



Universidade de Brasília

Física Experimental 4

Experimento II

Luz Polarizada e Ângulo de Brewster

17 de Maio de 2013

Professora Nadia Maria de Liz Koche

Alunos:

Juarez A.S.F

11/0032829

Sérgio Fernandes da Silva Reis

11/0140257

Jedhai Pimentel

09/0007883



Conteúdo

1	Objetivos	2
2	Materiais	2
3	Introdução	3
4	Procedimentos	5
5	Dados	7
6	Análise de Dados	10
7	Conclusão	14



1 Objetivos

Este experimento objetiva verificar a lei de Malus, verificar o estado de polarização da luz que passa por uma placa de $\frac{\lambda}{4}$ e determinar aproximadamente o índice de refração de um filtro de vidro.

2 Materiais

Este experimento fez uso de:

- Banco ótico
- Lâmpada fixa em *Housing* contendo lente colimadora
- Fonte de alimentação para lâmpada
- 2 Polarizadores rotativos com marcação em grau[$\pm 0.5^\circ$]
- Placa de um quarto de onda
- Luxímetro digital[$\pm \max(1, 5\% \text{ da medida})$]
- Filtro absorvedor de infravermelho
- Filtro absorvedor de vermelho
- Régua milimetrada[$\pm 0.5 \text{ mm}$]
- espectroscópio com montagem de lâmpada de 6V e filtro de vidro

3 Introdução

Dizemos que uma onda eletromagnética é orientada pelo plano que contem a direção de perturbação do campo elétrico e a direção de propagação da onda. Podemos classificar uma luz ou uma onda eletromagnéticas em geral observando esses planos orientadores para as diversas frentes de onda que compõem o feixe de luz. No caso de serem todos paralelos entre si dizemos que a luz é polarizada, caso contrário ela será não-polarizada. Materiais polarizadores são aqueles que permitem passar apenas ondas com uma dada orientação. A polarização pode se dar de duas formas.

A primeira é a polarização por absorção, ela ocorre quando as moléculas do material estão dispostas de forma a serem capazes de absorver a componente do campo elétrico em uma certa orientação \vec{d} . A direção de polarização \vec{p} é aquela perpendicular à \vec{d} pois somente a componente na direção \vec{p} de uma onda passará pelo material¹. A figura 1a ilustra essa polarização linear. Para sabermos a intensidade de radiação linearmente polarizada na direção \vec{u} que passará por um polarizador devemos achar a componente do campo elétrico na direção \vec{p} . Como a intensidade da radiação I é proporcional ao quadrado do campo elétrico temos a relação:

$$I \propto E_m^2 \rightarrow I = I_m \cos^2 \theta \quad (1)$$

sendo θ o ângulo entre \vec{u} e \vec{p} . A equação 1 é conhecida como a *Lei de Malus*. Um caso interessante desse tipo de polarização ocorre em cristais anisotrópicos.

Nesses materiais a velocidade de propagação de uma onda não é a mesma em todas as direções. Sejam \vec{n}_{max} e \vec{n}_{min} as direções de maior e menor velocidade de propagação respectivamente. Uma onda polarizada em \vec{p} terá suas componentes em ambas as direções \vec{n} aceleradas diferentemente, de forma que a componente em \vec{n}_{max} se adianta em relação a componente em \vec{n}_{min} . No caso da espessura do material ser suficiente para que esse avanço seja de um quarto do comprimento de onda original as duas ondas estarão defasadas de 90° . Uma placa com essa propriedade é chamada de placa de $\frac{\lambda}{4}$. As componentes nas direções \vec{n}_{max} e \vec{n}_{min} nessa situação podem ser descritas por:

$$\begin{aligned} E_{\vec{n}_{max}} &= E_1 \cos(\omega t + \pi/2) \\ E_{\vec{n}_{min}} &= E_2 \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (2)$$

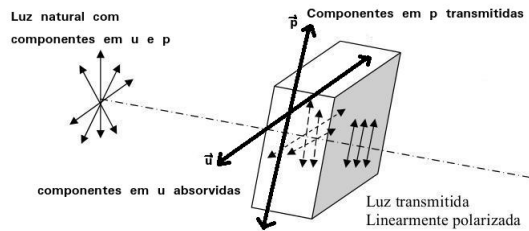
Se $E_1 = E_2$ diremos que a onda foi circularmente polarizada e caso contrário, elipticamente polarizada. A figura (1b) ilustra a decomposição da onda após a placa de $\frac{\lambda}{4}$ para o caso circular. Os eixos de max e min estão indicados e vemos também o campo soma das duas componentes.

¹ \vec{d} de absorção e \vec{p} de polarização

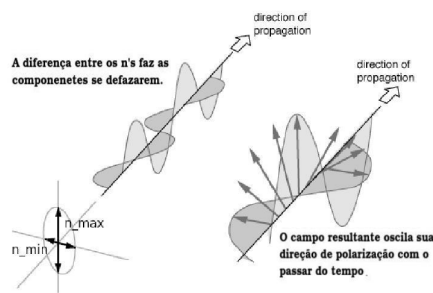
Outro processo de polarização ocorre por reflexão. Quando uma luz não-polarizada atinge uma superfície refletora existe reflexão preferencial das ondas cujo campo elétrico oscila perpendicularmente ao plano de incidência (plano que contém o raio incidente, o refletido e a normal à superfície). Em geral o campo elétrico refletido é não polarizado e possui componentes paralelas e normais ao plano de incidência. Existe um ângulo φ no entanto no qual a luz refletida é completamente polarizada na direção perpendicular ao plano de incidência, este é conhecido como *ângulo de Brewster*. Uma propriedade interessante é que quando ocorre da luz refletida ser linearmente polarizada o ângulo entre o raio refletido e o refratado é de 90° . A figura (1c) ilustra o fato. Usando a lei de Snell para um raio que viaja em meio de índice de refração n_1 e incide em outro de índice n_2 é possível obter:

$$\tan \varphi = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

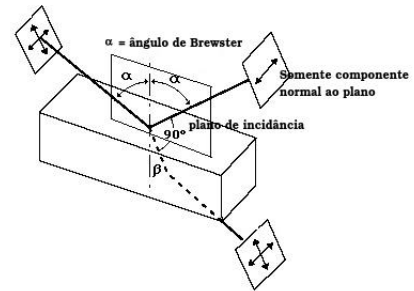
Conhecendo o índice de refração n_1 do meio essa relação pode ser usada para determinar o índice de refração n_2 do material. Basta procurar pelo ângulo φ de incidência que produz um raio refletido totalmente polarizado.



(a) Polarização linear



(b) Polarização circular



(c) Polarização por reflexão

Figura 1: Diferentes processos de polarização



4 Procedimentos

1. Verificação da Lei de Malus

Primeiramente montam-se os instrumentos a serem utilizados sobre o banco ótico como na figura 2a. A fonte é ligada e toma-se cuidado para regular a altura dos instrumentos óticos de forma que a luz no detector ocupe toda a área do sensor. A figura não ilustra mas o polarizador ajustável é colocado o mais próximo possível do detector. Observando-se a medida do detector e procura-se a posição angular do polarizador ajustável na qual a intensidade é máxima. O ângulo é então variado de 10° em 10° e as medidas observadas são anotadas até que se tenha andado 180° . Retira-se o filtro de infravermelho e as medidas são feitas novamente.

2. Polarização circular elíptica

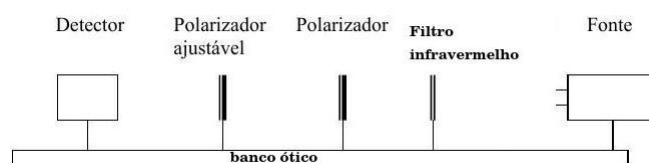
Na mesma montagem do procedimento anterior ajusta-se o analisador (polarizador rotativo) na posição de mínima transmissão. Com essa regulagem os instrumentos são montados sobre o banco ótico como na figura 2b. A placa de $\frac{\lambda}{4}$ é então girada até que a medida no sensor seja mínima. O estado de polarização é então analisado². A placa de $\frac{\lambda}{4}$ é então girada da sua posição inicial em 90° e o estado de polarização é analisado. Com a placa de $\frac{\lambda}{4}$ nesse estado o analisador é colocado em 45° com o polarizador fixo e mais uma vez analisamos o estado de polarização. O filtro de vermelho é então retirado e as medidas refeitas.

3. Determinando índice de refração utilizando polarização por reflexão

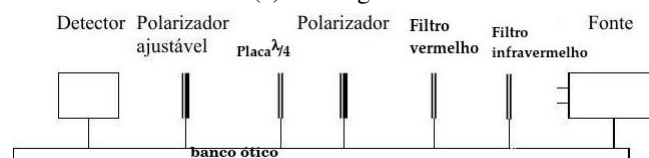
O experimento usa um espectroscópio e a montagem é representada simplificada na figura 2c. Na figura o colimador está fixo, o telescópio é móvel e a placa de vidro encontra-se fixa à uma mesa com marcação em graus que pode girar. Tanto o movimento da mesa como o do telescópio são em torno do eixo da mesa. A fonte é ligada, a mesa é fixada e procura-se com o movimento do telescópio o feixe de luz refletido. Ajusta-se então o foco do colimador de forma que a imagem obtida seja nítida. Colocando-se um polarizador entre a ocular do telescópio e o olho pode-se decidir se a luz refletida é polarizada ou não. Nosso objetivo é achar o ângulo α em que isso ocorre. Gira-se a mesa (modificando o ângulo com que a luz colimada incide na placa) e procura-se novamente com o telescópio a luz refletida. Observa-se a polarização ou não da luz e o processo é repetido³ até que se ache o ângulo α procurado. Com esse ângulo a fórmula 1 pode ser usada para determinar o índice de refração n_2 do material supondo o índice de refração do ar $n_1 = 1$.

² Analisar o estado de polarização no nosso contexto é, como já foi feito no primeiro procedimento, fazer variar em 180° o ângulo do analisador de 10° em 10° anotando-se em cada etapa a medida no sensor.

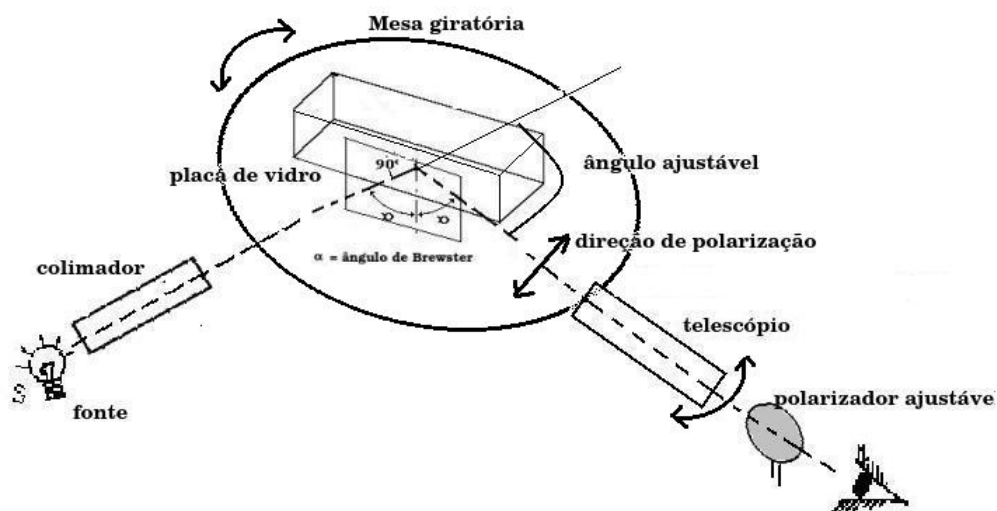
³ É claro que a busca por esse ângulo segue um algoritmo lógico: se a intensidade observada está diminuindo estamos no caminho certo, caso contrário devemos ir na outra direção.



(a) Montagem 1



(b) Montagem 2



(c) Montagem 3

Figura 2: Procedimentos



5 Dados

Os resultados do procedimento 1 são mostrados na tabela 1. A segunda coluna mostra os dados da análise de polarização quando usamos o filtro de infravermelho e a terceira os dados quando removemos o filtro. Os resultados do procedimento 2 são vistos na tabela 2. A segunda coluna nos mostra o estado de polarização quando a placa de $\frac{\lambda}{4}$ é colocada de forma que a intensidade seja mínima, na terceira coluna a placa foi girada em 90° e na quarta temos o estado de polarização com o polarizador fixo em 45° . A tabela 3 mostra os dados das medidas com placa de $\frac{\lambda}{4}$ mas sem o filtro de vermelho. Os dados das três tabelas são plotados nos gráficos 3, 4 e 5.

$\theta \pm 0.5^\circ$	c/ filtro	sem filtro
0.0	260	735
10.0	253	680
20.0	235	610
30.0	212	520
40.0	167	410
50.0	128	300
60.0	92	205
70.0	56	130
80.0	28	92
90.0	14	91
100.0	16	120
110.0	30	203
120.0	59	296
130.0	92	415
140.0	132	540
150.0	172	635
160.0	210	720
170.0	230	760
180.0	255	770
180.0	255	770

Tabela 1: Procedimento 1

$\theta \pm 0.5^\circ$	$\frac{\lambda}{4}$ em 0°	$\frac{\lambda}{4}$ em 90°	Polarizador em 45°
0.0	35	36	16
10.0	33	35	15
20.0	30	32	14
30.0	26	28	14
40.0	20	22	15
50.0	14	16	16
60.0	10	11	17
70.0	5	6	18
80.0	2	3	19
90.0	1	1	20
100.0	3	3	20
110.0	8	7	21
120.0	14	12	20
130.0	20	18	20
140.0	25	24	19
150.0	31	30	18
160.0	35	33	17
170.0	36	35	16
180.0	36	35	16
180.0	36	35	16

Tabela 2: Procedimento 2



$\theta \pm 0.5^\circ$	$\frac{\lambda}{4}$ em 0°	$\frac{\lambda}{4}$ em 90°	Polarizador em 45°
0.0	425	430	247
10.0	414	419	243
20.0	396	398	241
30.0	342	357	245
40.0	283	288	249
50.0	207	215	245
60.0	145	159	250
70.0	83	90	250
80.0	42	44	254
90.0	23	25	250
100.0	26	23	245
110.0	51	44	246
120.0	93	89	248
130.0	155	146	247
140.0	221	208	241
150.0	293	277	243
160.0	350	342	243
170.0	393	393	241
180.0	405	409	240
180.0	405	409	240

Tabela 3: Sem filtro vermelho

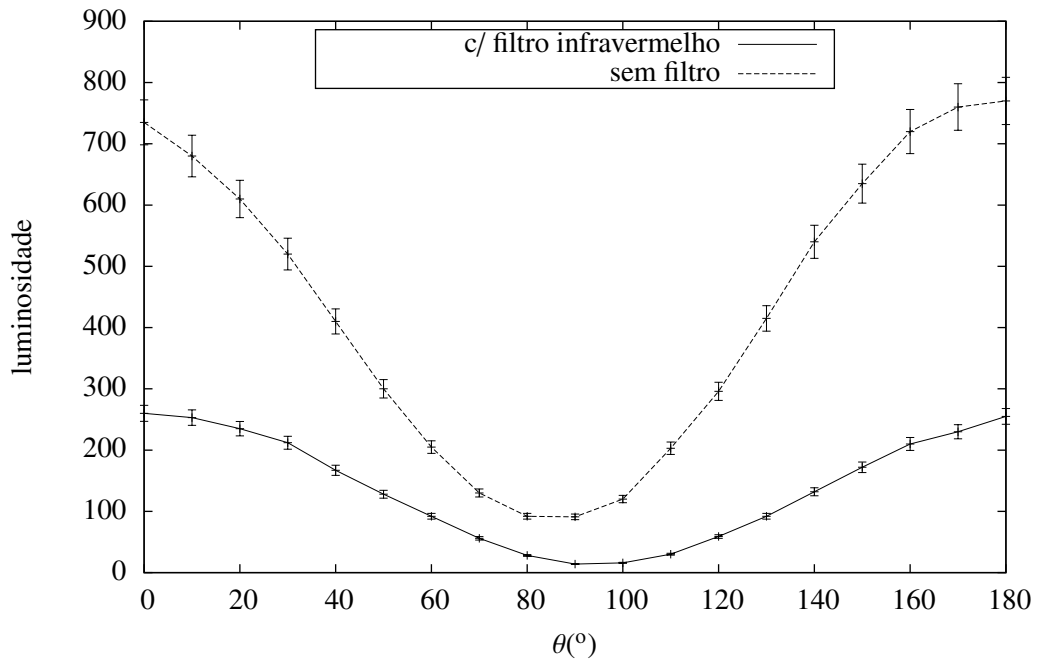


Figura 3: dados do experimento 1

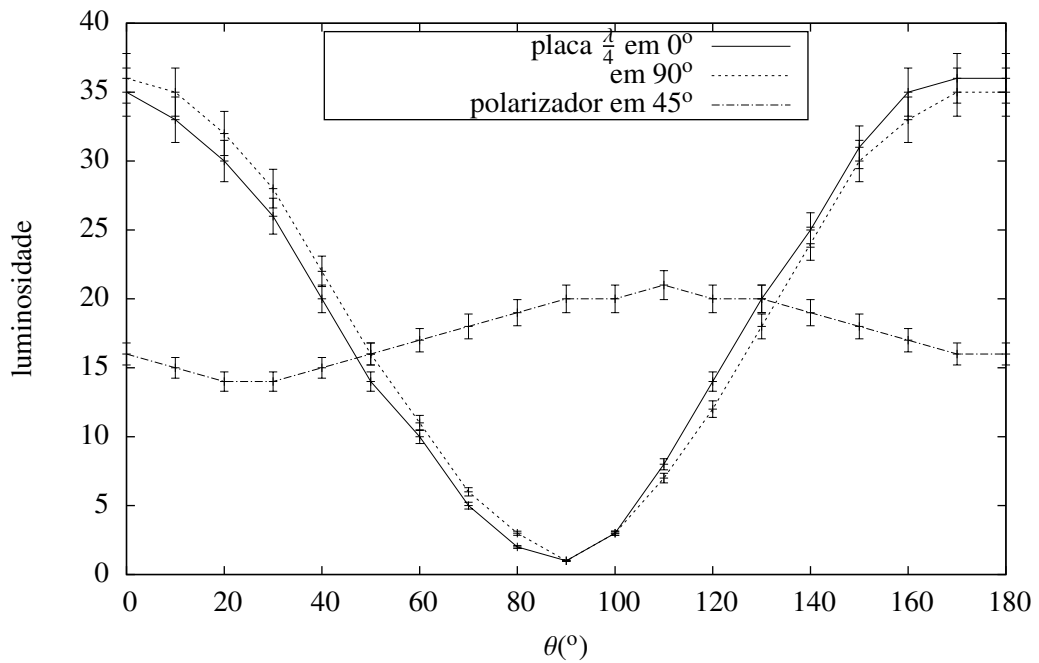


Figura 4: dados do experimento 2

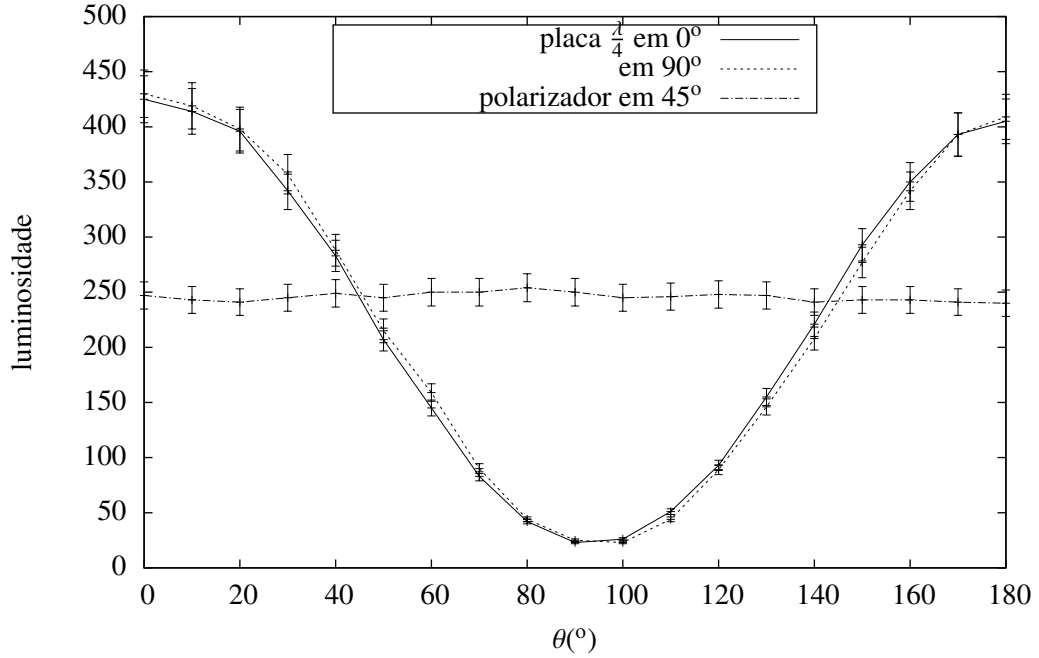


Figura 5: experimento 2 sem filtro vermelho

O ângulo de Brewster achado para a placa de vidro no procedimento 3 é:

$$\alpha = 57.10^\circ \pm 0.05^\circ \quad (4)$$

6 Análise de Dados

Nos gráficos 6 e 7 a seguir mostramos a regressão dos dados obtidos nos procedimentos 1 e 2.

No gráfico 6 as equações das curvas são:

$$\begin{aligned} \text{com filtro: } & 12.52 + 240.47 \cos^2\left(\frac{\pi(x-(4.73))}{180}\right) \\ \text{sem filtro: } & 81.49 + 668.99 \cos^2\left(\frac{\pi(x-(-5.50))}{180}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

No gráfico 7 as equações são:

$$\begin{aligned} \text{placa em } 0^\circ: & 2.19 + 34.27 \cos^2\left(\frac{\pi(x-(-4.69))}{180}\right) \\ \text{placa em } 90^\circ: & 2.44 + 34.06 \cos^2\left(\frac{\pi(x-(-1.46))}{180}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

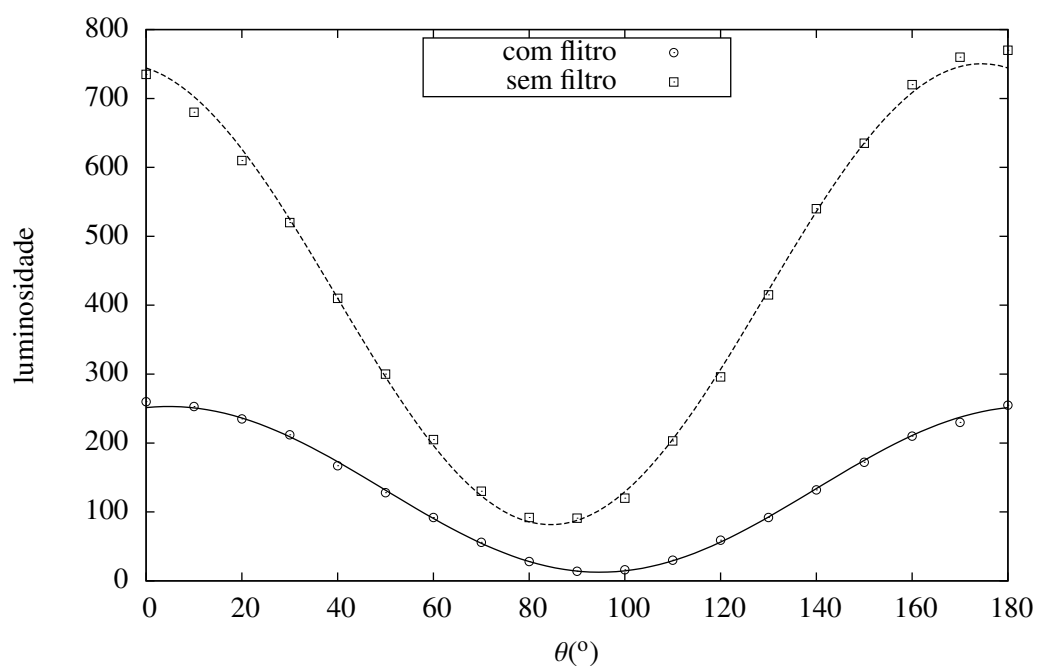


Figura 6: Regressão dos dado do experimento 1

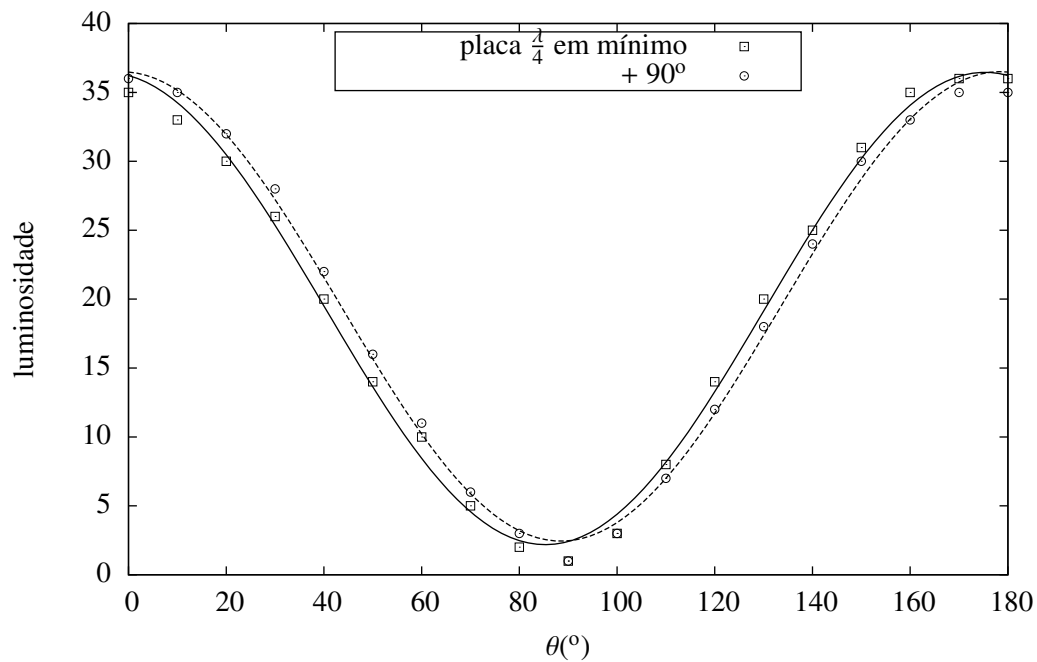


Figura 7: Regressão dos dado do experimento 2



Procedimento I

Observa-se no gráfico 6 e nas equações 5 o comportamento senoidal quadrático das curvas de intensidade luminosa como previsto por Malus. Notamos no entanto duas características que divergem do esperado. Primeiramente as medidas realizadas com filtro de infravermelho não foram capazes de eliminar a *luminosidade de fundo* por completo. Apesar de termos obtido uma redução considerável no termo constante da fórmula não conseguiu-se obter um seno quadrado puro como previsto pela fórmula 1. Em nossas medidas existem portanto comprimentos de onda que passam pelo filtro para os quais os polarizadores utilizados não funcionam apropriadamente. Além disso era esperado que com a introdução do filtro obtivéssemos apenas uma translação vertical dos dados e não é isso que se observa. Vemos que as amplitudes observadas variam cerca de 3 vezes.

Alguns fatores, ou mais provavelmente, uma combinação de fatores podem ter contribuído para essas divergências entre os dados e a teoria. Analisando o estado de polarização da luz da fonte notamos que esta possui algum grau de polarização, o que certamente não bate com as condições da lei de Malus. Além disso notou-se que, medindo a intensidade captada tendo-se um polarizador fixo, não há uma posição angular do analisador que não diminua a intensidade observada. Ou seja, mesmo com os dois polarizadores em paralelo notamos uma queda no sinal. O analisador deve portanto absorver algum comprimento de onda, o que não era esperado. Apesar de tudo isso é sensato dizer que se observou no experimento uma luz linearmente polarizada.

Procedimento II

Primeiramente notemos as duas curvas próximas no gráfico 7 e as regressões em 6. Vemos que colocar a placa de $\frac{\lambda}{4}$ em uma posição de mínimo ou em posição perpendicular a esta primeira produz o mesmo resultado a menos de uma pequena constante de fase. Essa constante de fase pode ser explicada pela falta de precisão na marcação do ângulo de 90° . Dentro dessa faixa de erro podemos dizer que obtivemos o esperado teórico: colocar o campo paralelo a direção de n_{max} ou de n_{min} produz o mesmo resultado, a soma das componentes do campo em cada direção deve ser a mesma.

Vamos agora analisar o grau de elipticidade da polarização quando colocamos a placa de $\frac{\lambda}{4}$ em 45° com direção de polarização. Vê-se na figura 2b que os vetores giram com amplitude variável formando uma elipse. Nota-se que os eixos da elipse são definidos pelas posições de máximo e mínimo (direções perpendiculares). Mediremos a elipticidade ε procurando esses pontos de máximo e mínimo no gráfico 4 e na tabela 2. Além disso lembramos que a intensidade medida é proporcional ao quadrado do campo, tiramos portanto a raiz quadrada de I_{max} por I_{min} para achar a elipticidade. Portanto:



$$\begin{aligned}
 I_{max} &= 21 \\
 I_{min} &= 14 \\
 \varepsilon &= \sqrt{\frac{I_{max}}{I_{min}}} = \sqrt{\frac{21}{14}} \\
 \varepsilon &= 1.22
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Notamos por último a importância do filtro vermelho. Ele reduz bastante a intensidade da radiação ao selecionar somente uma pequena faixa de comprimentos de onda. Sem ele não se veria as oscilações que ocorrem no sinal da placa de $\frac{\lambda}{4}$. É o que ocorre em 5. Poder-se-ia pensar que o sinal fora circularmente polarizado.

Procedimento III

Tendo o ângulo de Brewster em 4 podemos usar a fórmula 3 para achar o índice de refração n_{placa} da placa de vidro. Supomos para isso $n_{ar} = 1$

$$\begin{aligned}
 n_{placa} &= \tan(\alpha) \cdot n_{ar} = \tan 57.10 \cdot 1 \\
 n_{placa} &= 1.546
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

A tabela a seguir⁴ relaciona o índice de refração de alguns materiais.

Índices de Refração de Alguns Meios*			
Meio	Índice	Meio	Índice
Vácuo	1 (exatamente)	Vidro de baixa dispersão	1,52
Ar (CNTP) ^b	1,00029	Cloreto de sódio	1,54
Água (20°C)	1,33	Poliestireno	1,55
Acetona	1,36	Dissulfeto de carbono	1,63
Álcool etílico	1,36	Vidro de alta dispersão	1,65
Solução de açúcar (30%)	1,38	Safira	1,77
Quartzo fundido	1,46	Vidro de altíssima dispersão	1,89
Solução de açúcar (80%)	1,49	Diamante	2,42

*Para um comprimento de onda de 589 nm (luz amarela do sódio).

^bCNTP significa "condições normais de temperatura (0°C) e pressão (1 atm)".

Figura 8: Índices de refração para alguns materiais

Comparando os índices vemos que o medido bate com índice de vidro de baixa dispersão.

⁴Retirada de Halliday – Física – Vol. 4, 8a edição, página 18.



7 Conclusão

A menos de alguns problemas discutidos na análise o experimento permitiu verificar a validade da lei de Malus e a influência dos filtros. Observou-se o estado elíptico produzido utilizando-se uma placa de $\frac{\lambda}{4}$ e foi possível medir a excentricidade desta polarização. Por fim calculou-se o índice de refração de uma placa de vidro usando o ângulo de Brewster e o obtido bateu com os valores tabelados. O experimento foi portanto bem sucedido.

Referências

- [1] JEWETT, J.W.; SERWAY, R.A. *Física para cientistas e engenheiros* volume 4 : Luz, Óptica e Física Moderna. 8ª ed. São Paulo : Cengage Learning, 2012.
- [2] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. ; WALKER. *Fundamentos de Física* volume 4 8ª ed. Rio de Janeiro : LTC, 2009.
- [3] R Nave. Polarization by Reflection. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polar>. Acesso em: 3 de maio de 2013
- [4] R Nave. Classification of Polarization . Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas>. Acesso em: 4 de maio de 2013