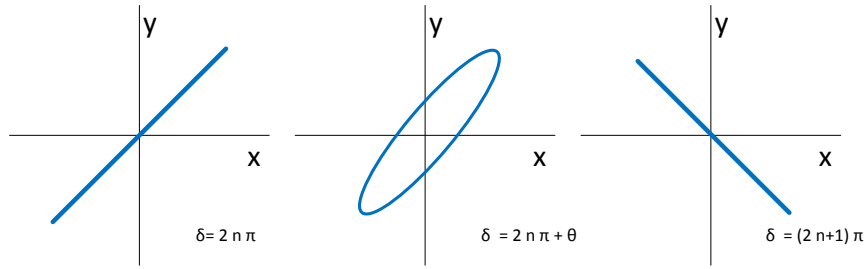


Figura 3: Figuras de Lissajous observadas no osciloscópio. À esquerda: sinais em fase; centro: sinais com uma dada defasagem θ ; direita: sinais em oposição de fase.

2.1 Velocidade da luz no ar

Neste trabalho, a velocidade da luz é calculada a partir da determinação do comprimento do caminho suplementar $\Delta L = 2 \Delta z_0$ (ver fig. 2) que a luz tem de percorrer para que se passe de uma situação em que os sinais estão em fase à situação contígua de oposição de fase (ou vice-versa). Por definição, para passar de uma situação à outra é necessário que o tempo gasto no percurso suplementar corresponda a metade de um período. Assim, a luz percorre essa distância num intervalo de tempo Δt igual a metade do período do sinal modulante, ou seja $\Delta t = T/2 = 1/(2 \cdot 50 \text{ MHz}) = 10 \text{ ns}$. No trajecto da luz no ar teremos a seguinte expressão para a sua velocidade:

$$c_{ar} = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{2 \Delta z_0}{T/2} \quad (2)$$

2.2 Velocidade da luz em meios sólidos e líquidos

O índice de refração de um meio material 1 em relação a outro meio 0, para um dado comprimento de onda, é definido³ como o quociente entre as velocidades de propagação da luz nos meios 0 e 1:

$$n_1 \equiv \frac{c_0}{c_1} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}}{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \quad (3)$$

Nesta expressão $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \mu_0, \mu_1$ são as constantes dielétricas e as permeabilidades magnéticas respetivamente do meios 0 e 1 e ε_r, μ_r as relativas ($\varepsilon_1 = \varepsilon_r \varepsilon_0$).

Se no percurso do feixe luminoso interpuermos um bloco transparente de material sólido ou líquido de comprimento l_B (Fig. 4), o comprimento suplementar necessário ΔL entre as posições de fase e oposição de fase vai variar. De facto, uma vez que as velocidades da luz nesse material e no ar são diferentes, a defasagem introduzida por uma dada espessura de material também difere da defasagem causada pela mesma espessura de ar.

³Esta definição só é válida se as condutividades elétricas dos meios 0 e 1 forem nulas, ou seja, nos *dielétricos* perfeitos.

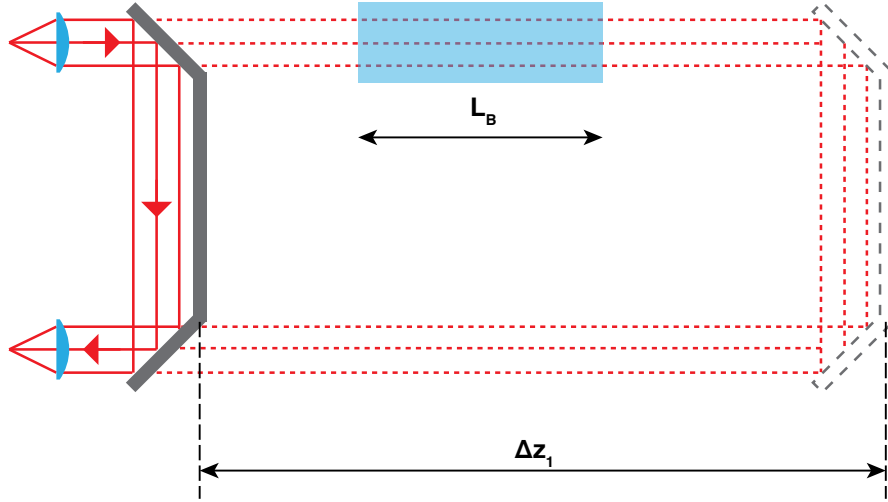


Figura 4: Montagem para determinar índices de refração em sólidos e líquidos.

É pois necessário contabilizar em separado o tempo necessário para percorrer o bloco de espessura l_B à velocidade c_B e o restante comprimento de ar à velocidade c_{ar} , obtendo-se a expressão

$$T/2 = \frac{2 \Delta z_1 - l_B}{c_{ar}} + \frac{l_B}{c_B} \quad (4)$$

em que Δz_1 é a nova posição em que se regista passagem de fase para oposição de fase (ou vice-versa). A partir daqui calcula-se a velocidade c_B .

Pode ainda obter-se o valor do índice de refração n_B com a ajuda de (2) e (3):

$$\begin{aligned} T/2 &= \frac{2 \Delta z_0}{c_{ar}} = \frac{2 \Delta z_1}{c_{ar}} - \frac{l_B}{c_{ar}} + \frac{l_B}{c_B} \\ \frac{2 (\Delta z_0 - \Delta z_1)}{c_{ar}} &= -\frac{l_B}{c_{ar}} + \frac{l_B}{c_B} \\ \frac{2 (\Delta z_0 - \Delta z_1)}{l_B} &= -1 + \frac{c_{ar}}{c_B} \\ n_B &= 1 + \frac{2 (\Delta z_0 - \Delta z_1)}{l_B} \end{aligned} \quad (5)$$

Neste trabalho, serão determinados os índices de refração e a velocidade da luz em dois meios materiais, a resina acrílica e a água.

3 Protocolo Experimental

3.1 Material utilizado

1. Unidade de emissão de luz (com amplitude modulada por um sinal de frequência 50 MHz) e de recepção.
2. Duas lentes plano-esféricas.
3. Conjunto de dois espelhos planos para inversão do sentido de propagação da luz.
4. Calha graduada.
5. Bloco de vidro acrílico transparente.
6. Dois tubos com cerca de 1 metro de comprimento para conter água ou ar.
7. Osciloscópio de dois canais a funcionar em modo XY.

3.2 Procedimento Experimental

3.2.1 Regulação da montagem

1. Comece por verificar se a montagem óptica está devidamente alinhada. Retire ambas as lentes da montagem. Posicione e ajuste a lente junto ao LED emissor e, usando um alvo difusor (papel vegetal, por exemplo), observe a forma da mancha luminosa ao longo do percurso óptico, de modo a tentar obter um diâmetro constante (feixe de raios paralelos, ou colimado).
2. Instale o conjunto de espelhos, assegurando-se de que o feixe incide em ambas as superfícies espelhadas. Verifique que enviam o feixe de volta correctamente. Ainda sem a segunda lente, verifique que a mancha luminosa está centrada com a janela do díodo receptor.
3. Coloque agora a lente no lado do díodo receptor e, ajustando-a, alinhe o foco do feixe convergente no seu centro.
4. Ajuste os parafusos dos espelhos de forma a maximizar a amplitude do sinal recebido.
5. Coloque os espelhos na posição zero (posição $z_{\delta=0}$) da escala. Rodando o botão da unidade que ajusta electronicamente a diferença de fase entre os dois sinais, obtenha uma reta dos quadrantes (ím)pares.

3.2.2 Velocidade de propagação da luz no ar

1. Desloque os espelhos sobre a calha e observe a modificação da figura no ecrã do osciloscópio, em particular nas posições que correspondem a que os sinais recebidos estejam desfasados de $\delta = \pi/2$ (quadratura) e em oposição de fase, $\delta = \pi$. Para esta última situação, registe a nova posição $z_{\delta=\pi}$ dos espelhos e o intervalo de incerteza entre o qual os sinais parecem estar ainda em oposição de fase.
2. Repita o procedimento para cada observador.
3. Calcule a velocidade de propagação da luz no ar c_{ar} , a sua incerteza e o desvio à exatidão⁴.

⁴O valor c_{ar} é muito próximo de $c_{vacuo} = 299\,792\,458$ m/s, que é uma constante exacta do Sistema Internacional de Medidas. O índice de refração do ar para a luz visível é $n_{ar} = 1.000293$.

3.2.3 Velocidade de propagação da luz no vidro acrílico

1. Verifique novamente se no zero da posição dos espelhos os sinais estão em fase. Coloque o bloco de vidro acrílico no percurso do feixe incidente, de modo a que incida perpendicularmente à face e usando o percurso mais longo no vidro acrílico.
2. Meça a posição $z_{\delta=\pi}$ e a incerteza correspondente dos espelhos para que os dois sinais detetados estejam em oposição em fase.
3. Repita a medição pelo menos duas vezes.
4. Calcule o índice de refração obtido para o vidro acrílico, n_{vidro} , pela expressão (5), e a sua incerteza.
5. Calcule o valor da velocidade da luz no vidro, c_{vidro} .

3.2.4 Velocidade de propagação da luz na água

1. Verifique a fase na posição inicial. Coloque o tubo vazio nos suportes de modo a que o feixe incidente entre perpendicularmente à face. Pode desmontar o tubo com ar para medir o comprimento interno do trajeto no ar/água.
2. Registe a posição dos espelhos $z_{\delta=\pi}^{\text{tubo}}$ que produz um sinal em oposição de fase.
3. Repita a medição para o tubo cheio de água e obtenha o valor correspondente $z_{\delta=\pi}^{\text{água}}$.
4. Calcule o valor do índice de refração $n_{\text{água}}$ obtido, a sua incerteza e o desvio à exatidão⁵.
5. Comente a precisão do valor da velocidade de propagação da luz obtida nos diferentes meios.

⁵O valor tabelado é $n_{\text{água}} = 1.3330$.