

Trabalho 9 - Medidas Ópticas e propriedades da Luz

Sérgio Quelhas Ferreira de Sousa

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

25 de Outubro de 2023

Resumo

Neste trabalho determinamos o efeito de elementos óticos na polarização da luz, como, por exemplo, polarizadores e lâminas retardadoras. Numa segunda parte da atividade, foi possível obter a velocidade da luz no ar com 1,3% de incerteza e 3,2% de erro, bem como no acrílico, com uma incerteza de 8,6% e um erro de 12 %.

1 Objetivos.

- Estudar o efeitos do polarizador e da lâmina retardadora num feixe luminoso;
- Aprofundar os conceitos de polarização da luz, em especial polarização linear, circular e elíptica;
- Determinar a velocidade da luz no ar e no acrílico, utilizando técnicas avançadas de processamento de sinal.

2 Introdução.

2.1 Parte 1 : Estudo da Polarização da Luz

A luz, tal como o som, tem um comportamento ondulatório, sendo por isso propagada na forma de ondas luminosas. Estas ondas são constituídas por 2 campos, o campo elétrico e um campo perpendicular ao mesmo, o campo magnético.

A polarização está relacionada com a forma como o vetor campo elétrico se propaga. Se o vetor campo elétrico propaga-se sempre na mesma direção, a luz encontra-se polarizada linearmente. No caso de o vetor campo elétrico se propagar centrado num eixo e a sua intensidade variar, obtemos propagação elíptica. Para o caso anterior, mas para uma intensidade do campo elétrico constante, obtemos polarização circular. [1]

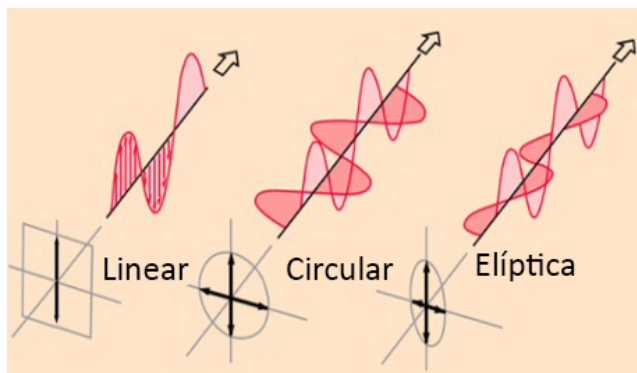


Figura 1: Tipos de Polarização

A lâmina de $\lambda/4$, também conhecida como retardador de $\lambda/4$, é um dispositivo ótico que modifica o estado de polarização da luz sem atenuar, desviar ou deslocar o feixe. Ela faz isso atrasando uma componente de polarização em relação à sua componente ortogonal, criando uma fase relativa entre essas componentes. Isto acontece porque, tal como sabemos, a luz propaga-se a uma velocidade proporcional a $1/n$ ($v = \frac{c}{n}$ e, como a lâmina possui diferentes índices de refração para o eixo vertical e horizontal, é possível observar uma diferente velocidade do feixe nos diferentes eixos. Isto leva a um diferente intervalo de tempo para a mesma distância (espessura da lâmina), gerando essa fase, que se mantém constante ao longo do tempo e do feixe.

Assim, podemos utilizar esta lâmina para converter uma onda linearmente polarizada numa com polarização elíptica e, em último caso, circular.

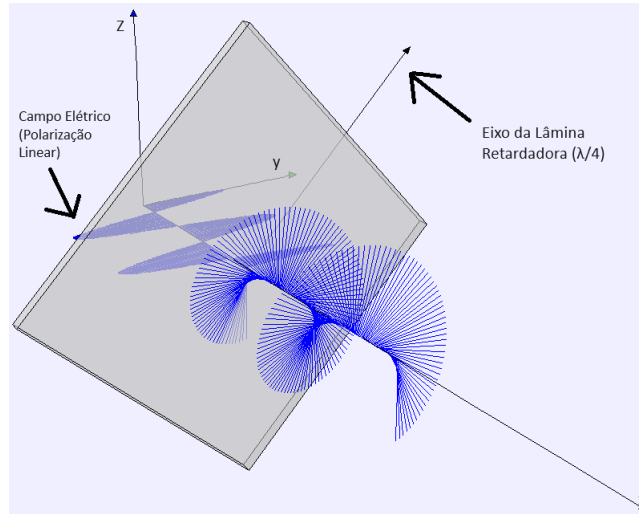


Figura 2: Simulação da polarização gerada através da passagem de um feixe com polarização numa lâmina retardadora ($\lambda/4$) com inclinação de 45° ($\frac{\pi}{2}$) [2]

Vamos agora introduzir uma expressão que nos indicará se o trabalho que vamos realizar está a acontecer de acordo com o esperado. A lei de Malus indica que a intensidade da luz transmitida depende da orientação relativa entre a direção de polarização e o eixo de polarização do filtro (polarizador) e é descrita pela seguinte equação:

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2(\theta_P - \theta_A) \quad (1)$$

, [3] onde I é a intensidade da luz incidente para um dado valor do ângulo do polarizador (luz, θ_P) e do analisador (filtro θ_A) e I_0 corresponde ao valor máximo de intensidade.

Podemos avaliar a potência emitida após atravessar uma lente retardadora com a expressão derivada em [4], que se encontra de seguida:

$$P_a = \frac{P_0}{2} [\cos^2(\theta_A - \theta_P) + \cos^2(2(\theta_L - \theta_P) - \theta_A - \theta_P)] \quad (2)$$

2.2 Parte 2: Determinação da velocidade da luz no ar e no acrílico

Para esta parte da atividade experimental vamos tentar determinar a velocidade da luz no ar e no acrílico. O método experimental que vamos utilizar consiste na determinação da diferença de fase entre um feixe que percorre uma determinada distância e o feixe inicial.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \left(2\pi f_m t - \frac{2\pi}{\Lambda} z_2 + \phi_2\right) - \left(2\pi f_m t - \frac{2\pi}{\Lambda} z_1 + \phi_1\right) \\ &= \frac{2\pi}{\Lambda} (z_2 - z_1) \\ &= \frac{2\pi f_m}{c} L \end{aligned} \quad (3)$$

, onde Λ corresponde à distância entre dois máximos consecutivos de potência ótica ($\Lambda = \frac{c}{f_m}$) e L corresponde à distância percorrida pelo feixe ($z_2 - z_1 = L$).

Para que consigamos medir o valor da diferença de fase iremos utilizar um circuito que, de um modo geral, amplia a frequência do sinal, de modo a que a diferença de fase obtida seja possível medir. O circuito que gera os sinal é o seguinte:

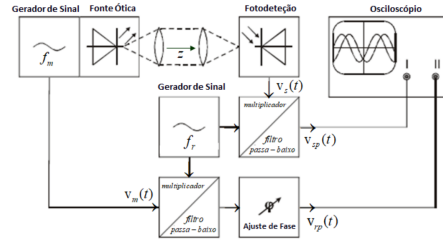


Figura 3: Esquema da configuração utilizada e condicionamento de sinal para determinar a velocidade da luz [4]

Para este circuito vamos obter dois sinais, ambos com frequências iguais ($f_m - f_r$). Assim, utilizando a Equação 3 obtemos a seguinte expressão que nos permite determinar a velocidade da luz.

$$2\pi \frac{\Delta t_{osc}}{T_{(f_m - f_r)}} = \frac{2\pi f_m}{c} L \quad (4)$$
$$\Delta t_{osc} = \frac{f_m T_{(f_m - f_r)}}{c} L$$

Iremos utilizar um pensamento idêntico para identificar o índice de refração no acrílico e, por sua vez, determinar a velocidade da luz no acrílico.

$$n_{acrílico} = 1 + \frac{(\Delta t_{osc|ar+acrílico} - \Delta t_{osc|ar})c}{f_m T_{(f_m - f_r)} L_{acrílico}} \quad (5)$$

3 Preparação Experimental.

3.1 Material

- Banco ótico;
- Fonte ótica (laser semiconductor emitindo no vermelho);
- Bloco de fotodeteção, constituído por um detetor de silício montado num circuito eletrónico que permite um ganho de amplificação variável selecionável por botão;
- Osciloscópio digital;
- Cabos de ligação com terminação BNC;
- Chopper e caixa de controlo que permite variar a frequência de rotação do disco;
- Dois polarizadores montados num suporte rotativo e provido de escala graduada;
- Lâmina retardadora de material birrefringente.

3.2 Método experimental.

3.2.1 Parte 1 : Estudo da Polarização da Luz

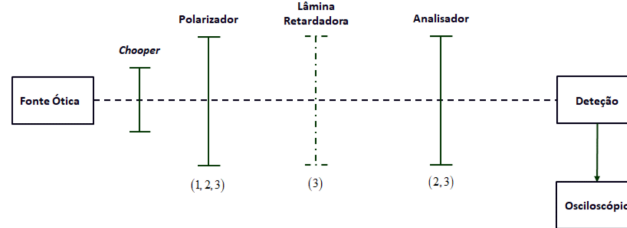


Figura 4: Montagem Experimental

1. Implementamos a montagem da Figura 4, escolhendo 335Hz para a frequência do chopper ($f_{chopper}$);
2. Utilizando apenas o polarizador, rodamos este registrando os valores correspondentes para cada ângulo do polarizador (θ_a);
3. Colocamos o polarizador na posição para o qual a potência é máxima (V_{ppmax}).
4. Considerando o zero do ângulo do analisador (θ_p) na posição da potência máxima (V_{ppmax}), registar os valores de potência e ângulo para intervalos de 10 graus ($\Delta\theta_p = 10^\circ$).
5. Trocamos a posição do analisador para a qual a potência é mínima ($\theta_a = 90^\circ$);
6. Colocamos a lâmina de $\lambda/4$, identificando a posição para a qual a polarização é circular (o formato no osciloscópio é independente do ângulo do analisador) [aproximadamente 45°].
7. Colocamos o valor da lâmina retardadora em $\theta_l = \theta_{lmax} \pm 20^\circ$ e registamos os valores de θ_l e V_{pp} .

3.2.2 Parte 2: Determinação da velocidade da luz no ar e no acrílico

1. Ligando diretamente ao osciloscópio o cabo axial conectado no ponto a, determinar a frequência de modulação (f_m);
2. Observando no osciloscópio o sinal da saída (b ou c), determinar $f = f_m - f_r$ e $T_{(f_m - f_r)}$;
3. Colocamos a fonte de luz próximo da unidade de controlo e sincronizamos os sinais visualizados.
4. Deslocamos a fonte de luz em intervalos de 20 cm numa extensão de 2 metros e registamos os valores de separação temporal das ondas (Δt_{osc}).

4 Resultados Experimentais e Discussão.

4.1 Parte 1 : Estudo da Polarização da Luz

Após realizarmos a montagem experimental, observamos que o osciloscópio descrevia uma onda quadrada e que a intensidade do

Numa primeira fase da atividade, realizamos medições apenas com o polarizador tal como pretendido. Conseguimos obter os dados que se encontram nos Anexos. De seguida realizamos o gráfico que melhor representa os valores obtidos.

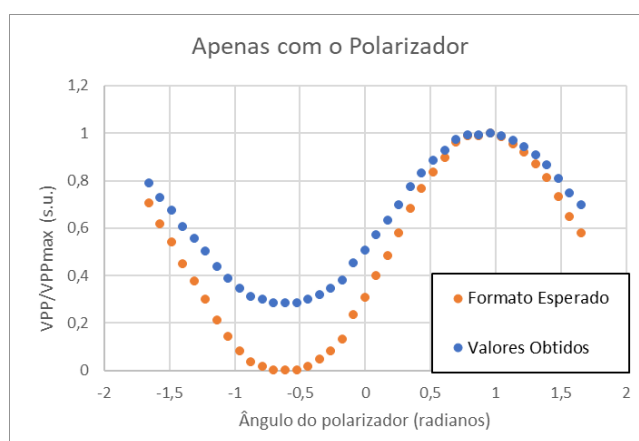


Figura 5: Gráfico de V_{pp}/V_{ppmax} em função do Ângulo do Polarizador

Neste gráfico é possível observar que os valores de V_{pp} variam de acordo com o ângulo do polarizador. Isto indica que a polarização será aproximadamente linear, visto que possui um máximo em 55° e um mínimo em -35° (a exatamente 90° do máximo, tal como esperado). No entanto, visto que o mínimo se encontra ainda afastado do zero, sabemos que o laser não se encontra perfeitamente linearmente polarizado. Isto acontece porque sabemos que não existe valor de campo elétrico ortogonal ao seu máximo, pois a projeção sobre este eixo é 0.

Vamos então determinar o quão polarizada está a luz, calculando o seu grau de polarização que consiste no quociente entre a diferença e a soma do valor máximo e mínimo de Intensidade. Obtivemos um grau de polarização de 56%, que parece um valor adequado face à discrepância visível na Figura 5.

De seguida, adicionamos o analisador (um segundo polarizador), colocando o primeiro na sua posição máxima (55°) de modo a permitir passar o máximo de intensidade luminosa polarizada linearmente 55° . Comparemos os valores

obtidos com os valores propostos pela Lei de Malus (Equação 1), através da observação do seguinte gráfico:

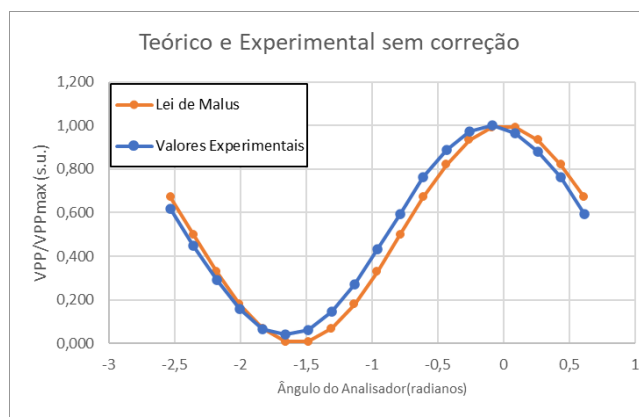


Figura 6: Gráfico de V_{pp}/V_{ppmax} em função do Ângulo do Analisador

É possível observar que existe uma espécie de fase entre os valores teóricos e experimentais. Deste modo, decidimos calcular o valor de R^2 entre os gráficos tendo se obtido $R^2 = 0.97$. Isto pode dever-se a um mau alinhamento do sistema e/ou a uma errada medição dos ângulos em causa. Fazendo uma correção de -5° obtemos um resultado melhor, tendo se obtido um $R^2 = 0.9995$, que pode ser observado no gráfico seguinte:

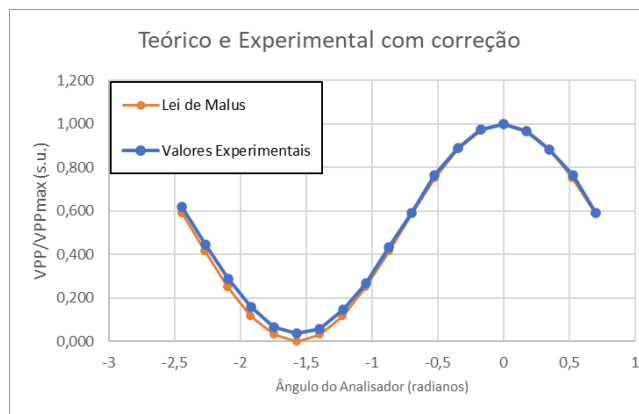


Figura 7: Gráfico de V_{pp}/V_{ppmax} em função do Ângulo do Analisador com correção de -5°

Com esta correção conseguimos observar um máximo para $\delta\theta = 45^\circ$ tal como era esperado pela Equação 1.

De seguida colocamos a lente retardadora $\lambda/4$ e observamos novamente o comportamento do V_{pp} em função do ângulo do analisador. De acordo com o procedimento experimental, determinamos os ângulos do polarizador (-8°) e da lâmina (83° 1ª análise / 43° 2ª análise). Aproveitamos para comparar os valores de potência normalizados para verificar que seguem o mesmo comportamento como é esperado. Obtivemos os seguintes valores:

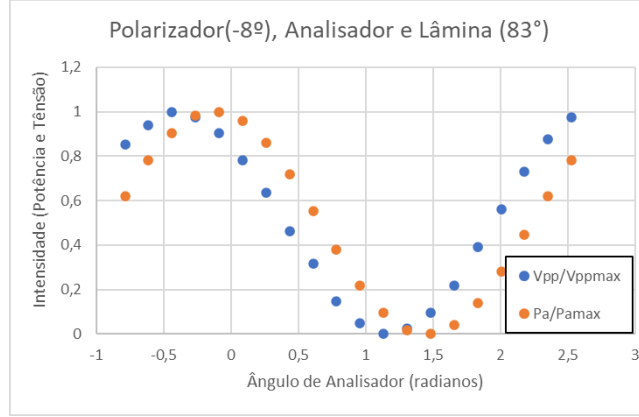


Figura 8: Gráfico de V_{pp}/V_{ppmax} em função do Ângulo do Analisador, $\theta_A = -8^\circ$, $\theta_L = 83^\circ$

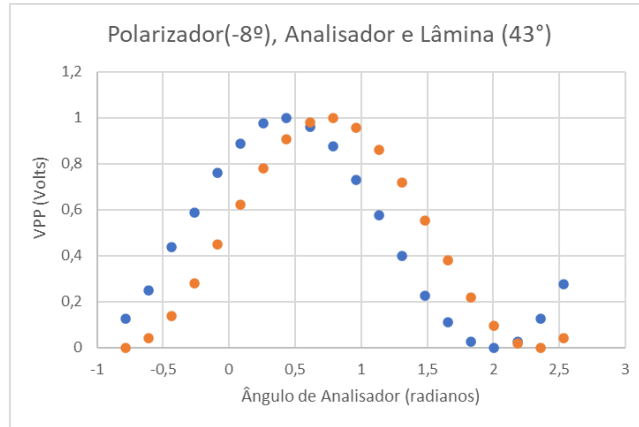


Figura 9: Gráfico de V_{pp}/V_{ppmax} em função do Ângulo do Analisador, $\theta_A = -8^\circ$, $\theta_L = 43^\circ$

Nestes gráficos é possível concluir que existe um desvio entre o valor pretendido e o valor obtido. O problema pode se encontrar em erros de determinar θ_P e θ_L corretos para o efeito desejado. No entanto, através desta análise conse-

guimos obter algo interessante, que se encontra presente no gráfico seguinte:

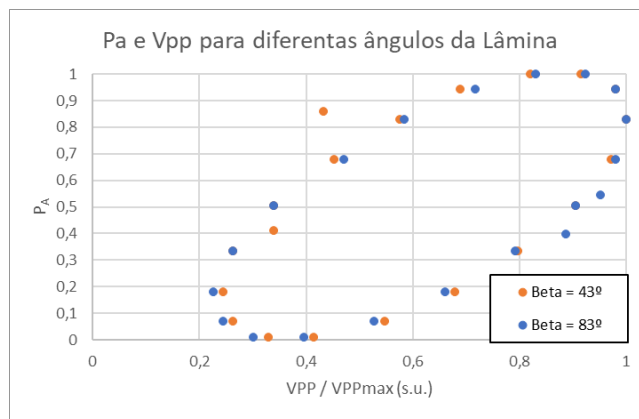


Figura 10: Gráfico de P_a/P_{amax} em função de V_{pp}/V_{ppmax} para os dois valores de θ_L

Conseguimos observar que apesar de existir um pequeno desvio entre as duas séries, o ângulo que pretendíamos está perto de ser o indicado pois para a mesma distância (20°) de β em direções diferentes, observamos um comportamento idêntico.

4.2 Parte 2: Determinação da velocidade da luz no ar e no acrílico

Vamos então determinar o tempo de atraso e verificar a sua relação com a distância percorrida. Deste modo iremos obter o valor da velocidade da luz pela Equação 4.

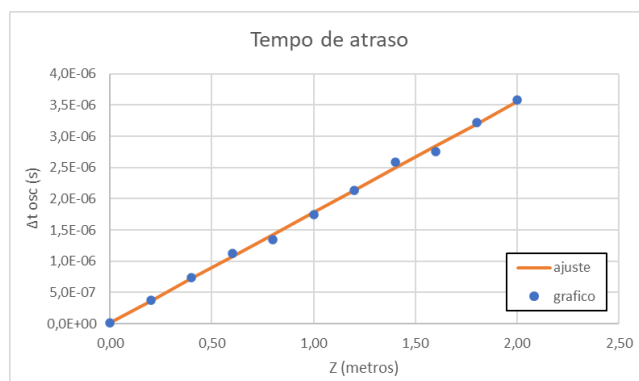


Figura 11: Gráfico do Tempo de atraso em função da distância

Obtivemos assim o valor de velocidade da luz : $(c = 2,997 \pm 0,177) \times 10^8$ m/s, $u(\%) = 5,2\%$ Erro($\%$) = 13,25%, $(c_{ref} = 3,39 \times 10^8$ m/s)

Existe ainda outro método para determinar a velocidade da luz, descrito na Equação 3. Utilizando o gráfico da fase é possível obter um valor que, veremos mais à frente, é mais preciso e exato.

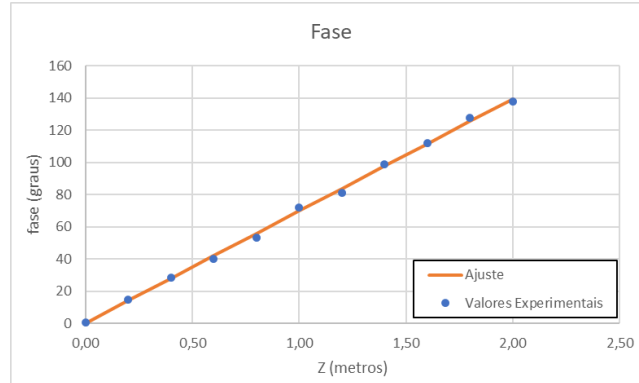


Figura 12: Gráfico da fase em função da distância

Obtivemos assim o valor de velocidade da luz : $(c = 3,1 \times 10^8 \pm 4,2 \times 10^6)$ m/s, $u(\%) = 1,3\%$ Erro($\%$) = 3,2%, $(c_{ref} = 3,39 \times 10^8$ m/s)

Os gráficos de resíduos destes ajustes podem ser encontrados em anexo mas não apresentam quaisquer tendência.

Após repetirmos o processo para o acrílico, e apenas com um valor ($L = 0,05$ m), conseguimos obter, através da Equação 5, o valor do mesmo : $(n_{acrílico} = 1,699 \pm 0,146, u(\%) = 8,6\%$ Erro($\%$) = 14%, $(n_{ref} = 1,49)$. E obtivemos também o valor da velocidade da luz no acrílico. $(c_{acrílico} = 1,8 \times 10^8 \pm 1,5 \times 10^7)$ m/s, $u(\%) = 8,6\%$ Erro($\%$) = 12%, $(c_{ref} = 2,01 \times 10^8$ m/s)

5 Conclusões.

- Foi possível observar e determinar os efeitos de um polarizador e de uma lâmina retardadora num feixe luminoso, em particular no que se trata da sua polarização e potência/intensidade.
- Estudamos e aprofundamos os conceitos pretendidos, em especial os conceitos relacionados com polarização da luz (polarização elíptica, linear e circular)
- Foram possíveis obter os valores de velocidade da luz no ar e no acrílico de diversas formas utilizando as técnicas pretendidas.

6 Referências.

- [1] Polarização. <https://imamagnets.com/pt-pt/blog/polarizacao/>, Consultado a 30/11/2023.
- [2] Quarter wave plate program. <https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=7176>, Consultado a 30/11/2023.
- [3] Malus' law. <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/malus-law>, Consultado a 31/11/2023.
- [4] Docentes responsáveis pela unidade curricular FIS3037. Protocolo experimental da atividade - estudo de processos com decaimento radioactivo, 2023.

7 Anexos.

Considerando a extensão dos dados e o número de gráficos elaborados, optou-se por disponibilizar todos os ficheiros pertinentes para consulta. Estes podem ser acedidos através do seguinte link ou através do QR Code que se segue :
https://drive.google.com/drive/folders/1NVckG3adk4LbokqZqacvBXPjRms_jqkr?usp=sharing

