

9 - MEDIDAS ÓTICAS E PROPRIEDADES DA LUZ

20/11/2023

Manu Helene Nunes da Silve, Grupo 2, PL1

20/11/2023

OBJETIVOS

- Estudar fenomenologia relativa à polarização da luz, em particular as inturações de luz monochromática linearmente polarizada, circularmente polarizada e elipticamente polarizada
- Determinar a velocidade da luz no ar e num meio sólido (árvore) utilizando para o efeito técnicas avançadas de medição de tempo

INTRODUÇÃO TEÓRICA

Polarização da luz \rightarrow oscilação do campo eletromagnético dentro de uma direção vertical

• Linear \rightarrow campo permanentemente orientado na direção θ de polarização

• Elíptico $\rightarrow \left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 + \left(\frac{E_\alpha}{E_{o\alpha}}\right)^2 = \left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)\left(\frac{E_\alpha}{E_{o\alpha}}\right) \cos \phi = m^2 \phi$ \rightarrow diferença de fases de E_y e E_α

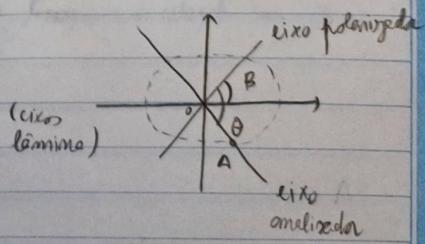
• Circular $\rightarrow \phi = \pm \frac{\pi}{2}, \pm \frac{3\pi}{2}, \pm \frac{5\pi}{2} \dots$ e $E_{ox} = E_{oy} = E_0$

↓

$$E_y^2 + E_\alpha^2 = E_0^2$$

$$\phi = \pm \pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \dots \Rightarrow E_y = -\frac{E_{oy}}{E_{o\alpha}} E_\alpha$$

Lei de Malus $\rightarrow P_A = \frac{P_0}{2} [\cos^2 \theta + \cos^2(2\beta - \theta)]$



Velocidade da luz

$$\bullet \underline{A_2} \rightarrow \Delta t_{osc} = \frac{f_m T_{(f_m - f_r)}}{c_{ar}} L_{ar}$$

$T_{(f_m - f_r)}$ - período de onda da freq ($f_m - f_r$)

f_m - freq. modulação

f_r - freq. referência

Δt_{osc} - distância temporal média

entre picos adjacentes do sinal de

raído $c_{ar}(t)$ e de referência $c_{ar}(t)$

L - distância entre fonte luminosa
e detector

$$\bullet \underline{\text{Acrílico}} \rightarrow m_{acr} = 1 + \frac{(\Delta t_{osc(ar+acr)} - \Delta t_{osc(ar)}) c_o}{f_m T_{(f_m - f_r)} L_{ar}}$$

m_{acr} - índice de refração

do acrílico

L - comprimento

acrílico

$$\rightarrow c_{acr} = \frac{c_o}{m_{acr}}$$

c_o - velocidade da

luz no vácuo $\sim c_{ar}$

$$2,98 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\frac{m_{alum}}{m_{acr}} = 1,000$$

$$\frac{m_{alum}}{m_{acr}} = 1,495$$

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

(A) Polarização da luz

modulo a luz com frequência

Parte 1

Polarizada Lâmina Retardadora Amalizado

Choppa

Fonte
ótica

Deteção

Osciloscópio

laser semicondutor que
emite luz na região do visível

mostrar tensão gerada no
bloco de detecção
(registrar amplitude do
harmonico)

- Montar apêndice polarizador, rodá-lo (variar θ_p) e registrar a partir do osciloscópio valores máximo e mínimo de n_{op} (faz - n variações para intervalos $\Delta\theta = 5^\circ$)
- Colocar polarizador em posição em que n_{op} é máximo (delinear), colocar analisador, rodá-lo (variar θ_A) determinar para qual posição n_{op} é máximo (n_{op}^{max}), comodina se para $\theta = 0^\circ$ no analisador (faz - n variações para intervalos $\Delta\theta = 10^\circ$)
- Rodar analisador em intervalos de $\Delta\theta = 10^\circ$ e registrar correspondentes n_{op}
- Verifica que fatores experimentais normalizados (n_{op}/n_{op}^{max}) seguem a relação $\cos^2 \theta$
(Lei de Malus)

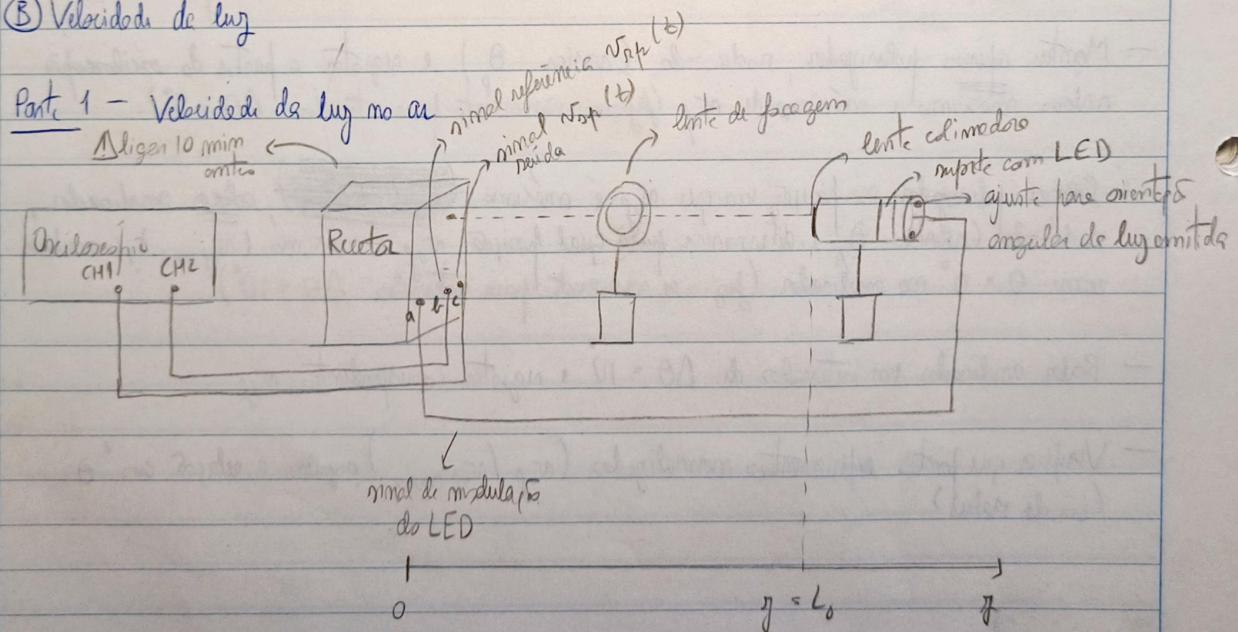
Part. 2

- Rodar analisador um ângulo em que n_{op} é mínima (isto faz ângulo de 90° com sentido do polarizador - $\theta = 90^\circ$); registar a posição do analisador
 $\rightarrow \theta_A = \theta_p + 90^\circ$
- Girar lâmina de $\lambda/4$ e rodar analisador fazem um ângulo independente da posição angular do analisador (luz transmitida pela lâmina tem polarização circular)
- Rodar a lâmina 20° ou 45° , utilizando registo do analisador correspondente a $\theta = 90^\circ$ e rodar analisador de 45° para ter $\theta = 45^\circ$.
 Rodar analisador um intervalo de $\Delta\theta = 10^\circ$ registando valores correspondentes de n_{op} (conforme o número de rotas analisadas a $\theta = 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ, \dots$ ou $\theta = 35^\circ, 25^\circ, 15^\circ, \dots$)
- Escolher um dos conjuntos de valores de θ , representar n_{op} em função de θ , significando que se obtém uma dependência imediata da

$$\frac{P_A}{P_0} = \frac{P_0}{2} [\cos^2 \theta + \cos^2(2B - \theta)]$$

→ fórmula ótica transmitida pelo polarizador

(B) Velocidade da luz



- No foto de tela determinar frequência de modulação f_m (não foi possível!)
- Observar nível b/c , determinar a sua frequência ($f_m - f_s$) e correspondente período $T_{(f_m - f_s)}$
- Com fonte de luz em $y = 0$ e usando bloco de ajuste da fonte do metrô interator níveis harmónicos n_{sp} e n_{sh} (t)
- Deslocar fonte de luz em intervalos de 20 cm no eixo $y = [0, 2] \text{ m}$, registrando para cada posição o valor Δt_{osc} da diferença temporal das ondas $n_{sp}(t)$ e $n_{sh}(t)$
- Repetir Δt_{osc} vs y , com declínio determina velocidade de luz no ar, inserindo eqs:

$$\Delta t_{osc} = \frac{f_m T_{(f_m - f_s)}}{c} L \quad (y = L)$$

--- → m

Parte 2 - Velocidade de luz no arábico

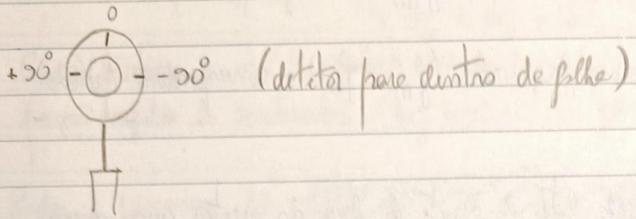
- Com fonte em $y = 0$ níveis harmónicos
- Deslocar fonte para $y = L_0 = 1,25 \text{ m}$ e determinar $\Delta t_{osc/ar}$
- Com fonte de luz em $y = L_0$ cobrir bloco de arábico no fundo do projégo do feixe luminoso e obter $\Delta t_{osc/ar + arábico}$
- Determinar índice de refração do arábico e velocidade da luz com interator, usando eqs:

$$m_{árabico} = 1 + \frac{(\Delta t_{osc/ar + arábico} - \Delta t_{osc/ar}) c_0}{f_m T_{(f_m - f_s)} L_{árabico}}$$

NOTAS DE AULA

(A)

Ponto 1



$$v_{op} \text{ min} \Rightarrow \theta_p = [35^\circ, 40^\circ]$$

$$v_{op} \text{ max} \Rightarrow \theta_p = [-50^\circ, -45^\circ] \Rightarrow \text{considerar } \theta_{pl_{\max}} = -47,5^\circ$$

$$v_{op} \text{ max} = 19,0 \text{ V para } \theta_A = -40^\circ \Rightarrow \text{condição - m } \theta = 0^\circ$$

Ponto 2

$$v_{op} \text{ min} \Rightarrow \theta_A = 50^\circ$$

$$\text{Rodando andando entre } \theta_A \text{ max e min} \Rightarrow \beta = \theta_L - \theta_p = 15^\circ - (-47,5^\circ) = 62,5^\circ$$

Movimento acelerado de 45° até $\theta_A = 5^\circ$

(B)

Ponto 1 - lug

$$f_n \text{ (indicada no problema)} = 60 \text{ MHz}$$

$$(f_m - f_n) \text{ (CH2)} = 101,2 \text{ KHz}$$

$$c_{\text{lug}} = 3,04 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$T_{(f_m - f_n)} = 9,880 \mu\text{s}$$

20/11/2023
Jours

Ponto 2 - acrílico

$$\Delta t_{\text{ac}} = 1,79 \mu\text{s}$$

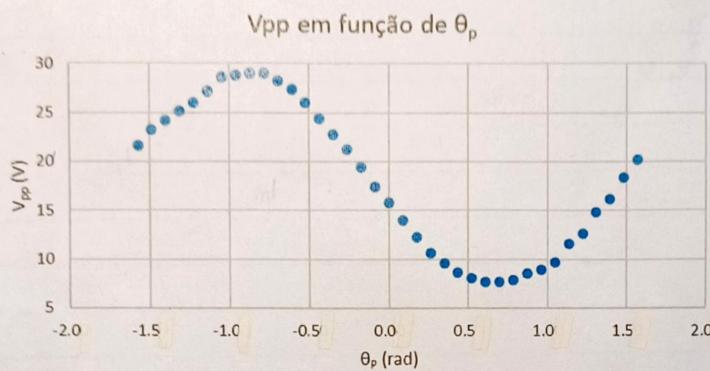
$$\Delta t_{m+\text{acrílico}} = 1,84 \mu\text{s}$$

$$m_{\text{acrílico}} = 1,503; c_{\text{acrílico}} = 1,98 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

(A) Polarizações de luz

Parte 1



$$V_{pp} \pm 0,1 \text{ V}$$

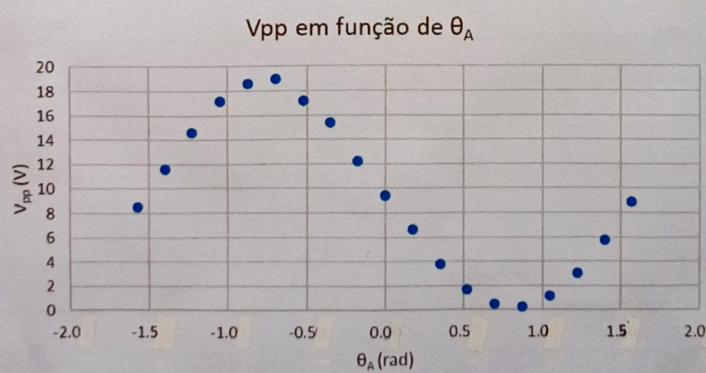
θ_p ± 0,5° (no gráfico está em radianos)
 → varia -n de -90° a 90° em intervalos Δθ = 5°

— Tendo em conta os dados acima, determinou -n:

V_{oflmax} = 29,0 V em θ_p = [-50°, -45°], logo optou -n para utilizar

θ_{plmax} = -47,5°
 (mantendo θ_p ← -47,5°)

— De seguida, inseriu -n o analisador e procedeu -n à mesma análise.



$$\theta_A \pm 0,5^\circ$$

→ varia -n de -90° a 90° em intervalos Δθ = 10°

— Obtém -n V_{oflmax} = 19,0 V para θ_A = -45°, pelo que foi este o valor

considerado para θ = 0°

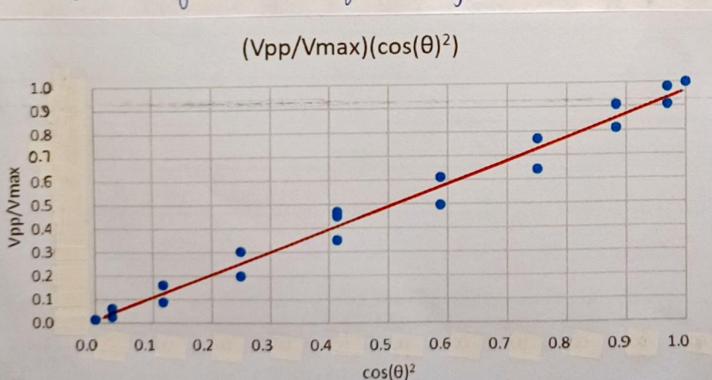
- Sendo $V_{max} = 19,0 \text{ V}$, registrou - m:

$\Theta (\pm 0.5^\circ)$	$\Theta (\text{rad})$	V_{pp}/V_{max}	$u (V_{pp}/V_{max})$	$\cos(\theta)^2$
130.0	2.269	0.4674	0.0005	0.413
120.0	2.094	0.3032	0.0005	0.250
110.0	1.920	0.1600	0.0005	0.117
100.0	1.745	0.0611	0.0005	0.030
90.0	1.571	0.01368	0.00005	0.000
80.0	1.396	0.02421	0.00005	0.030
70.0	1.222	0.0884	0.0005	0.117
60.0	1.047	0.1979	0.0005	0.250
50.0	0.873	0.3495	0.0005	0.413
40.0	0.698	0.4968	0.0005	0.587
30.0	0.524	0.642	0.005	0.750
20.0	0.349	0.811	0.005	0.883
10.0	0.175	0.905	0.005	0.970
0.0	0.000	1.000	0.005	1.000
-10.0	-0.175	0.979	0.005	0.970
-20.0	-0.349	0.905	0.005	0.883
-30.0	-0.524	0.768	0.005	0.750
-40.0	-0.698	0.611	0.005	0.587
-50.0	-0.873	0.4505	0.0005	0.413

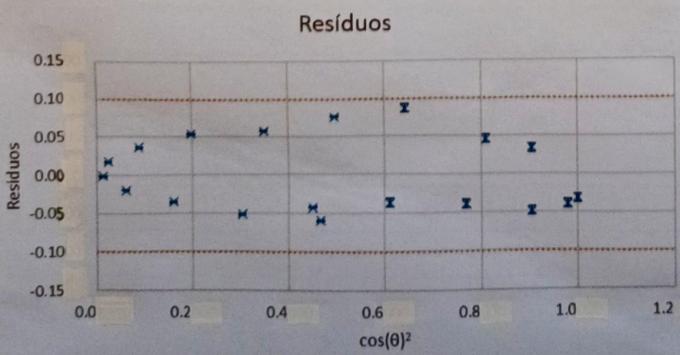
- Tendo em conta que $V \propto P$, mesta experiência a Lei de Malus, relações que n quer compreender, tem a forma:

$$\frac{V_{pp}}{V_{max}} = \cos^2(\theta) + \cos^2(2\beta - \theta)$$

- Logo, registou - m o seguinte ajuste:

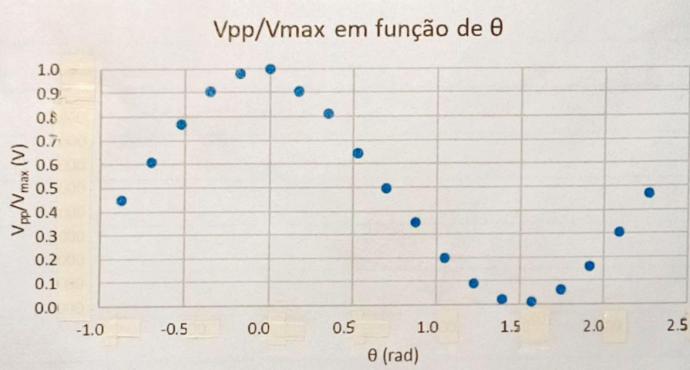


m	0.96	$0.01 b$
$s(m)$	0.03	$0.02 s(b)$
r^2	0.98	0.050 $s(y)$



(retas laranja a tracejado:
 $\pm 2s(y))$

- Tendo em conta a eq. da Lei de Malus, via esperado que o declin fosse igual a 1° , no entanto, num universo de $4,5\%$. Tal erro é explicado pela tendéncia elíptica dos resíduos, que viola a tendéncia também elíptica dos dados. Ainda assim, todos os resíduos mostram -n dentro do intervalo $\pm 2\text{ rad}$) além de que é necessário ter em conta que o declin também tem uma incerteza de 3% , pelo que se conclui que a Lei de Malus foi comprovada com sucesso.



- Tendo em conta os dados registados e o gráfico acima, V_{min} deve ocorrer $\theta = 90^\circ$; contudo, verifica-se que, na realidade, o mínimo é registado para $\theta = 97,5^\circ$. Teoricamente, $\theta_p = \theta_A - \theta$, dali se segue que, para $\theta = 0^\circ$, os eixos de transmissão do polarizador e do analisador sejam paralelos. No entanto, $\theta_{p,max}$ e $\theta_{A,max}$ têm uma diferença de $7,5^\circ$, que explica a diferença de $7,5^\circ$ do mínimo em relação ao esperado (ou seja, furou-se à memória a Lei de Malus) mas mesmo assim não vai de encontro ao que é previsto teoricamente. Esta diferença entre θ_p e θ_A pode -n dizer aos eixos do polarizador e do analisador não estarem perfeitamente alinhados, isto é, é possível comprovar a Lei de Malus e obter o gráfico esperado para esta polarização; no entanto, no registo das medidas este presente a diferença de $7,5^\circ$.

Parte 2

$$(\theta_A = 50^\circ)$$

- Colocar -n o analisador no posição do mínimo visto c, com $\theta = 97,5^\circ$ de diferença em relação ao polarizador (em vez de $\theta = 90^\circ$ como via esperado, como exposto na parte 1).
- Colocar -n uma lâmina retardadora entre o analisador e o polarizador com ângulo $\theta = 15^\circ$ (rodando o analisador com a lâmina nesse ângulo, não se altera o nível no osciloscópio)

$$-\beta = \theta_L - \theta_P = 15^\circ - (-97,5^\circ) = 62,5^\circ$$

— Rodou - m a ângulo 20° para um lado ($\beta = 82,5^\circ$), e rodou - m analisar 45° at $\theta_A = 5^\circ$, ou seja, para obter $\theta = 52,5^\circ$ (teoricamente $\theta = 45^\circ$)

— Rodou - m o analisador em intervalos $\Delta\theta = 10^\circ$ e com os dedos, realizou - m um ajuste do tipo:

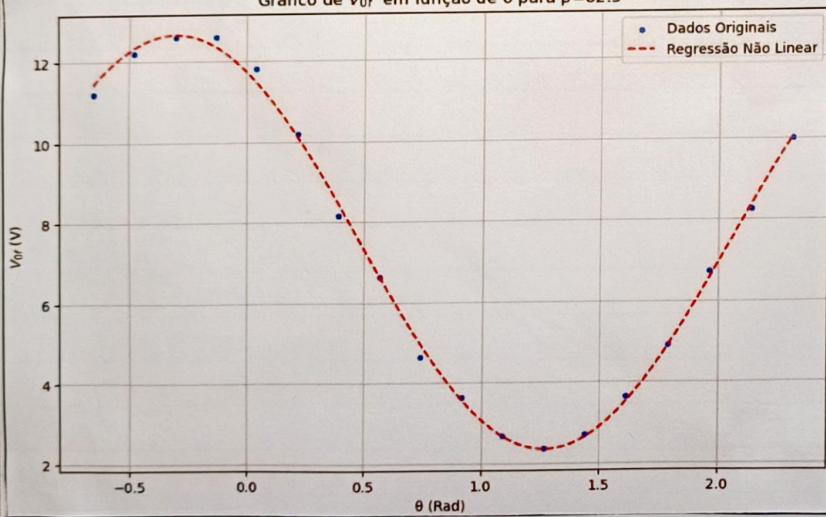
$$\beta = 82,5^\circ$$

$\theta_A (\pm 0.5^\circ)$	$\theta (\pm 0.5^\circ)$	V_{of} (V)	$u(V_{of})$	$F_A(\theta)$	$u(F_A)$	$\cos(\theta)^{1/2}$
5.0	52.5	3.64	0.1	9.2301	0.0847	0.3706
15.0	62.5	2.68	0.1	7.4665	0.0899	0.2132
25.0	72.5	2.36	0.1	5.7066	0.0843	0.0904
35.0	82.5	2.72	0.1	4.1627	0.0685	0.0370
45.0	92.5	3.64	0.1	3.0211	0.0445	0.0019
55.0	102.5	4.92	0.1	2.4195	0.0151	0.0498
65.0	112.5	6.72	0.01	2.4303	0.0162	0.1468
75.0	122.5	8.24	0.01	3.0524	0.0454	0.2887
85.0	132.5	10.0	0.01	4.2107	0.0692	0.4564
-5.0	42.5	4.64	0.01	10.7849	0.0692	0.5436
-15.0	32.5	6.64	0.01	11.9431	0.0454	0.7113
-25.0	22.5	8.16	0.01	12.5652	0.0162	0.8536
-35.0	12.5	10.2	0.01	12.5761	0.0151	0.9532
-45.0	2.5	11.8	0.01	11.9744	0.0445	0.9981
-55.0	-7.5	12.6	0.01	10.8329	0.0685	0.9830
-65.0	-17.5	12.6	0.01	9.2890	0.0843	0.9096
-75.0	-27.5	12.2	0.01	7.5291	0.0899	0.7868
-85.0	-37.5	11.2	0.1	5.7654	0.0847	0.6294

$$V_{of} = A (\cos^2(\theta) + \cos^2(2\beta + \theta + \phi)) + B$$

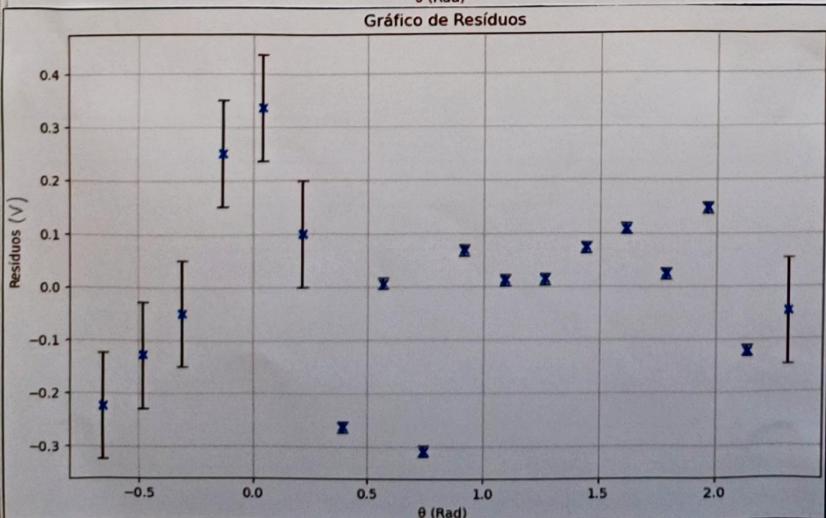
(com base na Lei da Malus)

Gráfico de V_{of} em função de θ para $\beta = 82,5^\circ$



Parâmetros ajuste:

$$\begin{cases} A = 6,26 \pm 0,09 \\ \phi = 0,87 \pm 0,01 \\ B = 1,2 \pm 0,1 \end{cases}$$

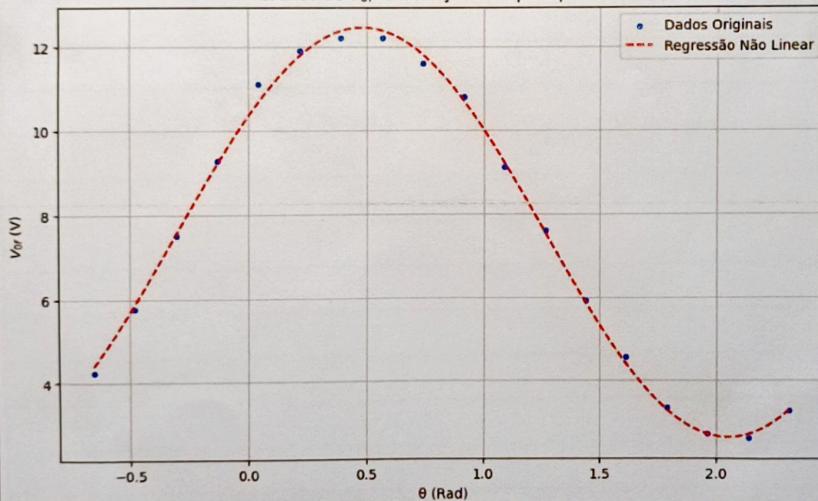


Os resíduos apresentam uma ligeira tendência linear para $\theta \in [-1; 0,5]$; no entanto, é necessário considerar que os pontos neste intervalo apresentam uma incerteza significativamente inferior à dos restantes pontos, pelo que o ajuste é adequado.

- Rodou -n e ficou em 20 para o lado contrário ($\beta = 42,5^\circ$), e repositionando -n o analisador em $\theta_A = 5^\circ$, repetiu -n a medição:

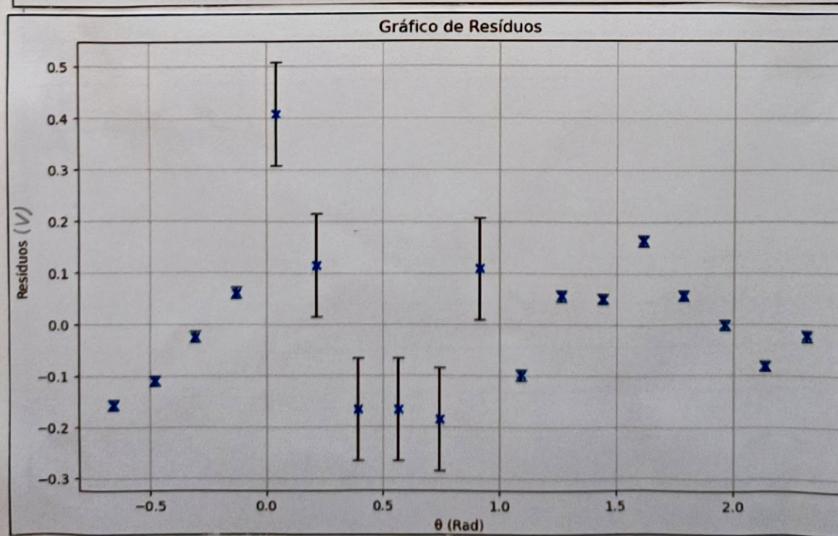
$\beta = 42,5^\circ$						
$\theta_A (\pm 0,5^\circ)$	$\theta (\pm 0,5^\circ)$	$V_{0f} (V)$	$u(V_{0f})$	$PA(\theta)$	$u(PA)$	$\cos(\theta)^2$
5.0	52.5	10.8	0.01	2.9430	0.0380	0.3706
15.0	62.5	9.12	0.01	2.6477	0.0129	0.2132
25.0	72.5	7.60	0.01	2.9430	0.0138	0.0904
35.0	82.5	5.92	0.01	3.7933	0.0388	0.0170
45.0	92.5	4.56	0.1	5.0960	0.0591	0.0019
55.0	102.5	3.36	0.1	6.6940	0.0723	0.0468
65.0	112.5	2.72	0.1	8.3947	0.0768	0.1464
75.0	122.5	2.64	0.1	9.9927	0.0720	0.2887
85.0	132.5	3.28	0.1	11.2955	0.0585	0.4564
-5.0	42.5	11.6	0.1	3.7934	0.0585	0.5436
-15.0	32.5	12.2	0.01	5.0961	0.0720	0.7113
-25.0	22.5	12.2	0.01	6.6942	0.0768	0.8536
-35.0	12.5	11.9	0.01	8.3948	0.0723	0.9532
-45.0	2.5	11.1	0.01	9.9929	0.0591	0.9981
-55.0	-7.5	9.28	0.01	11.2956	0.0388	0.9830
-65.0	-17.5	7.52	0.01	12.1459	0.0138	0.9096
-75.0	-27.5	5.76	0.01	12.4412	0.0129	0.7868
-85.0	-37.5	4.24	0.01	12.1459	0.0380	0.6294

Gráfico de V_{0f} em função de θ para $\beta=42,5^\circ$



Parâmetros ajuste:

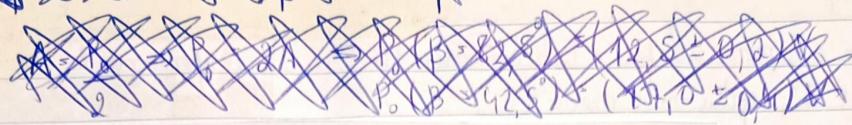
$$\begin{aligned} A &= 8,5 \pm 0,2 \\ \phi &= 0,70 \pm 0,01 \\ B &= -1,0 \pm 0,2 \end{aligned}$$



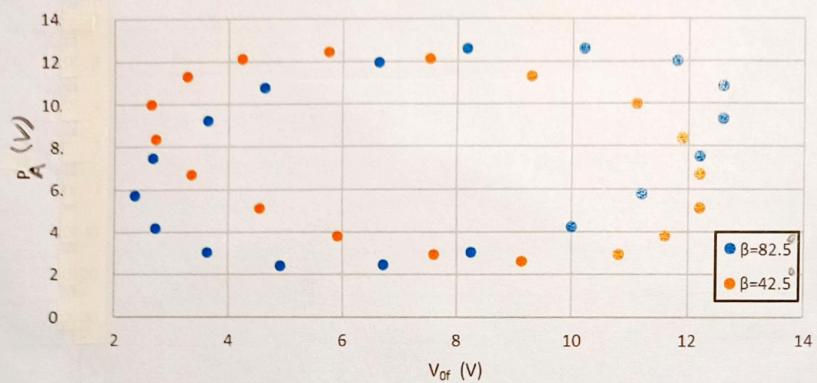
Os resíduos das extremidades apresentam tendências lineares; no entanto, é também necessário considerar que os incertezas das pontas centrais são significativamente maiores, pelo que os valores de resíduos são bastante reduzidos e, por isso, considera -n o ajuste adequado.

- Como observado nos gráficos, calcula-se a fórmula que atinge o detector P_A , usando a eq. de ajuste:

~~Existe uma fórmula para calcular a probabilidade de atingir o detector P_A~~



$P_A (V_{of})$



(Symbolo V_{of} também dependente de θ)

- É óbvio, para os dois ângulos, numa forma elíptica, isto é, a lâmina contribui a polarização linear para uma polarização elíptica. Verifica-se que ambas as elipses têm os eixos alinhados com os eixos de coordenadas (ou seja, rodando a lâmina de 20° , os seus eixos são desalinhados dos eixos coordenados). Os ângulos das elipses não têm iguais dimensões, logo é claro que não foi obtida polarização circular. Isto vai de encontro ao esperado, dado que a polarização circular só é atingida se a intensidade luminosa for independente de θ_A . consequentemente, θ . Ainda assim, pode prever-se que isto ocorre para $\beta = 45^\circ$; contudo, verifica-se para $\beta = 62.5^\circ$. Esta diferença poderá devida à diferença entre θ_A e θ_p , já em 7.5° superior ao esperado, ou a um desalinhamento do eixo da própria lâmina rotacionada (depois que $\beta = \theta_L - \theta_p$).

② Velocidade de luz

- Não foi possível determinar a frequência de modulação f_m a partir da osciloscopia, por isso respondeu-se ao valor nominal de $f_m = 60 \text{ MHz}$

- Mediu-se:

$$f_m - f_2 = (101,2 \pm 0,1) \text{ kHz}$$

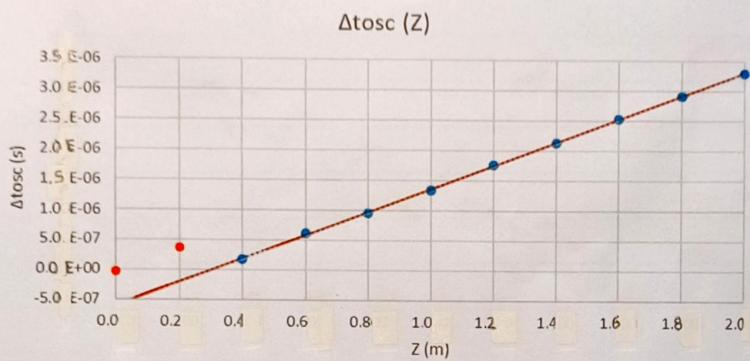
$$T_{(f_m - f_2)} = (9,88 \pm 0,01) \mu\text{s}$$

[A₂]

- Realizar um ajuste com função exponencial:

$$\Delta t_{osc} = \frac{\rho_m T_f (f_m - f_i)}{c_a} Z$$

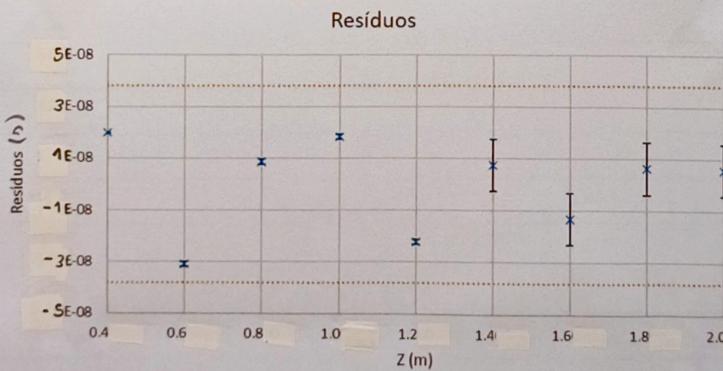
c_a → distância



Os pontos a níveis foram considerados divididos, pelo que já não foram incluídos no ajuste

m	1.95E-06	-5.9E-07	b ↗
s (m)	1E-08	2E-08	s (b)
r ²	0.9997	1.9 E-08	s(y)

→ muito próximo de 0, como esperado



Resíduos aleatórios dentro do intervalo $\pm 2\sigma$ (y)

- Ajuste, a velocidade de lug no ar é dada, em termos de declinação:

$$c_a = \frac{\rho_m T_f (f_m - f_i)}{m} = (3,04 \pm 0,02) \times 10^8 \text{ ml/s}$$

$$u(c_a) = 0,6\% \text{ e } E_x (y) = 2\% \quad (c_{atm} = 2,98 \times 10^8 \text{ ml/s})$$

- O valor foi determinado com bastante precisão e exatidão

Acrílico

- ~~Tendo em conta o desvio padrão anterior, o módulo do desvio padrão é devido ao erro experimental. O índice de refração do acrílico é devido ao erro experimental.~~

$$m_{acr} = 1 + \frac{c_{acritico}}{l_{acr}} \frac{\Delta t_{osc(acr)} - \Delta t_{osc(ar)}}{\ln T_{(f_m - f_n)}} \quad e \quad c_{acr} = \frac{c_{acritico}}{m_{acr}}$$

- Mediu-se:

$$L_{acr} = (0,050 \pm 0,005) \text{ mm}$$

$$\Delta t_{osc(ar)} = (1,79 \pm 0,01) \mu\text{s}$$

↙

$$a/2 = 1,25 \text{ m}$$

com bloco de acrílico

$$\Delta t_{osc(ar+acr)} = (1,89 \pm 0,01) \mu\text{s}$$

↙

$$a/2 = 1,25 \text{ m}$$

com bloco de acrílico

- Desta forma, determinou-se:

$$m_{acr} = 1,503 \pm 0,151 \quad (m_{acritico} = 1,495)$$

$$c_{acr} = (1,98 \pm 0,20) \times 10^8 \text{ ml/s} \quad (c_{acritico} = 1,99 \times 10^8 \text{ ml/s})$$

tendo ambos as grandezas

- incerteza (%) = 10%
- E_n (%) = 0,5%

- O índice de refração e a viscosidade de lug no acrílico foram determinados com erro substancialmente baixo; no entanto, há incerteza logo na 1ª casa decimal, pelo que os valores podem ter sido determinados com mais precisão. A incerteza significativa

dur - m à frequência de inserções dos dedos medida com osciloscópio
 $\Delta t_{\text{osc}(m+a)} \text{ e } \Delta t_{\text{ar}}$.

$$(T_{f_{\text{fm}}-f_2})$$

EQUAÇÕES DE INCERTEZA

$$u\left(\frac{V_{\text{pp}}}{V_{\text{max}}}\right) = \frac{u(V_{\text{pp}})}{\sqrt{V_{\text{max}}}}$$

$$u(P_A) = 6,26 [2\sin(2\beta - \theta + 0,87) \cos(2\beta - \theta + 0,87) - 2\sin\theta \cos\theta] u(\theta)$$

0,009 red

β para $B = 82,5^\circ$

$$u(c_{\text{ar}}) = \sqrt{\left(\frac{f_{\text{m}}}{m} u(T_{f_{\text{fm}}-f_2})\right)^2 + \left(-\frac{f_{\text{m}} T_{f_{\text{fm}}-f_2}}{m^2} u(m)\right)^2}$$

$$u(m_{\text{ar}}) = \sqrt{\left[-\left(\Delta t_{\text{osc}(m+a)} - \Delta t_{\text{osc}(m)}\right) \frac{c_{\text{ar}} t_{\text{eo}}}{f_{\text{m}} T_{f_{\text{fm}}-f_2} L_{\text{ar}}} u(T_{f_{\text{fm}}-f_2})\right]^2 +}$$

$$\left[-\left(\Delta t_{\text{osc}(m+a)} - \Delta t_{\text{osc}(m)}\right) \frac{c_{\text{ar}} t_{\text{eo}}}{f_{\text{m}} T_{f_{\text{fm}}-f_2} L_{\text{ar}}} u(L_{\text{ar}})\right]^2 +$$

$$\left[\frac{c_{\text{ar}} t_{\text{eo}}}{f_{\text{m}} T_{f_{\text{fm}}-f_2} L_{\text{ar}}} u(\Delta t_{\text{osc}(m+a)})\right]^2 +$$

$$\left[-\left(\frac{c_{\text{ar}} t_{\text{eo}}}{f_{\text{m}} T_{f_{\text{fm}}-f_2} L} u(\Delta t_{\text{osc}(m)})\right)\right]^2$$

$$u(c_{\text{ar}}) = \frac{c_{\text{ar}} t_{\text{eo}}}{m_{\text{ar}}^2} u(m_{\text{ar}})$$

CONCLUSÃO

- Obteve - se polarizações de luz linear e comum - m a Lei de Malus com erro de 1,5% (considerando também a incerteza de 3% do declínio do ejepto estabelecido)
- Com uma lâmina rotatória, obteve - se polarizações elípticas para $B = 47,5^\circ$ e $B = 282^\circ$.
- Obteve - se polarizações de luz linear com polarizador e analisador e comum - m a Lei de Malus com um erro de 1,5%. (não necessário tu m conta que o declínio do ejepto é uma causa com uma incerteza de 3%).
- Com uma lâmina rotatória, obteve - se polarizações elípticas para dois ângulos B em que a intensidade de luz forá ainda dependente de θ (ângulo do analisador em relação ao polarizador).
- Determinou - se a velocidade da luz no ar $((3,04 \pm 0,02) \times 10^8 \text{ m/s})$ com incerteza de 0,6% e erro de 2%. Determinou - se índice de refração do ar úmido $(1,503 \pm 0,151)$ e a velocidade da luz no ar úmido $((1,98 \pm 0,20) \times 10^8 \text{ m/s})$ com erro de 0,5% mas incertezas ainda significativas de 10%, justificadas pelo propagador das incertezas das medições realizadas no experimento.