

A conservação da energia mecânica do fóton, em energia cinética rotacional, frente à alguns resultados e expectativas teóricas com interferômetros de Michelson na literatura

Daniel Souza Cardoso

Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia Sul-Rio-grandense, Brasil
danielcardoso@cavg.ifsul.edu.br

RESUMO

Realizou-se um estudo para verificar a representação do deslocamento do comprimento de onda segundo a teoria da conservação da energia mecânica do fóton em energia cinética rotacional, na transição entre dois meios, para fótons de baixa energia. Analizou-se as estimativas segundo o pressuposto teórico, para diagnóstico do número de franjas de interferência e seus deslocamentos em interferômetros de Michelson, comparando com os resultados e expectativas teóricas da literatura. O deslocamento do comprimento de onda segundo pressuposto teórico mostrou-se ajustado numa estreita faixa de valores permitidos e apresentou relevante representação dos resultados encontrados na literatura.

Palavras-chave: *Energia rotacional do fóton, interação fóton-matéria, interferômetro.*

ABSTRACT

The study was carried out to verify the representation of the wavelength shift according to the theory of the conservation of the mechanical energy of the photon in rotational kinetic energy, in the transition between two mediums, for low energy photons. Its verified the estimated according to the theoretical assumption, for the diagnosis of the number of interference fringes and their displacements in Michelson interferometers, comparing with the theoretical results and expectations of the literature. The wavelength shift according to the theoretical assumption adjusted well in a narrow range of permitted values and presented a relevant representation of the results found in the literature.

Keywords: *Photon rotational energy, photon-matter interaction, interferometer.*

1 Introdução

Estudos recentes indicam que a luz é capaz de apresentar movimento de rotação em determinadas condições, inclusive orbital, em acordo com Cardoso [4]. Segundo o autor, a luz ao transitar entre dois meios conserva parte de sua energia mecânica em energia cinética rotacional. A análise da conservação do momento linear do sistema, permitiu ao autor aferir um deslocamento do comprimento de onda que depende da energia associada ao movimento de rotação.

As análises através de interferômetros ganharam evidência com o surgimento da Teoria da Relatividade de Albert Einstein, pois em acordo com Martins [12], além de inúmeros outros estudos para verificar a velocidade da Terra através do Éter, fora os estudos realizados por Michelson e Morley em 1887 com interferômetro que historicamente descartaram a existência do Éter, legitimando o segundo postulada da Relatividade de Einstein que afirma que a velocidade da luz é constante em diferentes referenciais no vácuo [6]. Embora da mesma forma que Michelson e Morley continuaram realizando novas medidas interferométricas e encontrado pequenas diferenças desprezíveis, a presunção da existência do Éter ainda prevalece em determinados grupos de estudo como discutido na obra de Garcia [7], onde se questionam desde o plano de deslocamento do Éter em relação a superfície da Terra, por consequência, ao plano de alinhamento do interferômetro, além de tratar num contexto mais geral, sem o formalismo da Física, sobre as características do Éter e sua dinâmica perpassando pela Gravitação e entre outras, pela Teoria da Relatividade.

Os estudos e aplicações com interferômetros se estendem as mais diversas áreas do saber, seja no campo conceitual ou das tecnologias. Recentemente, estudos de poucas décadas, como a exemplo das contribuições de Allen [1], que reportam sobre o Momento Angular Orbital (MOA) do fóton em estudos de emaranhamento quântico de fótons em Computação e Informação Quântica, C&IQ, onde as análises em redes de difração e interferômetros ressurgem com destaques.

Segundo Souza [16], pode-se utilizar um interferômetro de Michelson para analisar o MAO associado a um feixe, introduzindo uma máscara de Laguerre (LG), pois o padrão de interferência revela sua singularidade de fase. As análises interferométricas do MAO da luz se apresentam em diferentes áreas da Física, a exemplo da condução de análises do MAO apresentado pela luz em regiões Interestelares de grandes densidades [10].

Pode-se dizer que as análises com interferômetros são amplamente empregadas em diferentes segmentos, desde estudos com fibras ópticas aos sobre as ondas gravitacionais. O interferômetro de Michelson permite verificar as propriedades ópticas de diferentes amostras, considerando variações do comprimento de onda ao transitar entre dois meios.

Neste trabalho, buscou-se verificar a consistência das estimativas do deslocamento do comprimento de onda segundo o pressuposto teórico [4], com as expectativas teóricas e resultados da literatura, para o diagnóstico do número de franjas de interferências e seus deslocamentos.

2 Referencial teórico

2.1 A teoria da conservação da energia mecânica do fóton, na transição entre dois meios, em energia cinética rotacional

Na perspectiva de Cardoso [4], o fóton ao transitar entre dois meios, experimenta os efeitos da interação fóton-elétron que se traduzem com a ação de um torque na interface separatriz, alterando seu estado de movimento angular. Diferentemente da interação fóton-elétron descrito pelo efeito Compton, em [4], o elétron antes da interação apresentava momentos lineares e angulares.

Segundo Cardoso [4], o fóton ao transitar por um meio mais refringente conserva parte de sua energia mecânica em energia cinética rotacional, onde a atenuação de sua energia cinética de translação é proporcional a variação do momento linear do elétron. Considerando a conservação do momento linear do sistema fóton-elétron, inferiu que a variação do comprimento de onda do fóton é dada por:

$$\lambda_f - \lambda_{f0} = \frac{h}{\sqrt{2m_e h\nu_f \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)}} (1 - \sec \theta) \quad (1)$$

Acordando com a lei de Snell-Descartes, conforme [4], onde:

$$\cos \theta = \frac{\sin \theta_{ref}}{\sin \theta_{inc}} \quad (2)$$

2.2 O caminho óptico segundo o Princípio de Fermat

Segundo Lima [11], Fermat introduz que a luz ao se mover mais lentamente, segue o caminho onde o tempo é minimizado. Em acordo com Pereira [14], o caminho percorrido por um feixe será aquele que minimizar a integral, dada por:

$$S = \int_{p_0}^p n ds \quad (3)$$

Onde S é o caminho óptico, n é índice de refração em função das coordenadas espaciais e ds um elemento de comprimento do arco de curva. Em outros termos, S é menor caminho percorrido por um raio de luz entre os pontos p e p_0 [13].

2.3 Expectativa teórica segundo a literatura

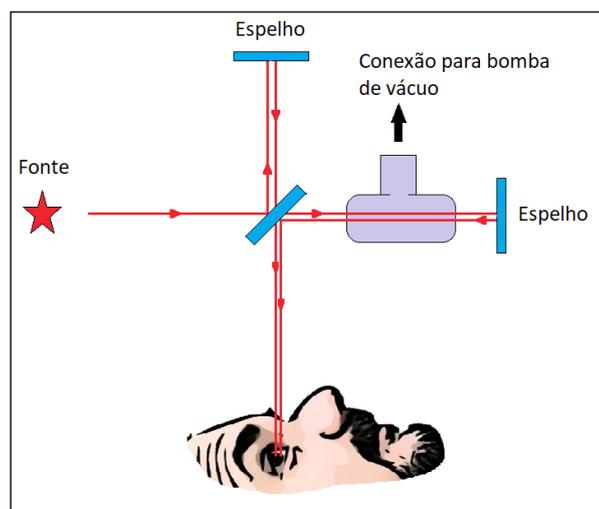
Segundo a literatura, o interferômetro de Michelson pode ser utilizado para medir o comprimento de onda a exemplo nos gases [15]. Conforme Halliday, Resnick e Krane [9], considerando um interferômetro de Michelson, a exemplo do apresentado na Figura 1, onde em um dos braços possui uma câmara de comprimento contendo um determinado gás, a variação do número de comprimentos de onda entre os dois meios para um mesmo caminho L é dado por:

$$\Delta N = (n - 1) \frac{2L}{\lambda_{\text{v\u00e1cuo}}} \quad (4)$$

Pode-se verificar os resultados teóricos esperados na literatura, analisando a situação-problema apresentada em [9]:

“Uma câmara selada contendo ar à pressão atmosférica, com 5,0 cm de comprimento e janelas de vidro, é colocada em um dos braços de um interferômetro de Michelson, como na Figura 35-49 (Figura 1). (As janelas de vidro da câmara têm uma espessura tão pequena que sua influência pode ser desprezada.) Uma luz de comprimento de onda $\lambda = 500$ nm é usada. Quando a câmara é evacuada as franjas claras se deslocam 60 posições. A partir desses dados determine o índice de refração do ar à pressão atmosférica com seis algarismos significativos”.

Figura 1 - Interferômetro de Michelson adaptada do problema 81 do capítulo 35 de [9]



Utilizando a equação (4), onde ΔN assume o número de deslocamentos de franjas de interferência, é possível constatar que o índice de refração do ar à pressão atmosférica é igual a 1,0003.

2.4 Medidas Interferométricas do índice de refração de líquidos

Segundo Araújo [2], estudos foram realizados verificando o índice de refração de líquidos através da análise de franjas de interferências num interferômetro. Em especial analisou a água deionizada a qual segundo o autor não apresentava estudo similar na literatura. As análises foram realizadas considerando um feixe de luz na faixa do visível, com comprimento de onda de 632,8 nm, com um percurso total na câmara de fluido de $2(x+\delta x) = 45\text{mm} + 5,6\text{ nm}$. O autor apresentou 16 medidas em função da pressão barométrica, temperatura do ar e da humidade relativa, cujos resultados podem ser verificados na tabela abaixo.

Tabela 1 - Tabela de medidas do índice de refração da água deionizada em função de variáveis termodinâmicas (dados extraídos de [2])¹

Medida	nar	nli	Nliq	Nar	Pressão	Tar	Tliq	UR
1	1,00027	1,33213	193175	145052	758	20,6	19,58	39
2	1,00027	1,33213	193175	145051	758	20,6	19,56	39
3	1,00027	1,33213	193176	145052	758	20,7	19,57	38
4	1,00027	1,33214	193176	145051	758	20,7	19,55	38
5	1,00027	1,33213	193175	145051	758	20,7	19,57	38
6	1,00027	1,33213	193175	145051	758	20,7	19,56	37
7	1,00027	1,33214	193176	145051	758,1	20,7	19,57	37
8	1,00027	1,33214	193176	145051	758,1	20,7	19,56	37
9	1,00027	1,33212	193174	145051	758,3	20,7	19,81	37
10	1,00027	1,33212	193174	145051	758,3	20,7	19,79	37
11	1,00027	1,33212	193173	145051	758,3	20,7	19,79	36
12	1,00027	1,33212	193174	145051	758,3	20,7	19,7	40
13	1,00027	1,33212	193173	145051	758,4	20,7	19,77	38
14	1,00027	1,33212	193174	145051	758,5	20,7	19,77	37
15	1,00027	1,33212	193173	145051	758,5	20,7	19,8	36
16	1,00027	1,33212	193173	145051	758,5	20,6	19,79	36

3 Metodologia

De forma análogo ao modelo predictor de franjas de interferência que pode-se encontrar em [9] (seção 2.3), e o encontrado em [2], em sua seção 1.3 [equação (25)], porém considerando que no caminho óptico percorrido por um feixe luminoso de comprimento de onda λ_i , haverá N_i comprimentos de onda. Portanto, considerando o caminho óptico segundo Fermat descrito na seção 2.2 para o percurso de um feixe de luz nos braços de um interferômetro de Michelson (seção 2.3), assume-se que o número de comprimentos de onda, no caminho óptico i , é dado por:

$$N_i = \frac{S_i}{\lambda_i} \quad (5)$$

O número de deslocamentos de franjas de interferência corresponderá à diferença do número de comprimentos de onda, entre dois caminhos ópticos, dado por:

$$\Delta N = \Delta \left(\frac{S}{\lambda} \right) \quad (6)$$

1 Os dados apresentados neste trabalho, a exemplo das tabelas 1 e 2, foram arredondados e alguns pela importância da variável se considerou até duas casas decimais. Nos valores dos índices de refração considerou-se até cinco casas decimais pela sua sensibilidade à variações de temperatura e pelo fato que pequenas diferenças do índice de refração, sejam da ordem de 10^{-5} , implicam em variações percentuais relevantes do número de deslocamento do número de franjas de interferência. Os dados submetidos às presentes análises não passaram por arredondamento, com exceção do truncamento natural a plataforma de análise a qual considera apenas 15 dígitos (8-byts).

Para verificar a representação dos resultados da descrição segundo o deslocamento de onda introduzido por Cardoso [4], realizou-se a análise dos desvios das médias do número de franjas, em acordo com Dias [5], verificando o desvio percentual.

Sendo o desvio da média de uma medida:

$$\delta_k = x_k - \bar{x} \quad (7)$$

onde $k=1,2,\dots,n$.

O desvio médio absoluto:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum \delta_k \quad (8)$$

O desvio relativo:

$$\delta_r = \frac{\bar{\delta}}{\bar{x}} \quad (9)$$

Considerando a equação (9), o desvio percentual:

$$\delta(\%) = \delta_r \times 100 \quad (10)$$

Em acordo com Grecco [8], para uma amostra de n medidas e variância empírica $\sigma^2(x_k)$, a dispersão dos valores das medidas individuais entorno da média \bar{x} é representada pelo desvio padrão:

$$\sigma(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (11)$$

Sendo o desvio padrão da média:

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma(x_k) \quad (12)$$

Para verificar a incerteza associada a cada valor medido, pode-se verificar o desvio padrão relativo, que segundo [8] descreve a incerteza relativa dada por:

$$\sigma_r(\%) = \frac{\sigma(\bar{x})}{\bar{x}} \times 100 \quad (13)$$

4 Desenvolvimento e discussão

Para verificar o deslocamento do comprimento de onda segundo Cardoso [4], para fótons de baixa energia, na transição entre dois meios, considerou-se a análise de medidas de interferômetros segundo a literatura.

Introduzindo o deslocamento do comprimento de onda apresentado na equação (1), $\Delta\lambda$, para a predição do número de comprimentos de onda encontradas num caminho óptico diferente do original, pode-se dizer, através da equação (6), que o número de deslocamentos de franjas de interferência é dado por:

$$\Delta N = 2x \left(\frac{n_2}{\lambda_1 + \Delta\lambda} - \frac{n_1}{\lambda_1} \right) \quad (14)$$

Sendo $2x$ a distância percorrida por um fóton ao atravessar duas vezes uma câmara (a exemplo da encontrada na figura 1), que pode conter diferentes fluidos ou ser simplesmente despressurizada. Analogamente, atribui-se $2x$ a distância percorrida pelo fóton noutra braço do interferômetro, ao atravessar duas vezes uma câmara de mesmas dimensões, porém imaginária, no meio original.

A equação (14) apresenta-se compacta, embora $\Delta\lambda$, dada pela equação (1), contenha mais termos. Contudo, pode-se encontrar uma expressão menos elegante, mas que traga consigo mais informações. Desta forma, considerando as equações (1) e (2):

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_e h\nu_f \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)}} \left(1 - \frac{\sin \theta_{inc}}{\sin \theta_{ref}}\right) \quad (15)$$

Considerando a equação (5), o número de comprimento de ondas no segundo caminho óptico:

$$N_2 = \frac{2xn_2}{\lambda_2} \quad (16)$$

Substituindo a equação (16) em (15), pode-se escrever:

$$\frac{2xn_2}{N_2} - \lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_e h\nu_f \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)}} \left(1 - \frac{\sin \theta_{inc}}{\sin \theta_{ref}}\right) \quad (17)$$

Seja um comprimento de onda conhecido, no vácuo:

$$\lambda_1 = \frac{c}{\nu_f} \quad (18)$$

Substituindo a equação (18) em (17), pode-se dizer que:

$$N_2 = \frac{2n_2\nu_f x \sqrt{2m_e h\nu_f \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)}}{h\nu_f \left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right) + c \sqrt{2m_e h\nu_f \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)}} \quad (19)$$

Considerando a equação (19), é possível perceber que N_2 é uma função da energia associada ao movimento de rotação do fóton e a interação fóton-elétron.

Para verificar o número de deslocamentos de franjas de interferência, ΔN , seja para analisar a transição de um fóton entre vácuo-ar, basta considerar que:

$$N_1 = \frac{2\nu_f x n_1}{c} \quad (20)$$

Nas próximas seções, apresenta-se uma análise da aderência das equações (14), (19) e (20) às estimativas e resultados encontrados na literatura, bem como uma análise da sensibilidade do número de deslocamentos de franjas de interferência frente às variações do deslocamento de onda.

4.1 Comparação entres as estimativas da literatura (seção 2.3) e a estimativa segundo o pressuposto teórico [4]

Na seção 2.3, como em inúmeros análogos que podem ser encontrados na literatura, apresentou-se uma situação-problema na qual se verifica o índice de refração da luz através de um interferômetro de Michelson. Considerando a mesma configuração, verifica-se a capacidade da equação (14) para prever o número de deslocamentos das franjas de interferência.

Pode-se calcular o deslocamento do comprimento de onda, ajustando a equação (15) através da Lei de Snell-Descartes:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_e h \nu_f \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)}} \left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right) = -9,54 \text{ pm} \quad (21)$$

Considerou-se massa do elétron, a constante de Planck, a frequência da luz, os índices de refração no vácuo e na água, apresentados na respectiva ordem:

$$m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$\nu_1 = 6,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

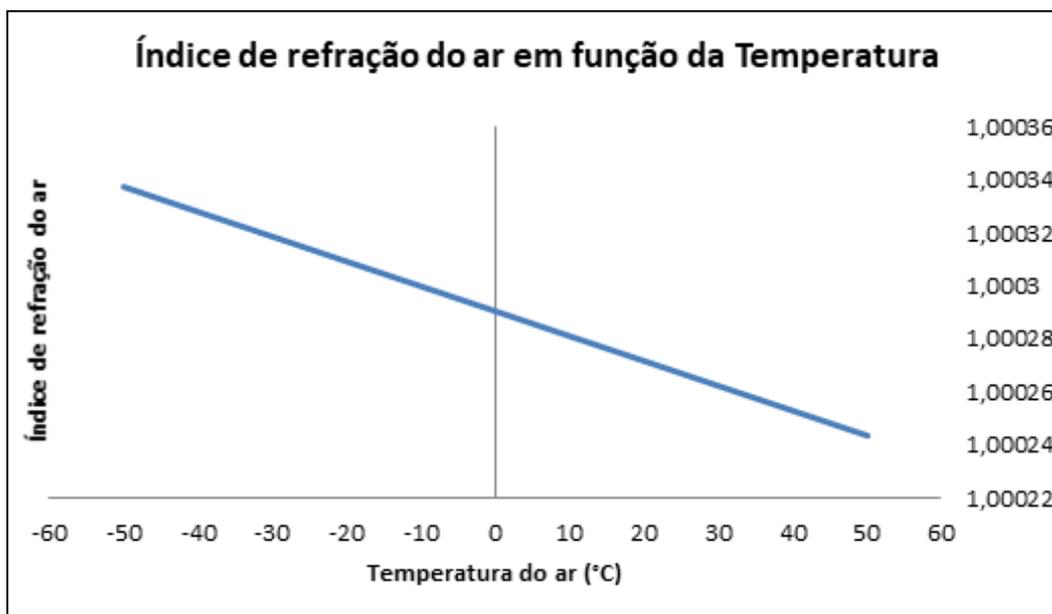
$$n_1 = 1$$

$$n_2 = 1,0003$$

A partir do deslocamento do comprimento de onda, equação (21), assumindo que $x = 5,0 \text{ cm}$ e $\lambda_f = 500 \text{ nm}$, pode-se obter o número de deslocamento das franjas de interferência, segundo a equação (14):

$$\Delta N = 2x \left(\frac{n_2}{\lambda_1 + \Delta\lambda} - \frac{n_1}{\lambda_1} \right) = 63,82 \quad (22)$$

Figura 2 - Índice de refração do ar em função da temperatura, segundo a equação de regressão linear apresenta em [2], desconsiderando as tolerâncias dos coeficientes linear e angular.



A diferença entre as equações (19) e (20), apresenta o mesmo resultado encontrado na (22), como esperado. O resultado superestima o resultado teórico de 60 deslocamentos de franjas de interferência, em aproximadamente 6,4%.

Contudo, constata-se na figura 2, que sob pressão de 1 atm, o ar vai apresentar o índice de 1,0003 quando sua temperatura assumir valores negativos (-10°C). Portanto verificou-se que para a equação (14) estimar 60 deslocamentos das franjas de interferência, precisamente, o índice de refração do ar deve ser igual a 1,00028, indicando que a temperatura encontra-se próxima à 10°C.

Na perspectiva, na seção (4.2), realiza-se uma análise da representação do número de franjas de interferência, sob a luz do deslocamento do comprimento de onda segundo Cardoso [4], quando o ar e líquidos ficam sujeitos a variações de parâmetros termodinâmicos: temperatura, pressão e umidade relativa do ar.

4.2 Comparação entres os resultados da literatura (seção 2.4) e a estimativa segundo o pressuposto teórico [4]

Considerando os resultados apresentados na seção 2.4, compara-se a estimativa do número de franjas de interferência no líquido e no ar, com resultados apresentados em Araújo [2]. As diferenças que compõe a equação (14) são ajustadas para a presente análise, da seguinte forma:

$$N_{ar} = \frac{2xn_1}{\lambda_1} \quad (23)$$

$$N_{liq} = \frac{2xn_2}{\lambda_1 + \Delta\lambda} \quad (24)$$

Sendo $\Delta\lambda$, o deslocamento de onda segundo Cardoso [4].

Os resultados encontrados nas equações (23) e (24) são identificados na tabela 2, pelo status de “calculado”. Para verificar a aderência das equações para a representação dos dados, se analisou os desvios em relação à média dos dados, bem como os desvios relativos e percentuais, conforme seção 3.

Constata-se que as equações (23) e (24), subestimam os valores encontrados em Araújo [2] com um desvio percentual em relação a média de aproximadamente 1,92% e 1,85%, com incerteza² relativa percentual da medida de 0,496% e 0,479%, respectivamente. Pode-se dizer que estes desvios são aproximadamente os encontrados para cada medida, sem grandes discrepâncias. Para uma mesma análise, usando a equação (4), os valores também são subestimados em aproximadamente -1,95% e 1,92%, com incerteza relativa percentual da medida de 0,503% e 0,496%, na mesma ordem.

Tabela 2 - Comparação entre o valor estimado para o número de comprimento de onda e os verificados na literatura, conforme seção 2.4 (autor)

Medida	nar	nli	Nliq (calculado)	Nar (calculado)	Nliq [1]	Nar [1]	Desvio médio - Nliq
1	1,00027	1,33213	189594	142263	193176	145052	-3581
2	1,00027	1,33213	189594	142263	193175	145051	
3	1,00027	1,33213	189594	142263	193176	145052	Desvio médio - Nar
4	1,00027	1,33214	189595	142263	193176	145051	-2788
5	1,00027	1,33213	189595	142263	193175	145051	
6	1,00027	1,33213	189595	142263	193175	145051	Desvio relativo - Nliq
7	1,00027	1,33214	189595	142263	193176	145051	-0,0185
8	1,00027	1,33214	189595	142263	193176	145051	
9	1,00027	1,33212	189593	142263	193174	145051	Desvio relativo - Nar
10	1,00027	1,33212	189593	142263	193173	145051	-0,0192
11	1,00027	1,33212	189592	142263	193173	145051	
12	1,00027	1,33212	189593	142263	193174	145051	Desvio percentual - Nliq (%)
13	1,00027	1,33212	189592	142263	193173	145051	-1,85
14	1,00027	1,33212	189592	142263	193173	145052	
15	1,00027	1,33212	189592	142263	193173	145051	Desvio percentual - Nar (%)
16	1,00027	1,33212	189593	142263	193173	145051	-1,92

4.3 Análise da sensibilidade do número de deslocamentos das franjas de interferência, ΔN , em relação às variações do deslocamento do comprimento de onda $\Delta\lambda$

Na seção 4.1, sob as condições da situação-problema apresentada na seção 2.3, a equação (14) estimou 60 deslocamentos do número de franjas de interferência para um índice de refração igual a 1,00028, para o ar a 1 atm. Verificou-se que o arre-

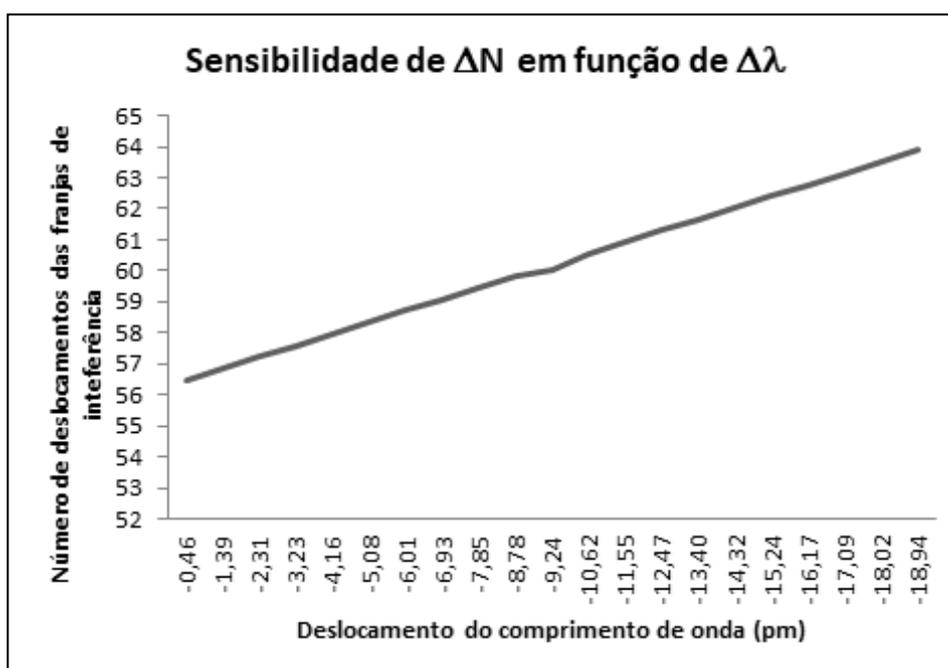
² Apresentou-se valores com até três casas decimais para ressaltar que há diferenças nas incertezas associadas às estimativas dos modelos. Contudo, são diferenças desprezíveis.

dondamento do índice de refração do ar implicou em variações de ΔN . Nesta perspectiva verifica-se a sensibilidade de ΔN em função de $\Delta\lambda$.

Na figura 4, constata-se que ΔN é sensível à pequenos deslocamentos de $\Delta\lambda$, onde verificou-se que a partir do 56º deslocamento do número de franjas de interferência, a cada intervalo de aproximadamente 2,5 pm de $\Delta\lambda$, na média, estima-se um deslocamento das franjas de interferência. Neste sentido, pode-se dizer que pequenas variações de $\Delta\lambda$, da ordem de um pico metro, afastam o valor estimado do esperado.

A estreita faixa de diferenças da ordem de um pico metro, delimita as possíveis diferenças ($\Delta\lambda$) que permitirão estimar ΔN com precisão ou aproximadamente. Portanto, o deslocamento do comprimento de onda segundo Cardoso [4] repousa na estimativa de um índice de refração adequado para o ar, a 1 atm e temperatura entorno de 10°C, centrado numa estreita faixa de acerto, mostrando-se ajustado para a estimativa de esperados teóricos.

Figura 3 - Variabilidade do número de deslocamentos do número de franjas de interferência em função do deslocamento do comprimento de onda³ (autor)



Para o caso de assumirmos que o deslocamento do comprimento seja nulo, a equação (14), pode ser escrita:

$$\Delta N = \frac{2x}{\lambda_1} (n_2 - n_1) \quad (25)$$

A equação (25), deixa claro que as diferenças dos caminhos ópticos são responsáveis pelos 56 deslocamentos das franjas de interferência (Figura 3), em acordo a descrição apresentada em Araújo [2] na sua seção 1.3, neste caso para um índice de refração igual 1,00028. Podendo ainda a equação (25), para quando $n_1=1$, assumir a própria equação (4).

Analisando as equações (25) e (4), pode se dizer:

i) A equação (25) desconsidera as variações do comprimento de onda, predizendo que o deslocamento das franjas de interferência se devem às diferenças dos caminhos ópticos, em acordo com o Princípio de Fermat.

ii) A equação (4) não é diretamente dependente das diferenças dos caminhos ópticos, mas sim da variação do comprimento de onda em acordo com a lei de Snell-Descartes.

Vale ressaltar que o Princípio de Fermat é consistente com a Lei Snell-Descarte, a qual justamente poderia ser chamada de Lei de Snell-Descarte-Fermat. Portanto as equações apresentadas em Araújo [2], em sua seção 1.3 [equação (25)], e [9] podem se equivaler, mas certamente vão diferir quando $n_1 \neq 1$, no que implica que a representação apresentada em Araújo [2] é mais coerente quando comparada com a equação (4). A equação (14) proposta neste trabalho, considera tanto as diferenças nos caminhos ópticos quanto o deslocamento no comprimento de onda, em acordo com o pressuposto teórico [4].

3 Os valores do deslocamento do comprimento de onda, figura 4, são arredondados.

5 Considerações finais

A análise do deslocamento do comprimento de onda, segundo a teoria da conservação da energia mecânica do fóton em energia cinética rotacional [4], frente as estimativas e resultados da literatura de diagnósticos do número de franjas de interferência e seus deslocamentos, em análises e expectativas com o interferômetro de Michelson, permite dizer que o deslocamento segundo o pressuposto teórico [4] mostra-se ajustado.

As estimativas do número de deslocamentos do número das franjas de interferência, em acordo com o pressuposto teórico [4], mostraram representatividade de resultados da literatura, com desvios percentuais entorno de -1,85% e -1,92% frente aos desvios percentuais de -1,92% e -1,94% estimados pelo modelo convencionado na literatura, sendo que as incertezas relativas percentuais encontradas nas estimativas dos modelos proposto e convencional, concordam entorno de 0,5%. Embora a representatividade da expectativa teórica fora de 93,6%, para a mesma situação-problema mostrou maior precisão na estimativa do índice de refração do ar a 1 atm e temperatura ambiente.

Na análise da sensibilidade do número de deslocamentos das franjas de interferência em função do deslocamento do comprimento de onda segundo Cardoso [4], verificou-se uma estreita faixa de diferenças adequadas, onde o deslocamento do comprimento de onda mostrou-se centrado, representando uma diferença da ordem de um pico metro. Pode-se dizer que ligeiras discrepâncias do deslocamento do comprimento de onda, o afastam das expectativas, o que por sua vez indica que o modelo proposto é adequado para prever o número de deslocamentos das franjas de interferência.

A qualificação do deslocamento do comprimento de onda segundo pressuposto teórico [4], neste estudo, permite dizer que a luz conserva parte de sua energia em energia cinética rotacional inclusive no ar, sem discutir as representações associadas aos momentos intrínseco e orbital.

Referências

1. ALLEN, Les et al. **Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes**. Physical Review A, v. 45, n. 11, p. 8185, 1992.
2. ARAÚJO, Marcos Cavalcante de. **Medidas Interferométricas do Índice de Refração de Líquidos**, 2011. 66f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.
3. Bauer W. ; DIAS, H. ; WESTFALL, G.. **Física para Universitários - Óptica e Física Moderna**. 1 ed. Sao Paulo: Mcgraw-Hill, v. 1, p. 31, 2013.
4. CARDOSO, Daniel Souza. **“Theory of Conservation of Photon Mechanical Energy, in the Transition between Two Middles, in Rotational Kinetic Energy”**, International Journal of Science and Research (IJSR), <https://www.ijsr.net/archive/v7i7/ART20183450.pdf>, Volume 7 Issue 7, July 2018, 810 - 815, DOI: 10.21275/ART20183450
5. DIAS, Christian Rodrigues ; [CARDOSO, Daniel Souza](#) ; TAVARES JÚNIOR, Ronaldo Matias ; RIBEIRO, Júlio César Bento . **Variabilidade climática sobre a probabilidade horária pentadal de chover em Pelotas, RS–Brasil**. ALMANAQUE MULTIDISCIPLINAR DE PESQUISA, v. 1 (1), 200-224 p., 2018.
6. ESPINDOLA, Paulo Renato; DA CUNHA ANDRADE, Luis Humberto. **Determinação do índice de refração em vidros aluminato de cálcio dopados com íons de Ti³⁺ usando o interferômetro de MICHELSON**. ANAIS DO ENIC, v. 1, n. 1, 2009.
7. GARCIA, Paulo Francisco. **O que há com a Ciência? Gravitação Universal**. Editora Alcance, 252 p., 1995.
8. GRECCO, Claudio Henrique dos Santos et al. **Metodologia de cálculo das incertezas associadas Às medições na calibração de monitores de radiação**. International Nuclear Atlantic Conference – INAC, ABEN, ISBN: 85-99141-01-5, 2005.
9. HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física 4**, LTC - Rio de Janeiro, 5 ed., vol. 4, 384p., 2004.
10. HARWIT, Martin. Photon orbital angular momentum in astrophysics. The Astrophysical Journal, v. 597, n. 2, p. 1266, 2003.

11. LIMA, Isabelle Priscila Carneiro de. O uso de controvérsias científicas para a compreensão da natureza da ciência: o caso do princípio de ação mínima. Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologias, 2014.
12. MARTINS, Roberto Andrade. O éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra, antes dos experimentos de Michelson e Morley (1818-1880). Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 29, n. 1, p. 52-80, 2012.
13. MOTTER, Adilson Enio. Uma Introdução a Formulação Variacional da Óptica Geométrica. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 19, n. 2, p. 189, 1997.
14. Pereira, Erms Rodrigues. Física dos cristais líquidos e gravitação: pontos de encontro. João Pessoa, UFPB-CCEN, Tese (Doutorado), 2011.
15. Randall, D. Knight, Física: Uma abordagem estratégica, BOKMAN Companhia Editora LTDA – São Paulo, 2 ed., vol. 2, 807p., 2009.
16. SOUZA, Carlos Eduardo Rodrigues de. Aplicações do Momento Angular Orbital da luz Computação e Informação Quântica. 2010. Tese de Doutorado. PhD thesis, Instituto de Física-UFF, 2010. 20.