

Física Experimental IV

Professora responsável

Maria Leticia Vega

DF-CCN-UFPI

2012

Apresentação

Esta apostila foi elaborada para os alunos que cursam a disciplina (240.534) da Física Experimental IV para os cursos Bacharelado e Licenciatura em Física. É formada por 8 práticas referentes a ementa da disciplina do curso envolvendo experimentos de óptica geométrica e física.

Devido a que ela foi modificada diversas vezes perdeu-se a ordem das citações bibliográficas. Por isso no texto não tem citações bibliográficas. Nesta apresentação serão citadas as fontes usadas para a elaboração dela. Se alguma fonte não foi citada e foi usada peço desculpas e, por favor, me envie para poder corrigir o erro e citar a fonte. As fontes usadas nesta apostila foram:

- Alonso-Finn. Fundamental University Physics. Vol.II, cap. 18.11, págs. 694-703, 1967
- Building scientific apparatus, Moore, John H; London, 1983
- Gaspar, Alberto; Física, Volume 2, Editora Ática. p. 174-175, 2000.
- Gonçalves, D. Física: Termologia, Ótica e Ondas. Cap. 10, p. 213, 1997.
- Halliday, D; Resnick, R; Krane, K. Física 4, 5ª ed. ED. LTC, Rio de Janeiro. p.16, 2002.
- Hecht, E. Óptica. 2ª ed. Ed. Addison Wesley, 2002.
- Lightwaves and Telecommunication, por Stewart E. M. American Scientist, p. 66, 1984; Light-Wave Communications, W.S.Boyle. Scientific American, p.40, 1977.
- Max Born; Emil Wolf. Principle of Optics. 7ª Ed.p. Cambridge, pág.194, 1999.
- Moysés, H. N. Curso de Física Básica 4. 3ª Ed. pág.50, 140-144, 2004.
- O material já elaborado pelos professores Ángel Hidalgo, Celio Borges, Franklin Crúzio, Heurison S. Silva e Jeremias Araújo professores do DF/UFPI, utilizados nas disciplinas de Física Experimental para os cursos de Bacharelado e Licenciatura em Física
- Dos catálogos de laboratório do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina http://www.uel.br/cce/fisica/index.php?arq=docente&cod_docente=38 (Acessada 12/03/2010)
- <http://pessoais.ufpi.br/labmo> (última atualização: 18/06/2006)
- <http://www.arauto.uminho.pt/pessoas/bda/radfoto.pdf> (acessado 01/08/2010).
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Candela> (acessado 01/08/2010).
- Catalogo de experimentos do laboratório integrado de Física geral DF- Universidade estadual de Londrina, 2008.
- <http://www.fisica.ufsc.br/~lab2/pdfs/exp09.pdf> (acessado 24/03/2011).
- <http://educar.sc.usp.br/optica/instrume.htm> (acessado 24/03/2011)
- <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Otica/Instrumentosoticos/camera.php> (acessado 24/03/2011)
- <http://www.cdcc.sc.usp.br/cda/index.html> (acessado 24/03/2011)
- www.fisica.ufjf.br/disciplinas/labfis4/experiencias.pdf (acessado 24/03/2012)

Atenciosamente

Prof^a. Maria Leticia Vega
(marialeticia.vega@gmail.com)
Departamento de Física – CCN – UFPI

**Sumário:**

Pratica 1: Refração e Reflexão da luz.....	5
Introdução teórica.....	5
Refração e Reflexão da luz.....	5
Procedimento Experimental da Pratica 1	7
Primeira Parte: Refração da luz nas interfaces que separa a água do ar e o ar da água.	7
Segunda Parte: Refração da luz usando o semicírculo de acrílico.....	8
Terceira Parte: Refração Reflexão interna total e ângulo limite	9
Quarta Parte: Princípio de uma fibra óptica e a Reflexão interna total.....	10
Prática 2: Espelhos Esféricos e de Lentes.....	12
Introdução teórica: Espelhos e Lentes.....	12
Procedimento Experimental da Pratica 2	14
Primeira Parte: Distância focal em um espelho esférico.....	14
Segunda Parte: Formação de imagens com espelho côncavo.	15
Terceira Parte: Lentes, formação de imagem e determinação da distância focal.....	17
Pratica 3: Instrumentos Ópticos.....	19
Introdução teórica: Instrumentos ópticos	19
Procedimento Experimental da Pratica 3	22
Primeira Parte – Luneta e determinação do aumento da luneta.	22
Segunda Parte – Microscópio e determinação do aumento.	23
Pratica 4: Dispersão da Luz	25
Procedimento Experimental da Pratica 4	26
Primeira Parte: Dispersão da luz no prisma	26
Segunda Parte - Indecomponibilidade das cores espectrais.....	26
Pratica 5: Lei Fotométrica da Distância.....	28
Procedimento Experimental da Pratica 5	29
Pratica 6: Interferômetros: Espelho Duplo de Fresnel.....	32
Procedimento experimental da pratica 6	34
Pratica 7: Difração da luz	36
Procedimento experimental da pratica 7	37
Primeira Parte: Difração produzida por fenda estreita.....	37



Segunda Parte: Difração produzida por um fio de cabelo (obstáculo)	38
Terceira Parte: Difração produzida com uma barreira (ou quina)	38
Pratica 8: Polarização da Luz	40
Procedimento Experimental da Pratica 8	44
Primeira Parte: Lei de Malus	44
Segunda Parte: Polarização por reflexão.....	47
Terceira parte: Atividade Óptica.....	48
Referências Bibliográficas.....	50
Apêndice A: Sistema Internacional de Unidades	51
Introdução.....	51
Unidades SI	51
Unidades SI de base	51
Unidades SI suplementares	52
Unidades SI derivadas com nomes e símbolos especiais.....	52
Prefixos e símbolos de certos múltiplos e submúltiplos decimais	53
Nomes e símbolos especiais autorizados	53
Regras de escrita e utilização dos símbolos e prefixos	53
Unidades definidas a partir das unidades SI que não são múltiplos ou submúltiplos decimais dessas unidades	54
Unidades utilizadas com o SI, cujos valores no SI são obtidos experimentalmente.....	55
Unidades específicas para luz.....	55
O que é luz?	55
Correspondência entre radiometria e fotometria.....	55
Nomenclatura psicofísica ou fotométrica.....	56
O experimento $V(\lambda)$	56
Principais Grandezas e Unidades.....	56
O ângulo sólido	58
Comentários sobre a curva $V(\lambda)$	59
Apêndice B: Expressando valores de amostragem	59
Apêndice C: Cálculo do erro percentual.....	60

Pratica 1: Refração e Reflexão da luz

Introdução teórica

Refração e Reflexão da luz

Newton foi quem primeiro se referiu ao “desvio angular do feixe de luz transmitido” por *refração*. Porém, a lei que governa o comportamento da luz quando ela se propaga através de uma interface que separa dois meios transparentes pode ser deduzida a partir do *Princípio de Fermat* considerando a geometria simplesmente ou ambos. Posteriormente, a lei de Snell-Descarte foi expressão com uma consequência da natureza da Eletromagnética da luz.

Nos experimentos a seguir, serão observados os princípios que envolvem os fenômenos da refração e também da reflexão. Em adição a absorção, estes são eventos que acontece quando a luz atravessa uma superfície (interface) que separa dois meios diferentes. Também serão discutidos o conceito de ângulo limite (ou crítico) da reflexão, reflexão interna total e a condição para que ocorra reflexão interna total.

São classificados como ópticos os materiais transparentes ao comprimento de onda da luz de interesse, sendo o seu *índice de refração* um dos parâmetros mais importantes. Entre as principais aplicações destes materiais se destaca a fabricação de lentes, prismas, janelas ópticas, fibras ópticas para transmissão de informação, etc

Os fenômenos de reflexão e de refração da luz acontecem quando um feixe de luz passa pela interface que separa dois diferentes meios de propagação transparentes, conforme diagrama apresentado na Figura 1. Um raio luminoso *monocromático* proveniente do meio 1 incide sobre a interface que separa os dois meios. Parte da luz incidente retorna ao meio 1, sendo chamada de luz refletida e parte penetra no meio 2, mudando a direção de propagação, sendo denominada luz refratada. O ângulo entre a direção *normal* à superfície (N) e o raio de luz incidente, o raio de luz refletido e o raio de luz refratado são definidos como ângulo de incidência θ_1 , ângulo de reflexão θ_1' ângulo de refração θ_2 , respectivamente. A *normal* (N) é a semi-reta perpendicular à interface que separa os dois meios de propagação, com origem no ponto de incidência da luz.

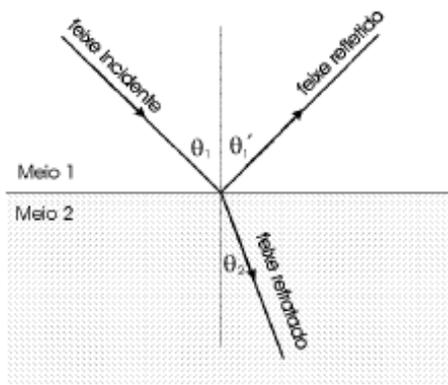


Figura 1: Reflexão e refração de um feixe de luz ao passar de um meio de propagação para outro, com índice de refração n_1 menor que n_2 .

A reflexão da luz na óptica geométrica obedece a duas leis:

1. O raio incidente, a reta normal e o raio refletido são coplanares, ou seja, estão no mesmo plano.
2. O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

$$\theta_1 = \theta_1'(1)$$

A refração da luz na óptica geométrica também obedece à duas leis:



1. O raio incidente, o raio refratado e a reta normal, estão contidos num mesmo plano.
2. Os senos dos ângulos de incidência e de refração são diretamente proporcionais as velocidades da onda nos respectivos meios materiais¹

$$\frac{\text{sen}(\theta_1)}{\text{sen}(\theta_2)} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

Sendo, v_1 a velocidade de propagação da luz monocromática no meio 1, e v_2 a velocidade de propagação da mesma luz monocromática no meio 2.

A razão entre a velocidade de propagação da onda no meio 1 e a velocidade de propagação no meio 2 é definida como o *índice de refração relativo* do meio 2 em relação ao meio 1:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Sendo n_2 o índice de refração absoluto do meio 2 e n_1 o índice de refração absoluto do meio 1. O *índice de refração absoluto* é o índice de refração do meio material em relação ao vácuo. Geralmente o índice de refração de um material é identificado pelo índice absoluto, representado por n . O conceito de índice de refração é utilizado em outra forma da *Lei de Snell-Descartes* que relaciona o seno dos ângulos de incidência e refração ao índice de refração absoluto de cada um dos meios de propagação:

$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2) = n_{21} \quad (4)$$

Na Tabela 1 são apresentados os valores do índice de refração absoluto de algumas substâncias, para a luz monocromática de 589,0 nm (luz amarela do sódio).

Tabela 1: Índice de refração absoluto de diversos materiais, para a linha 589 nm do sódio.

Meio	Índice de Refração	Meio	Índice de Refração
Vidro crown	1,520	Álcool etílico	1,360
Vidro comum	1,517	Quartzo fundido	1,460
Vidro flint	1,620	Parafina líquida	1,440
Diamante	2,423	Benzeno	1,502
Água (20 °C)	1,330		

Reflexão interna total

Ainda de acordo com a notação apresentada no diagrama da Figura 1-1, consideremos um feixe de luz passando de um meio 1 para um meio 2, com $n_1 > n_2$. Neste caso o ângulo de refração θ_2 será maior que o ângulo de incidência θ_1 . Definindo como *ângulo crítico* (ou ângulo limite), ao ângulo de incidência é $\theta_1 = \theta_c$ quando o ângulo de refração seja $\theta_2 = 90^\circ$, e aplicando a lei de Snell-Descartes, temos:

$$n_1 \text{sen}(\theta_c) = n_2 \text{sen}(90^\circ) \quad (5)$$

Admitindo que o meio de propagação 2 seja o ar, com $n_2 = 1$, a relação entre θ_c e n_1 é:

$$\text{sen}(\theta_c) = \frac{1}{n_1} \quad (6)$$

¹ A Segunda Lei da Refração foi descoberta experimentalmente por Willebrord van Royen Snell (1591-1626) e mais tarde deduzida por René Descartes, a partir de sua teoria corpuscular da luz. Nos Estados Unidos ela é chamada de *Lei de Snell*, na França de *Lei de Descartes*, e no Brasil *Lei de Snell-Descartes*.



No caso particular em que o ângulo de incidência θ_1 no meio de maior índice de refração é maior do que o ângulo crítico θ_c , não haverá luz refratada para o meio de menor índice de refração. Toda a luz que incide na interface é refletida de volta ao meio de maior índice de refração. Esse fenômeno conhecido por *reflexão interna total* é o princípio físico que permite a luz ser conduzida em uma fibra óptica.

Procedimento Experimental da Prática 1

Primeira Parte: Refração da luz nas interfaces que separa a água do ar e o ar da água.

Objetivos

Verificar a propagação do raio de luz e as propriedades ópticas da refração da luz quando ela

- Incide inicialmente a partir de um meio menos denso como o ar para um meio mais denso como a água
- Quando ela incide a partir de um meio mais denso como a água para um meio menos denso como o ar.

Material utilizado na primeira parte:

- Fonte de luz (laser),
- Cubra de acrílico com água com corante
- Tripés.
- suportes

Procedimento experimental

Nota: Anote todas as suas observações no seu caderno de laboratório. Por que elas serão úteis na hora de escrever o relatório.

1- Inicialmente, faça o raio de luz incidir normalmente a superfície da água e observe a trajetória do raio nos dois meios. Que foi observado? Como você explica fisicamente este fenômeno?

2- Em seguida, como mostra a Figura 2-a, faça o raio incidir obliquamente a interface que separa ar/água e observe o caminho do raio de luz e seu comportamento em relação à reta normal (imaginária) que passa pelo ponto de incidência. Que foi observado? Como você explica fisicamente este fenômeno?

3- Posteriormente (Figura 2-b), incide-se um feixe de luz através da interface água/ar, observando-se o trajeto do raio de luz. Que foi observado? Como você explica fisicamente este fenômeno? Qual é a diferença com o observado no item 2

4- Faça o raio incidir sob vários ângulos e veja se é possível obter a reflexão interna total para os dois modos de incidência experimentados (ar/água e água/ar). Que foi observado? Como você explica fisicamente este fenômeno?

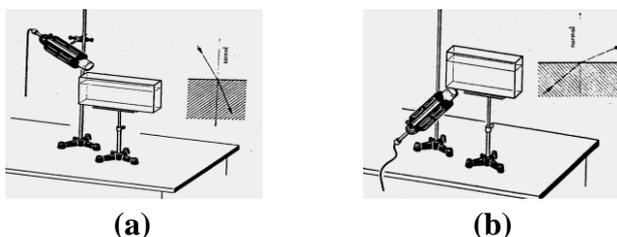


Figura 2: Incidência da luz nas interfaces (a) ar/água e (b) água/ar



Segunda Parte: Refração da luz usando o semicírculo de acrílico

Objetivos

- Verificar a Lei de Snell-Descarte.
- Medir o índice de refração da água utilizando a lei de Snell-Descarte.

Material utilizado:

- Fonte de luz (laser),
- Disco graduado de Hart.
- Diferentes objetos.
- Trilho.
- Suportes

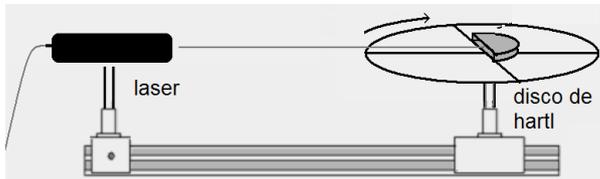


Figura 3: Incidência de um raio de luz sobre um semicírculo de acrílico fixado no disco de Hart.

Procedimento experimental

- 1- Montar o arranjo experimental da Figura 3
- 2- Faz-se incidir o raio luminoso precisamente no centro do corpo para que os raios refratados sejam perpendiculares à superfície de emergência, para que eles não sofram nenhum desvio.
- 3- Faz-se ainda variar o ângulo de incidência, girando o disco de Hart e observando a variação do ângulo de refração.
- 4- Preencha a Tabela 2 e expresse o valor do índice de refração na forma $\bar{n} \pm \sigma$ onde \bar{n} é o seu valor médio e σ é o desvio padrão da medida.
- 5- É de se esperar que a relação (última coluna da Tabela 2) entre o seno do ângulo de incidência α e o seno do ângulo de refração β seja uma constante que se denomina índice de refração (lei de Snell-Descarte). No entanto, foram realizadas algumas medições que necessariamente devem ser avaliadas estatisticamente. Para isto, calcule: O valor médio \bar{n} dos índices de refração:

- a. O erro $(\bar{n} - n_i)$ na medição de cada valor n_i
- b. O desvio padrão: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\bar{n} - n_i)^2}{m-1}}$
- c. O desvio padrão da média: $s = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$
- d. Expresse o valor da medida da forma: $\bar{n} \pm s$

Uma inspeção dos dados da Tabela 2

- Quais são os principais resultados que vocês obtêm?
- Qual é a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de refração. Por exemplo, dobrando do ângulo de incidência de 40° para 80° , que acontece com o valor do ângulo de refração. Portanto, se você realiza um gráfico destes dados que obtém? Faça o gráfico.
- Agora, se o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração fossem traçados, como é o gráfico? Qual é a relação entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo



de refração. Construa o gráfico $\text{sen}(\alpha) \times \text{sen}(\beta)$ e posteriormente relacione com a equação correspondente e calcule o valor das constantes?. Com que lei está relacionada esta parte?

- Determine o índice de refração do objeto usado e compare com o valor encontrado nos livros.

Tabela 2: Relação entre o seno do ângulo de incidência (α) e o seno do ângulo de refração (β)

α (°) Ângulo de incidência	Erro de α (°)	β (°) Ângulo de refração	Erro de β (°)	Sen (α)	Erro de Sen (α)	Sen (β)	Erro de Sen (β)	$n = \frac{\text{Sen}(\alpha)}{\text{Sen}(\beta)}$	Erro de n
0									
10									
20									
30									
40									
60									
80									
90									

Terceira Parte: Refração Reflexão interna total e ângulo limite

Objetivo

- Medir o ângulo limite (crítico) para o qual ocorre o fenômeno da reflexão interna total da luz.

Material utilizado:

- Os mesmos que foram usados na segunda parte desta praticam

Procedimento experimental

1- Disponha o semi-disco sobre um suporte circular graduado (disco de Hart), de forma que a superfície plana do semi-disco coincida com o diâmetro do suporte. Faça incidir a luz laser perpendicularmente à face circular do semi-disco e para duas medidas do ângulo de incidência, anote os respectivos ângulos refratados (Figura 4), preenchendo a Tabela 3. Para o cálculo de n_1 use o índice de refração do ar igual à unidade ($n_2 = 1,0$).

2- Observe o fenômeno da reflexão interna total. Meça o valor do ângulo crítico (α_c) e calcule novamente n_1 .

3- **Discuta os resultados observados**, faça deduções e obtenha as conclusões sobre o que ocorreu com a refração quando o ângulo de incidência foi aumentado até alcançar o chamado ângulo limite.

4- **Discuta o que significa ângulo limite**. Sabendo o valor do ângulo limite encontrado compare-o com o valor medido na experiência anterior.

5- **Demonstre a condição física** para que ocorra a reflexão interna total e deduza a expressão para o valor do ângulo limite.



2- Faça variar o ângulo de incidência e observe o resultado. **Discuta** o que impede a emergência dos raios de luz ou, em outras palavras, o que permite que ocorram as sucessivas reflexões internas totais da luz dentro do tubo de acrílico.

3- **Discuta** também a condição para que isto ocorra. **Faça uma pesquisa** sobre os tipos de Fibras Ópticas e sua relação com a Tecnologia contemporânea quanto à história, áreas de aplicação, vantagens e desvantagens do seu uso.

4- **Questões:** Qual a causa da refração da luz? Qual o significado físico do índice de refração?

Prática 2: Espelhos Esféricos e de Lentes

Introdução teórica: Espelhos e Lentes

Espelhos

É conveniente, em Óptica Geométrica, estudar as propagações luminosas em termos de raios de luz. Os raios são representados por linhas retas na direção em que a luz se propaga. Um objeto luminoso extenso pode ser considerado como um conjunto de pontos separados. Cada ponto do objeto emitirá raios luminosos em todas as direções e em linha reta.

Quando um raio luminoso é refletido em uma superfície polida, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, considerados em relação à normal. Se a superfície refletora for plana, o espelho é denominado plano. Se a superfície refletora for curva, esférica por exemplo, o espelho é denominado côncavo quando a parte espelhada está na face interna da curvatura; se na face externa, o espelho é denominado convexo. O centro de curvatura C é o centro da esfera e o raio de curvatura R , o raio desta esfera. A linha que une o vértice V e o centro de curvatura é denominada eixo principal. Tendo em conta a grande simplificação matemática, neste texto trata-se apenas de espelhos esféricos com pequena abertura. Isso implica que apenas porções do espelho, ao redor do vértice V , são consideradas na formação de imagens.

Um feixe de raios paralelos ao eixo principal reflete-se obedecendo à lei da reflexão, convergindo para um ponto denominado foco, no caso do espelho côncavo; no convexo, o feixe parecerá divergir de um ponto localizado atrás do espelho, como na Figura 6. A distância do foco F ao vértice V é chamada distância focal do espelho, sendo representada por f .

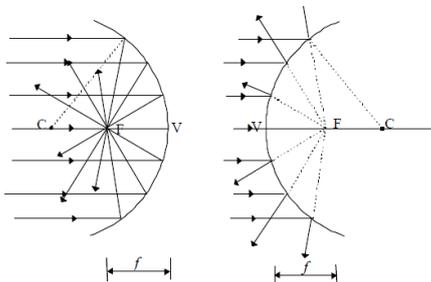


Figura 6: Espelhos esféricos (a) côncavo e (b) Convexo

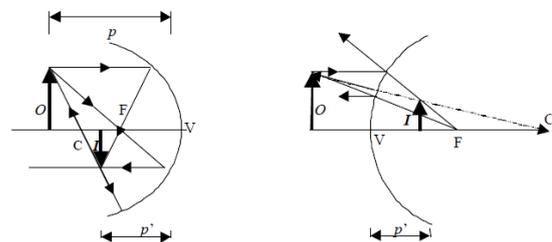


Figura 7: Formação de imagens em espelhos esféricos (a) côncavo e (b) Convexo

Existem regras práticas que permitem a construção da posição da imagem (p'), que pode se **real** (formada pela intersecção de raios refletidos) ou **virtual** (formada pela intersecção dos prolongamentos dos raios refletidos), a partir do conhecimento da posição do objeto (p) e da direção de incidência de dois quaisquer dos três raios principais.

Os três raios principais de um espelho côncavo são:

- Um raio paralelo ao eixo principal reflete-se passando pelo foco;
- Um raio que passe pelo centro de curvatura é refletido sobre si mesmo;
- Um raio que passe pelo foco reflete-se paralelamente ao eixo principal.

A Figura 7 resume a aplicação destas regras práticas a espelhos côncavos e convexos, já que os raios principais para estes últimos são semelhantes.

LENTE

Lente é um meio transparente limitado por duas superfícies curvas. A forma mais comum de lentes são aquelas de faces esféricas, ou uma face plana e outra esférica.

Para efeito de classificação, podem-se dividir as lentes em dois grupos: as lentes convergentes e as divergentes. As lentes convergentes são mais espessas na parte central, ao passo que as divergentes o são nas bordas. O centro de curvatura C_1 é o centro da esfera de raio R_1 que origina uma face da lente; o centro C_2 é o centro da esfera de raio R_2 que origina a outra face da lente. A linha que une os dois centros de curvatura denomina-se eixo principal.

Uma importante simplificação no tratamento matemático das lentes é abstrair sua espessura. Com este propósito, cria-se a figura da lente delgada, isto é, uma lente cuja espessura pode ser desprezada para todas as finalidades de formação de imagem.

Um feixe de raios paralelos ao eixo principal, incidindo numa lente convergente, refrata-se, convergindo para um ponto denominado foco F . A distância do centro geométrico da lente ao foco é a distância focal f da lente. Se o feixe incidir numa lente divergente, o feixe se refrata, divergindo de um ponto localizado no mesmo lado do feixe incidente, formando o foco virtual, como está esquematizado na Figura 8.

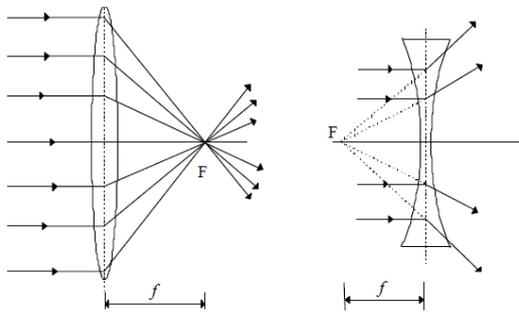


Figura 8: Lentes delgadas (a) convergente e (b) divergente

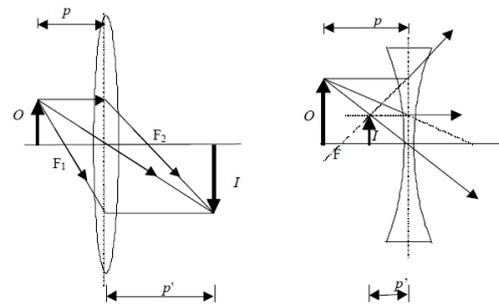


Figura 9: Raios principais das lentes (a) convergente e (b) divergente

Conhecendo-se o tamanho (O) e a distância (p) de um objeto em relação a uma lente, e a direção de incidência de dois dos três raios principais, pode-se determinar graficamente o tamanho (I) e a distância (p') da imagem, tal como foi feito para os espelhos.

Os três raios principais de uma lente convergente são (Figura 9):

1. Um raio paralelo ao eixo principal refrata-se na lente passando pelo foco;
2. Um raio que passe pelo centro geométrico não sofre desvio (porque a lente é delgada e o centro geométrico coincide com o centro ótico);
3. Um raio que passe pelo foco refrata-se na lente e sai paralelamente ao eixo principal.

A seguir apresenta-se um conjunto de equações que se aplicam a espelhos de pequena abertura e lentes delgadas, e que permite determinar algebricamente:

- a. Distâncias focais (f);
- b. Distâncias do objeto (p) e imagem (p') ao espelho ou lente;
- c. Ampliação ou aumento linear (M);
- d. Tamanhos de objeto (O) e imagem (I).

Equação dos pontos conjugados:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (1)$$

Ampliação:



$$M = m = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p} \quad (2)$$

Para espelhos, a equação que relaciona distância focal e raio de curvatura é:

$$f = \frac{R}{2} \quad (3)$$

Para lentes, a “equação dos fabricantes de lentes” relaciona f com os raios de curvatura e o índice de refração da lente com o meio que a envolve, sendo $n = n_2/n_1$, onde n_2 é o índice de refração do material da lente e n_1 o índice de refração do meio que a envolve.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] \quad (4)$$

A utilização das equações acima segue a seguinte convenção de sinais:

- Todas as medidas são feitas a partir do vértice de um espelho, ou centro ótico de uma lente.
- As medidas para determinar a posição de um objeto ou imagem, reais, são positivas.
- As medidas que determinam a posição de um objeto ou imagem, virtuais, são negativas.
- Um cálculo que fornece um resultado negativo implica em objeto ou imagem, virtuais, e resultado positivo, objeto ou imagem reais.
- A distância focal de um espelho côncavo e de uma lente convergente é sempre positiva; para um espelho convexo e uma lente divergente, negativa.
- O tamanho O de um objeto é sempre um número positivo; o tamanho da imagem será positivo se esta for direita (virtual) e negativa se for invertida (real).
- Os raios de curvatura das lentes serão positivos, se dentro da concavidade houver material da lente; caso contrário, negativos.

A Tabela 4 resume o exposto. Examine-a cuidadosamente para se familiarizar com as medidas que serão feitas no laboratório.

Tabela 4: Convenção de sinais para espelhos e lentes

Tabela 1 - Convenção de sinais para espelhos e lentes					
Espelho Côncavo			Lente Convergente		
$f > 0$			$f > 0$		
$p > 0$	$O > 0$		$p > 0$	$O > 0$	
$p' > 0$	$I < 0$	$M < 0$ real	$p' > 0$	$I < 0$	$M < 0$ real
$p' < 0$	$I > 0$	$M > 0$ virtual	$p' < 0$	$I > 0$	$M > 0$ virtual
$R > 0$			$R_1 > 0$	$R_2 > 0$	biconvexa
Espelho Convexo			Lente Divergente		
$f < 0$			$f < 0$		
$p > 0$	$O > 0$		$p > 0$	$O > 0$	
$p' < 0$	$I > 0$	$M > 0$ virtual	$p' < 0$	$I > 0$	$M > 0$ virtual
$R < 0$			$R_1 < 0$	$R_2 < 0$	bicôncava

Procedimento Experimental da Prática 2

Primeira Parte: Distância focal em um espelho esférico

Objetivos

- Medir a distância focal de um espelho esférico e calcular o seu raio de curvatura R .



- Verificar a relação entre a distância focal e o raio de curvatura

Material utilizado:

- 1 Fonte de luz,
- 1 Espelho metálico côncavo e convexo,
- 1 folha branca do tipo
- 1 disco graduado de Hart.

Procedimento experimental

A distância focal de uma lente convergente ou um espelho côncavo podem ser obtidos com o método dos pontos conjugados. Neste método é medida a distância do elemento óptico ao objeto e ao ponto de formação da imagem, sendo estes valores aplicados na equação de Gauss.

1. Montar a lente divergente, a lâmpada e o anteparo no banco óptico, de acordo com o diagrama da Figura 10;
2. Fixar a fonte de luz em um extremo do banco óptico e o anteparo no outro extremo;
3. Ajustar posição da lente de modo a obter a projeção de uma imagem nítida do filamento da lâmpada no anteparo, medindo as distâncias o e i ;
4. Repetir os procedimentos 2 e 3 desta prática para outros 4 valores de distâncias entre a fonte de luz e o anteparo;
5. Organizar os valores medidos em uma tabela (Tabela 2 Tabela por vocês construída), com colunas para o índice da medida, à distância o e seu desvio, à distância i e seu desvio;
6. Repetir os procedimentos de 1 até 4 para o espelho côncavo.
7. Organizar os valores medidos em uma tabela (Tabela 3 Tabela por vocês construída), com colunas para o índice da medida, à distância o e seu desvio, à distância i e seu desvio;
8. **Discutir as observações** em termos do raio de curvatura R e distância focal f .
9. **Deduzir**, a partir da equação ($f = \frac{R}{2}$) os pontos conjugados.

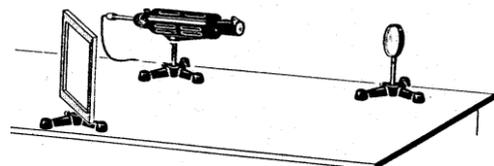
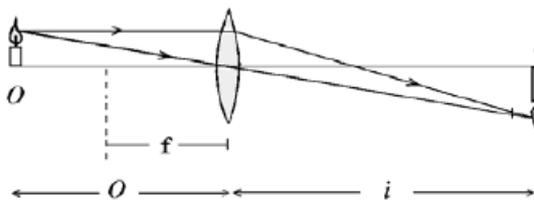


Figura 10: Diagrama para medir a distância focal de um elemento óptico pelo método dos pontos conjugados

Figura 11: Montagem da segunda parte

Segunda Parte: Formação de imagens com espelho côncavo.**Objetivo:**

- Verificar as características da formação de imagens com espelho côncavo.

Material utilizado:

- 1 Fonte de luz,



- 1 Diagrama de flecha,
- 1 espelho Côncavo
- 1 Anteparo Opaco

Procedimento experimental

1- Após montarmos o experimento conforme mostrado na Figura 11 observamos os diversos tipos de imagens no anteparo opaco, que depende da distancia do mesmo ao espelho côncavo.

2- Faça variar a amplificação linear (dada pela eq.2), meça os parâmetros (eles estão definidos na Figura 12 e preencha a Tabela 5.

Tabela 5: calculo da distancia focal quando fixamos a amplificação linear

m	d_o	σ_{d_o}	$1/d_o$	d_i	σ_{d_i}	$1/d_i$	$1/f$	σ_f	\bar{f}
$m = 0.70$									
$m = 0.50$									
$m = 0.40$									

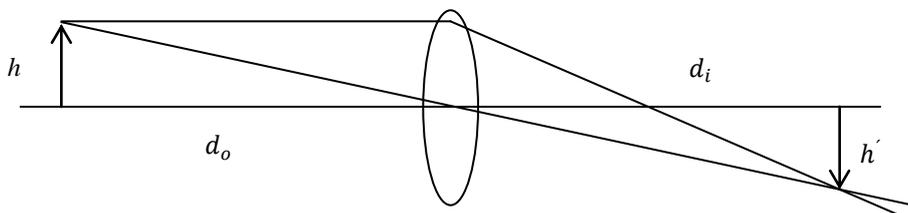


Figura 12: Definição dos parâmetros utilizados

A distância focal é dada por

$$f = \frac{d_o d_i}{d_o + d_i} \text{ ou } \frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

onde d_o é distancias ao objeto e d_i é distancias a imagem

A proporção entre os tamanhos da imagem e objeto e igual à proporção entre as distancias dos mesmos.



$$\frac{T_I}{T_o} = \frac{d_I}{d_o}$$

Terceira Parte: Lentes, formação de imagem e determinação da distância focal.

Objetivo:

- Verificar as propriedades de lentes.

Material utilizado:

- 1 Fonte de luz,
- Condensador,
- 1 anteparo opaco,
- Trilho,
- Suporte de lente,
- Lentes convergentes e divergentes com diferentes distâncias focais.

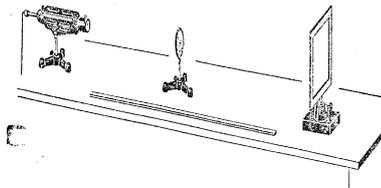


Figura 13: Arranjo experimental da terceira parte

Procedimento experimental

1. O sistema é montado conforme mostra a Figura 13.
2. Na frente do condensador colocar uma seta, com a ajuda do anteparo ir ajustando a posição da fonte de luz e o condensador para obter uma imagem nítida da seta no anteparo.
3. Colocar diferentes lentes, convergentes, divergentes, convexas, côncavas, entre o anteparo e a seta e verificar a distancia onde se forma uma imagem nítida da seta. **Algumas lentes não formam imagem, porque?**
4. Para uma lente particular, determinar 10 pares de valores (distancia lente-objeto e distancia lente-imagem). Coloque estes dados na Tabela 6. Com a ajuda de uma regressão linear determinar a distancia focal da lente. **CUIDADO COM O TRATAMENTO ESTATÍSTICO.**

É importante ressaltar que para cada distância objeto-lente, é necessário achar a posição correta do anteparo para obter uma imagem nítida, apenas desta forma será possível verificar a lei que relaciona a distância d_o (imagem-lente), distância d_i (imagem-lente) e distância focal f .

Atenção: cuidado com a determinação do erro de d_i e h' .

5. Durante a coleta dos 10 pares de valores anteriores, determinar também as dimensões da imagem e do objeto.
6. Observar que em certas circunstancias a imagem que se forma está invertida em relação ao objeto (neste caso a seta). Para que distancia ocorre essa inversão? Determinar a distância



focal em apenas uma medida utilizando este fato. Comparar com o valor obtido na regressão linear (tanto o valor em si quanto o erro).

Tabela 6: relação entre: distâncias imagem – objeto e tamanho objeto – tamanho imagem. As constantes estão definidas na Figura 12.

d_o (cm)	<i>Erro</i> d_o (cm)	d_i (cm)	<i>Erro</i> d_i (cm)	h (cm)	<i>Erro</i> h (cm)	h' (cm)	<i>Erro</i> h' (cm)	$\frac{h'}{h}$	<i>Erro</i> h'/h	$\frac{d_o}{d_i}$	<i>Erro</i> d_o/d_i



Prática 3: Instrumentos Ópticos

Nesta experiência observaremos que combinando diversos tipos de lentes é possível estudar o princípio de funcionamento de instrumentos ópticos simples, tais como luneta e microscópio.

Tópicos que devem ser estudados para poder fazer a prática: lentes convergentes e divergentes, formação de imagem, imagem direta ou invertida, distância focal, aumento, determinação de aumento em instrumentos ópticos, diferenças entre microscópio e luneta. Mais antes vamos a revisar alguns conceitos e curiosidades.

Introdução teórica: Instrumentos ópticos

Como nós enxergamos?

Nossos olhos são como uma câmara fotográfica. Ambos têm uma abertura para a passagem de luz, uma lente e um anteparo onde a imagem é recebida e registrada. Simplificando, vamos considerar possuindo uma única lente convergente biconvexa (meios transparentes, mais o cristalino) situada a 5 mm da córnea e a 15 mm da retina. Quando os raios de luz provenientes de um objeto (Figura 14) atravessam essa lente, forma uma imagem real e invertida localizada exatamente sobre a retina para que ela seja nítida. A retina transmite as informações ao cérebro, através do nervo ótico, que processa uma inversão da imagem fazendo com que nós vejamos o objeto na sua posição normal. É assim que a gente vê.

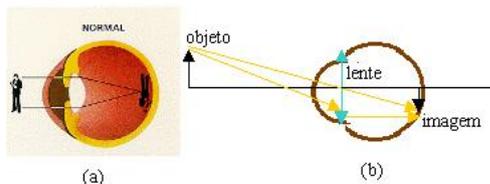


Figura 14: a) No olho normal a imagem se forma sobre a retina b) Esquema da formação da imagem no olho.

Para podermos enxergar os objetos em diferentes posições, nosso olho se acomoda variando a distância focal da lente do olho. O cristalino, que é uma lente convergente, possui ligado a ele um conjunto de músculos provocando variações nas curvaturas de suas faces e conseqüentemente na distância focal. Portanto, para uma determinada posição do objeto, os músculos ajustam a distância focal do cristalino para que a imagem seja formada sobre a retina. Essa propriedade do olho é denominada *acomodação visual*.

Uma pessoa de visão normal pode enxergar objetos situados desde uma distância média convencional de 25 cm (posição conhecida como *ponto próximo*) até o infinito. Tem pessoa que possui diferentes defeitos de visão tais como

- **Miopia:** A pessoa que possui miopia tem o globo ocular um pouco mais alongado que o normal. Nesse caso a imagem se forma antes da retina e a pessoa não enxerga o objeto com nitidez. Para corrigir a miopia usa-se lente divergente para diminuir a convergência dos raios luminosos, fazendo com que a imagem se forme sobre a retina.
- **Hipermetropia:** ao contrário da miopia as pessoas com hipermetropia, apresentam o globo ocular mais curto que o normal, fazendo com que a imagem se forme atrás da retina. Para corrigi-la usa-se uma lente convergente para aumentar a convergência dos raios fazendo com que a imagem se forme exatamente sobre a retina.
- **Presbiopia ou "vista cansada"** Quando a pessoa vai envelhecendo, o cristalino vai perdendo a elasticidade e a pessoa fica com dificuldade para enxergar de perto. A imagem do objeto se forma depois da retina como na hipermetropia. Para corrigir, é utilizada uma lente convergente.



Instrumentos de projeção

- **Maquina de Fotos** O funcionamento de uma máquina fotográfica é muito semelhante ao olho humano. Na máquina existe um sistema denominado de objetiva. Esse sistema funciona como uma lente convergente que forma uma imagem real e invertida do objeto que está sendo fotografado. Para que se possa obter uma boa imagem, ou seja, para que ela fique bem nítida, a máquina possui um dispositivo que tem a capacidade de regular a posição da objetiva, deixando o objeto mais perto ou longe da mesma. A luz proveniente do objeto ao entrar na câmera penetra sobre o filme, onde ocorrem reações químicas fazendo com que a imagem fique nele.
- **Câmera digital** A câmera digital registra as imagens utilizando um sensor CCD, dispositivo de carregamento duplo, ou CMOS, sensor semiconductor complementar de óxido metálico, que transforma a luz em um mapa de impulsos elétricos, que são armazenados em um cartão de memória. Estas imagens são visualizadas instantaneamente e caso o resultado não seja satisfatório podem ser apagadas. Estas imagens podem ser visualizadas em computadores, através de álbum virtual, e-mail ou em telas de tv e ainda ser reveladas por impressão digital.
- **Projetor de slides** Um projetor de *slides* (diapositivos) serve para projetar em uma tela uma imagem real e aumentada do objeto que está no *slide*. Basicamente, ele é constituído de uma lente convergente, como objetiva, e uma lâmpada cujo filamento está situado no centro de curvatura do espelho côncavo que juntos servem para iluminar com bastante intensidade o *slide*. Para obter uma imagem real, maior e aumentada, o slide precisa estar situado a uma distância menor que a dupla distância focal (antes do foco),

Instrumentos de observação

- **Lupa** A lupa é uma lente convergente que fornece uma imagem virtual direita e aumentada de um objeto real (Figura 15). Neste caso o objeto está situado entre o foco e o centro ótico da lente



Figura 15: A lupa faz com que a imagem do objeto seja maior e virtual



Figura 16: Microscópio composto e seus componentes

- **Microscópio composto:** Um microscópio ótico é utilizado para observar objetos de pequenas dimensões. A Figura 16 mostra um microscópio ótico composto e seus componentes. A parte ótica do microscópio é constituída basicamente de duas lentes convergentes, geralmente compostas, associadas coaxialmente (possuem o mesmo eixo ótico), que são:
 - a) objetiva que está próxima ao objeto.
 - b) ocular com a qual observamos a imagem fornecida pela objetiva.

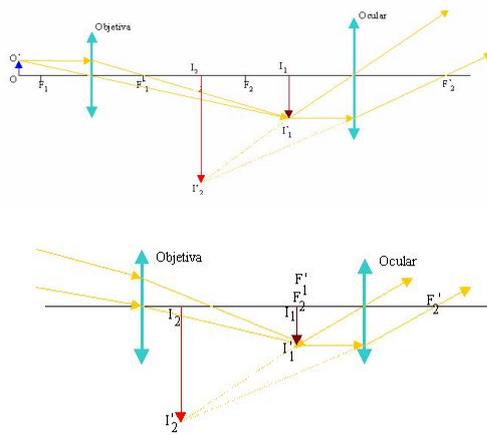


Figura 17: Formação da imagem em um microscópio composto

Figura 18: Esquema simplificado de formação da imagem em uma luneta astronômica.

Na Figura 17 apresenta-se um esquema simplificado do microscópio. Na Figura 17 temos que a objetiva, que tem uma pequena distância focal da ordem de milímetros, fornece do objeto OO' uma imagem real e invertida I_1I_1' . Esta imagem I_1I_1' , serve como objeto para a ocular, que fornece uma imagem I_2I_2' , virtual, maior e invertida com relação ao objeto OO'' , que é a imagem final.

O aumento linear transversal A do microscópio é dado pela expressão:

$$A = \frac{I_2I_2'}{OO'} \quad (1)$$

Vamos multiplicar a expressão (1) por I_1I_1'/I_1I_1' obtendo:

$$A = \frac{I_2I_2'}{OO'} \frac{I_1I_1'}{I_1I_1'} \quad (2)$$

Como $\frac{I_1I_1'}{OO'} = A_{objetiva}$ é o aumento linear transversal da objetiva e $\frac{I_2I_2'}{I_1I_1'} = A_{ocular}$ é o aumento linear transversal da ocular, obtemos:

$$A = A_{objetiva} A_{ocular} \quad (3)$$

Conclusão: O aumento linear do microscópio é igual ao produto do aumento linear transversal da objetiva pelo aumento linear transversal da ocular. Os aumentos dos microscópios variam entre 300 e 2000 vezes. Não pode ser maior que estes valores porque quando as dimensões, a serem observadas, forem da ordem do comprimento de luz, ocorre o fenômeno da difração, fazendo com que se perca a nitidez da imagem. Já os microscópios eletrônicos, que utilizam feixes de elétrons, produzem aumentos superiores a 100 000 vezes.

➤ Lunetas

o **Luneta astronômica** A luneta ou telescópio de refração é utilizada para observar objetos distantes. A luneta astronômica tem como o microscópio, duas lentes convergentes: a objetiva que ao contrário do microscópio apresenta grande distância focal e a ocular. O esquema da Figura 18 mostra como é obtida a imagem de um objeto distante. A objetiva forma a imagem I_1I_1' sobre seu foco e esta imagem vai servir como objeto para a ocular que fornece a imagem final do sistema I_2I_2' que é virtual e invertida. Observe que os focos da ocular e da objetiva praticamente coincidem. O aumento visual de uma luneta é expresso pela relação entre as distâncias focais da objetiva (f_1) e da ocular (f_2):



$$A = \frac{f_1}{f_2} \quad (4)$$

A desvantagem da luneta astronômica para observar objetos terrestres é que ela fornece uma imagem invertida.

o **Luneta terrestre:** A luneta terrestre é semelhante à astronômica só que a imagem final obtida é direita. A Figura 19 mostra a luneta terrestre construída por Galileu em 1609. Esta luneta tem como elemento característico uma ocular divergente. A objetiva é uma lente convergente. A distância entre as duas lentes é aproximadamente igual à diferença entre as duas distâncias focais (na construção do telescópio coloca-se esta distância igual). A primeira imagem I_1I_1' , fornecida pela objetiva, se forma sobre o foco imagem da objetiva (F_1'). Esta imagem vai servir como objeto virtual para a ocular. A imagem final I_2I_2' é direita, virtual e maior (Figura 20).

O aumento angular de uma luneta (A) é dado pela expressão:

$$A = - \frac{f_1}{f_2} \quad (4)$$

onde f_1 é a distância focal da objetiva e f_2 é a distância focal da ocular.

Obs: Os telescópios de reflexão (Figura 21) utilizam um espelho parabólico côncavo no lugar da lente objetiva. A vantagem é que se têm menos aberrações e por causa disto os telescópios de reflexão são mais utilizados nos observatórios. Outra vantagem é o baixo custo

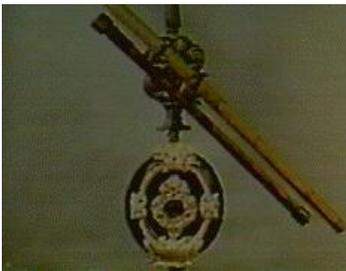


Figura 19: Luneta construída por Galileu

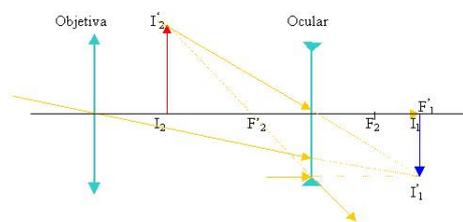


Figura 20: Formação da imagem em uma luneta terrestre.



Figura 21: Telescópio de reflexão de Newton

Procedimento Experimental da Prática 3

Primeira Parte – Luneta e determinação do aumento da luneta.

Objetivo:

- Verificar as equações que regem a formação da imagem na luneta e seu aumento.

Material utilizado:

- Trilho,
- Suporte de lente,
- Lentes convergentes e divergentes com diferentes distâncias focais,
- Régua.



Atenção: Para cada instrumento montado, **escolher 2 ou 3 objetos** que serão utilizados para medir os diferentes parâmetros e logo trocar as lentes (tanto da objetiva quanto da ocular) para verificar as diferentes equações.

Procedimento experimental

É possível montar dois tipos de lunetas, utilizando duas lentes positivas (telescópio tipo Kepler) e utilizando uma lente positiva e outra negativa (telescópio tipo Galileu). Para determinar a margnificação dos sistemas é necessário lembrar que deve ser utilizada a magnificação angular do olho humano.

- 1- O esquema da formação da imagem é mostrado, monte os respectivos sistemas conforme mostra a Figura 18.
- 2- Com ajuda do trilho e dos suportes procure a **distancia entre as lentes onde se obtém uma imagem nítida.**
- 3- Esta distância entre as lentes onde se obtém a imagem nítida **apresenta certa particularidade com as distâncias focais. Você poderia dizer qual é?** Isto acontece tal como está descrito nas referencias bibliográficas? **NÃO SE ESQUEÇA DE DETERMINAR OS RESPECTIVOS ERROS!**
- 4- Determinar o aumento e compare-lo com o aumento calculado teoricamente.
- 5- Dependendo do tipo de luneta montada (tipo Galileu ou Depler), **a imagem que se forma pode ser direta ou invertida, pode explicar?**
- 6- Faça os do item 1 ao 5 para dois objetos diferentes e repita 4 vezes cada medida, coloque estes dados na Tabela 7

Tabela 7: relação entre tamanho da imagem e do objeto para uma luneta

<i>Objeto</i>	Número de medidas	<i>Distância entre as lentes</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Erro h (cm)</i>	<i>h' (cm)</i>	<i>Erro h' (cm)</i>	<i>m Aumento linear</i>	<i>Erro aumento linear</i>
Objeto 1	1							
	2							
	3							
	4							
Objeto 2	1							
	2							
	3							
	4							

Segunda Parte – Microscópio e determinação do aumento.

Objetivo:

- Verificar as equações que regem a formação da imagem na luneta e seu aumento.

Material utilizado:

- Trilho,
- Suporte de lente,
- Lentes convergentes e divergentes com diferentes distâncias focais,
- Régua,
- Suporte plano.

**Procedimento experimental**

Para determinar o aumento, também neste caso é necessário observar o aumento angular.

1. O esquema da formação da imagem é mostrado, monte os respectivos sistemas conforme mostra a Figura 17.
2. Com ajuda do trilho e dos suportes procure a **distancia entre as lentes onde se obtém uma imagem nítida.**
3. Esta distância entre as lentes onde se obtém a imagem nítida **apresenta certa particularidade com as distâncias focais. Você poderia dizer qual é?** Isto acontece tal como está descrito nas referencias bibliográficas? **NÃO SE ESQUEÇA DE DETERMINAR OS RESPECTIVOS ERROS!**
4. Determinar o aumento e compare-lo com o aumento calculado teoricamente.
5. **A imagem que se forma pode ser direta ou invertida, pode explicar?**
6. Faça os do item 1 ao 5 para dois objetos diferentes e repita 4 vezes cada medida, coloque estes dados na Tabela 8
7. Sobre o trilho monte o sistema de acordo com o esquema mostrado na Figura 3-2.
8. **A imagem formada é direta ou invertida? É possível fazer uma montagem tal como no telescópio tipo Galileu para obter imagens diretas?**
9. Determinem a magnificação por comparação (aumento linear e angular)

Tabela 8: relação entre tamanho da imagem e do objeto para um microscopio

<i>Objeto</i>	<i>Número de medidas</i>	<i>Distância entre as lentes</i>	<i>h (cm)</i>	<i>Erro h (cm)</i>	<i>h' (cm)</i>	<i>Erro h' (cm)</i>	<i>m Aumento linear</i>	<i>Erro aumento linear</i>
Objeto 1	1							
	2							
	3							
	4							
Objeto 2	1							
	2							
	3							
	4							

Nestes experimentos estudamos o principio de funcionamento de telescópios simples ou lunetas. Dois tipos de telescópios foram montados, um onde se observa à formação direta da imagem e outro com imagem invertida. Na formação da imagem do microscópio é importante considerar o aumento angular.

Atenção: no relatório, não se esqueça de comparar os aumentos teóricos (de acordo com a fórmula encontrada no livro) e o medido (comparando as alturas da imagem e do objeto).



Prática 4: Dispersão da Luz

O efeito mais conhecido dos prismas, provavelmente devido ao seu maior impacto histórico e científico, é a *dispersão da luz branca*, isto é, o espalhamento da luz branca em suas cores componentes. A dispersão deve-se a dependência do índice de refração com o comprimento de onda da radiação. No prisma, como há duas refrações, o desvio se acentua tornando o fenômeno mais facilmente observável.

Tópicos relacionados: Dispersão ou espalhamento da luz, refração (ou desvio), índice de refração.

Introdução

A luz ao incidir sobre a face de um prisma atravessa-o e emerge na outra interface, sofrendo um desvio em relação à direção de propagação inicial. Se os raios emergentes forem projetados em uma tela, o resultado é ilustrado na Figura 22. Portanto, pode-se deduzir que o índice de refração n de um material varia com o comprimento de onda.

Qual o significado físico da dependência de n com o comprimento de onda? A resposta para esta pergunta depende, em última análise, do tipo de interação entre uma onda eletromagnética e o conjunto de átomos que constituem um meio dielétrico.

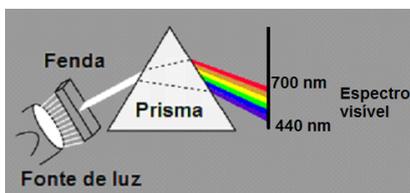


Figura 22: Separação das cores por um prisma é um exemplo de dispersão.

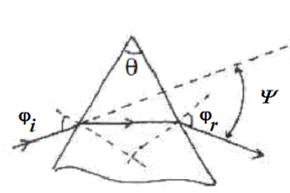


Figura 23: Desvio angular ψ da direção de propagação inicial θ_i de um raio de luz monocromática ao incidir em um prisma

Um feixe de luz no ar incide na face de um prisma de vidro como mostra a Figura 23. O ângulo de incidência θ_i é escolhido de modo que o raio que emerge também faz um ângulo θ_r com a normal à outra face [ver refs.]. Neste caso, o ângulo de desvio é chamado de ângulo de desvio mínimo e depende do ângulo de incidência:

$$\psi_m = \psi_m(\theta_i) \quad (1)$$

DEDUZIR E FAZER O GRÁFICO isto deve estar no relatório!!!!!!!!!!!!!!

Em um determinado material, para cada comprimento de onda existe um índice de refração. A relação entre o índice de refração n , o ângulo do prisma φ e o desvio ψ (a ser deduzida pelo estudante), é expressa por:

$$n = \frac{\text{sen}\left(\frac{\theta + \psi_m}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2)$$

onde θ é o ângulo do prisma e ψ_m o desvio angular mínimo. **(DEDUZIR a equação 2 e mostrar os cálculos no relatório)**



Procedimento Experimental da Prática 4

Primeira Parte: Dispersão da luz no prisma

Objetivo:

- Verificar como a luz branca se dispersa quando ela atravessa um prisma.
- Avaliar o ângulo de desvio mínimo
- Determinar o índice de refração (aproximado) de um prisma
- Verificar que o índice de refração de um material é um parâmetro dependente do comprimento de onda da luz.
- Calcular o índice de refração do prisma e determinar a natureza do material de que é feito o prisma.

Material:

- 1 fonte de luz (lâmpada),
- 1 prisma equilátero de água,
- 1 prisma equilátero de vidro,
- 1 mesa suporte redonda (para prisma),
- 1 lente (distância focal $f = +30\text{ cm}$),
- 1 Anteparo.

Tarefa

Verificar o desvio da luz após colocar um prisma no caminho. Estabelecer o “*desvio mínimo*” Ψ_m e verificar sua dependência com o ângulo de incidência, $\Psi_m = \Psi_m(\theta_i)$. Sugestão: Gire lentamente o prisma e varie o ângulo de incidência. Por triangulação, medir o ângulo de *desvio mínimo* Ψ_m . **Sugestão:** Meça os catetos de triângulo formado pelos raios antes e após o desvio e calcular o índice de refração n dos prismas usados com o auxílio da eq. 1 (não se esqueça de colocar no relatório **DEDUZIR E FAZER O GRÁFICO**)

Procedimento experimental

1. Inicialmente, um feixe de luz da lâmpada passa por uma fenda colimadora e depois por uma lente convergente ($f = 15\text{ cm}$). Projete a luz da fenda no anteparo.
2. Introduza o prisma no caminho da luz e gire-o para obter o desvio mínimo do feixe de luz.
3. Um feixe luz da lâmpada incide sobre uma das faces do prisma interceptando o feixe de luz. Gire este prisma até que se forme no anteparo a dispersão da luz.
4. Meça o desvio por triangulação e calcule o ângulo de desvio mínimo ψ_m .

Segunda Parte - Indecomponibilidade das cores espectrais

Objetivos

- Verificar se as cores espectrais emergentes de um prisma podem ser, novamente, decompostas em outras cores por um segundo prisma;
- Recompôr o espectro da luz branca.

Material utilizado:

- 1 lâmpada,
- 2 prisma de vidro equiláteros,
- 1 lente (+30 cm),



- 1 porta prisma,
- 1 anteparo opaco.

Procedimento Experimental

Do espectro obtido com ajuda do primeiro prisma se faz passar pela fenda uma região estreita do espectro. Em outras palavras, seleciona-se uma cor. Girando o banco óptico pode-se fazer passar qualquer região de cor do espectro através da segunda fenda. A luz que passa pela segunda fenda é novamente desviada pelo segundo prisma colocada detrás dela. O porta-prisma pode ser girado em seu eixo vertical e permite colocá-lo novamente em um desvio mínimo.

Questões que devem ser discutidas na conclusão ou seja devem estar no relatório:

- 1- Cada cor (ou correspondente comprimento de onda) apresenta um mesmo desvio mínimo?
Deste modo
 - a. Pode-se afirmar que há um índice de refração para cada cor?
 - b. A indecomponibilidade das cores não está em contradição com a reversibilidade do caminho óptico observada na experiência de *Propagação da Luz*?

Pratica 5: Lei Fotométrica da Distância

A intensidade da luz observada de uma fonte de luminosidade constante decai com o quadrado da distância do objeto. Isto é conhecido como a lei do inverso do quadrado para a intensidade luminosa. Sendo estritamente geométrica em sua origem, a lei do inverso do quadrado aplica-se a diversos fenômenos físicos (força gravitacional, campo elétrico, radiação).

Teoria

A intensidade de uma onda representa a energia que esta transporta. Toda fonte pontual que espalhar sua influência igualmente em todas as direções obedecerá à lei quadrada inversa. A intensidade da influência em qualquer raio r é a potência da fonte dividida pela área da esfera (ver Figura 24).

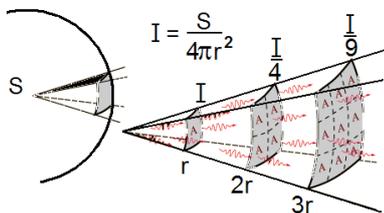


Figura 24: Geometria da lei do inverso do quadrado para a intensidade luminosa I de uma fonte S .

Uma fonte pontual de luz de intensidade luminosa I emite um fluxo de luz através de um ângulo sólido. A intensidade luminosa medida em candela em um elemento de ângulo sólido $d\omega$ é expressa por:

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} [cd] \quad (1)$$

O fluxo de luz de uma fonte luminosa é igual à intensidade em candela multiplicada pelo ângulo sólido sobre o qual a luz é emitida. Para uma fonte, que emite uma intensidade luminosa I candelas, o elemento de fluxo luminoso dF através de um elemento de ângulo sólido dR é dado por:

$$\phi = IdR \quad (2)$$

Se um elemento de área dA é iluminado por um fluxo luminoso $d\phi$, a irradiância I (lx) é:

$$I = \frac{d\phi}{dA}$$

como o elemento de ângulo sólido

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \quad (3)$$

Sendo assim, obtém-se que a irradiância é expressa por:

$$I = \frac{1}{r^2} \frac{d\phi}{d\omega} \quad (4)$$

A equação acima descreve a lei fotométrica da distância. De acordo com esta equação, a irradiância da fonte puntiforme sobre uma superfície decresce proporcionalmente com o quadrado da distância r para uma fonte que emite uma intensidade luminosa constante.

Objetivo

- Verificar a lei do inverso do quadrado para a intensidade luminosa emitida por uma fonte de luz.



Procedimento Experimental da Prática 5

Material:

- 1 lâmpada incandescente comum (220 V),
- 1 laser
- 1 vela
- 1 detector de luz,
- 1 medidor de luz,
- 1 régua (de um metro),
- 1 trilho,
- 2 pinos,
- 2 suporte para os pinos.

Problema

- I. A irradiância² luminosa emitida por uma fonte de luz puntiforme varia com a distância à fonte. A dependência da irradiância emitida por uma fonte puntiforme com a distância deve ser verificada experimentalmente.
- II. **Os dados experimentais devem ser comparados com a teoria** da lei fotométrica da distância fazendo-se um ajuste de curva com uma função do recíproco do valor do quadrado da distância.

Procedimento Experimental

1. Faça a montagem da prática como é mostrada na Figura 25

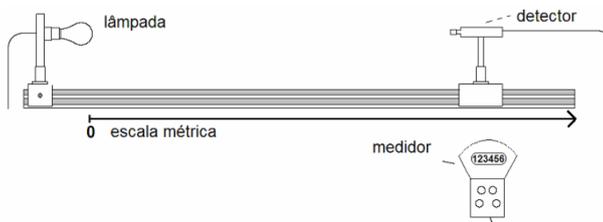


Figura 25: Arranjo sobre o trilho óptico para investigar a lei fotométrica da distância.

2. Ligue a lâmpada (220V) a uma tomada e o detector de luz no medidor. Coloque-os bem distantes para obter uma melhor sensibilidade do detector. Ligue e desligue a lâmpada para ver se o detector está funcionando corretamente.
3. Medir a Iluminância incidente sobre o sensor para diversas distâncias L entre o filamento da lâmpada e a superfície do sensor, sendo a distância mínima 10 cm e a máxima 120 cm, em pelo menos 10 pontos colete os valores medidos e anote-os na Tabela 9.
4. Repita este mesmo procedimento cinco vezes para avaliar o desvio padrão.
5. A partir dos dados da Tabela, construir um gráfico da dependência da Iluminância em função da distância.

² Irradiância é atualmente o termo utilizado para designar o *fluxo de energia por unidade de área e por unidade de tempo* que ilumina uma superfície. Utilizava-se o termo *intensidade*, atualmente em desuso devido acordo internacional.

Prática 6: Interferômetros: Espelho Duplo de Fresnel

Introdução

Os fenômenos de interferência podem ser estudados (e usados em certas aplicações), de uma forma controlada, utilizando-se dispositivos designados genericamente por interferômetros. Estes podem dividir-se em duas grandes classes: *interferômetros de divisão da frente de onda e interferômetros de divisão de amplitude*. No primeiro caso, de que é exemplo o sistema baseado no espelho duplo de Fresnel (do físico francês Augustin Jean Fresnel 1788-1827) que será estudado neste trabalho, partes espacialmente distinta da frente de onda primária permitem gerar ondas secundárias, quer diretamente, quer com o auxílio de sistemas ópticos adicionais; estas ondas secundárias posteriormente interferem. Nos interferômetros de divisão de amplitude (de que o inter de Michelson é exemplo), a onda primária dá origem, por simples divisão da respectiva potência propagante, a duas ondas com a mesma estrutura, que se propagam ao longo de trajetórias distintas e que, uma vez sobrepostas, interferem.

O interferômetro associado ao espelho duplo de duplo de *Fresnel* é ilustrado na Figura 26. O espelho é constituído por dois espelhos planos, que fazem entre eles um ângulo α pequeno. A frente de onda proveniente da fonte pontual S incide em ambos os espelhos. Uma parte dessa frente de onda é refletida por um dos espelhos, e a outra pelo outro espelho. Na região de sobreposição entre as duas ondas secundárias ocorre interferência. Tudo se passa, na realidade, como se as duas ondas fossem provenientes de duas fontes (virtuais) distintas, S_1 e S_2 separadas pela distância a . Como se verá na secção seguinte, a análise do interferograma e a determinação de a a partir da geometria do interferômetro (para o que será necessário aplicar-se relações simples de Óptica Geométrica) permitirão determinar o comprimento de onda da fonte óptica.

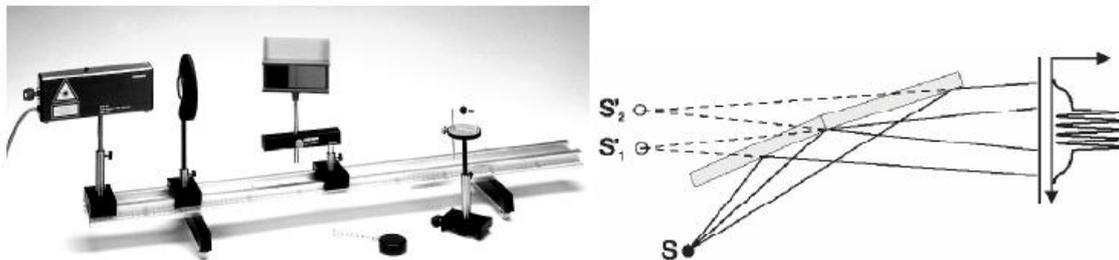


Figura 26: a) material utilizado para o experimento, b) esquema explicativo sobre o processo que leva a interferência com o espelho duplo de Fresnel

Considerações gerais

Considerem-se, por simplicidade, duas ondas planas monocromáticas \vec{E}_1, \vec{E}_2 :

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1)$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2)$$

E sua sobreposição $\vec{E} = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t)$ Dado que, para ondas ópticas, a frequência é da ordem de $\omega/2\pi \sim 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$, os detectores apenas medem o valor médio temporal $\langle \rangle$ da intensidade, que é proporcional a

$$I(\vec{r}) = \langle \vec{E}^2 \rangle = \langle \vec{E} \cdot \vec{E} \rangle$$

Assim resulta que:



$$I(\vec{r}) = \langle \vec{E}_1^2 \rangle + \langle \vec{E}_2^2 \rangle + \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \left(\frac{E_{01}^2}{2} \right) + \left(\frac{E_{02}^2}{2} \right) + \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \varepsilon_2)$$

$$I(\vec{r}) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi)$$

Sendo:

$I_{1,2}$ as intensidades das ondas individuais consideradas no ponto (\vec{r}),

$\Phi = (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ a diferença de fase, no ponto considerado (\vec{r}), entre as duas ondas.

Assim, num ponto de observação (\vec{r}), a intensidade I dependerá da diferença de fase Φ variando entre extremos:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (\text{interferência construtiva})$$

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (\text{interferência destrutiva})$$

A intensidade $I(\vec{r})$ pode ainda ser escrita como

$$I(\vec{r}) = I_0 [1 + V \cos \Phi]$$

em que V é a visibilidade.

Considerando ondas esféricas

$$\vec{E}_1(\vec{r}_1, t) = \vec{E}_{01}(r_1) \cos(k \cdot r_1 - \omega t + \varepsilon_1)$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}_2, t) = \vec{E}_{02}(r_2) \cos(k \cdot r_2 - \omega t + \varepsilon_2)$$

(cujas amplitudes variam com a distância segundo $1/r$, resulta ainda que

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi)$$

Sendo agora que $\Phi = k \cdot (r_1 - r_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$

Para observar um bom padrão de interferência é necessário que:

- A frequência ω das ondas seja igual;
- A diferença de fase ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$) permaneça constante no tempo (o que se consegue, geralmente usando uma única fonte primária para obter as duas ondas interferentes);
- A razão das intensidades individuais I_1/I_2 seja próximo de um,
- No produto escalar dos vetores amplitude $\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} = E_{01} \cdot E_{02} \cos(\alpha_{12})$, seja α_{12} próximo de zero (com α_{12} o ângulo relativo das polarizações).

Análise do interferômetro

A Figura 27 esquematiza o princípio de funcionamento do interferômetro baseado no Espelho duplo de Fresnel (repare que a configuração é semelhante a das fendas de Young). Assume-se que a fonte S é pontual e que o ângulo entre os espelhos é pequeno (entre 1° e 2°). A figura sugere que seja equivalente, do ponto de vista do plano de observação, afirmar-se que existem duas fontes pontuais (virtuais) S_1 e S_2 , separadas de a e distantes s do plano de observação, propagando-se livremente até o plano de observação.

A partir das relações seguintes da Óptica Geométrica

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

(equação da conjugação objeto-imagem da lente de distância focal f)

$$A = \frac{b}{g} = \frac{a'}{a}$$

(relação entre a ampliação lateral e a razão das distâncias conjugadas)

Obtêm-se as relações que permitem determinar a e s (notar que $s = g + b$):

$$s = \frac{f}{aa'} [a + a']^2$$

Assim, conhecendo f e medindo b e a' , determina-se a , e daí o valor de s .

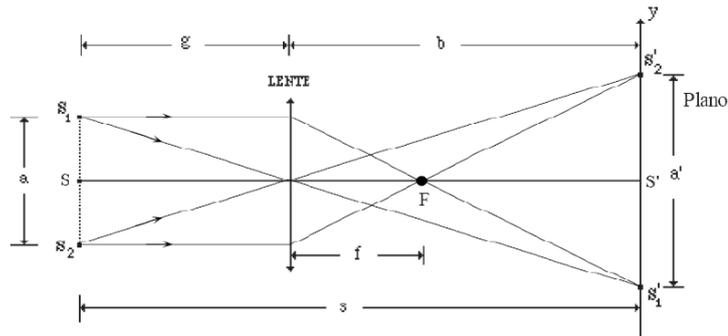


Figura 27: esquema do funcionamento para obtenção das equações que governam o funcionamento do Espelho duplo de Fresnel (comparar com Figura 6-1b).

Procedimento experimental da pratica 6

OBJETIVOS:

- Familiarização com fenômenos de interferência (utilizando um interferômetro de divisão de frente de onda – espelho duplo de Fresnel e bi prisma de Fresnel);
- Determinação do comprimento de onda da luz emitida por um laser de He-Ne através da utilização das leis da Óptica Geométrica.

MATERIAL:

- Biprisma Fresnel
- Suporte para Prisma
- Espelho Fresnel
- Lente $f + 20$ mm
- Lente $f + 300$ mm
- Porta lente
- Banco Óptico
- Laser, He-Ne 1.0 mw, 220 V AC

Procedimento experimental:

- 1- Faça a montagem indicada na Figura 26-a mais use dois lasers no lugar de um. Ajuste o sistema óptico para poder observar as linhas de interferência. Discutir o que vocês observaram.
- 2- Implemente a montagem indicada nas Figura 26 e Figura 27.
- 3- As lentes convergentes devem ter distâncias focais de 2 e 300mm, respectivamente.
- 4- A segunda lente deve ser colocada apenas na segunda etapa, para determinação de s .
- 5- Ajuste o sistema óptico (sem a segunda lente) de forma a obter, no plano de observação, franjas de interferência.
- 6- Meça a distância D entre N franjas brilhantes (um valor razoável para N pode ser entre 10 e 20), considerando franjas em torno do centro do padrão de interferência. Determine o período das franjas, δ , a partir da relação

$$\delta = \frac{D}{N - 1}$$



7- Introduza no sistema a segunda lente (entre o espelho duplo e o plano de observação), e ajuste a sua posição de forma a ter-se, nesse plano, **imagens bem nítidas** das fontes virtuais. Determine a distância entre a lente e o plano de observação (b) e a distância, no plano de observação entre as imagens da fonte S (a).

8- A partir das medidas efetuadas, calcule o valor experimental λ_{exp} para o comprimento de onda da radiação emitida pelo laser de He-Ne:

$$\lambda_{exp} = \frac{a}{s} \delta$$

Com

$$a = \left[\frac{f}{b-f} \right] a'$$
$$s = \frac{f}{aa'} [a + a']^2$$

9- **Compare este resultado** com o valor conhecido ($\lambda = 632,8\text{nm}$). **Utilizando os seus conhecimentos de análise de erros**, determine o erro com que se obteve λ_{exp} . Avalie a consistência dos resultados.

10- Repita a experiência utilizando o biprisma de Fresnel.

**Prática 7: Difração da luz**

A difração da luz, observada pela primeira vez por Grimaldi, é um fenômeno que ocorre tipicamente por causa da natureza ondulatória da luz. Ele observou que *faixas de luz* no interior da zona de sombra de uma vara exposta a uma pequena fonte. Eis aqui a primeira pedra da teoria ondulatória da luz.

Quando uma frente de onda encontra um obstáculo, ela se desvia da direção em que se propagava de modo a penetrar na região de “sombra” do obstáculo tendendo a contorná-lo. Este fenômeno, chamada *difração*, ocorre com qualquer espécie de onda, seja ela mecânica ou eletromagnética.

Teoria

A difração só se torna possível quando as dimensões do obstáculo ou da abertura são menores ou da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda.

Se a luz de comprimento de onda λ incide sobre uma fenda de largura b , cada ponto luminoso ao longo da fenda age como uma nova fonte de onda esférica. O padrão de difração é formado em um anteparo em consequência da interferência destas novas ondas. Se esta difração for tratada de acordo com a aproximação de *Fraunhofer*, a intensidade no ponto P sobre o anteparo, usando os símbolos da Figura 28, é expressa por:

$$I = \frac{C \left[\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda}\right) \sin(\theta) \right]^2}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin(\theta)} \quad (1)$$

onde C é uma constante. Os máximos ocorrem quando

$$\frac{\pi b}{\lambda} \sin(\theta) = \text{tg}\left(\frac{\pi b}{\lambda}\right) \sin(\theta) \quad (2)$$

O primeiro máximo é obtido para $\theta=0$. Os máximos seguintes ocorrem se o argumento da tangente assumir os valores: $1,43\pi, 2,459\pi, 3,47\pi, 4,479\pi, \dots$

Por outro lado, mínimos de intensidade ocorreram se:

$$\frac{\pi b}{\lambda} \sin(\theta) = n\pi \quad (\text{com } n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

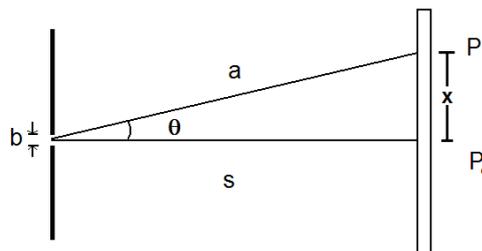


Figura 28: Geometria para o estudo da difração com uma fenda

A condição $a \gg x$ (Figura 28), os mínimos são aproximadamente equidistantes e a posição destes mínimos são determinadas por

$$x = n \frac{a\lambda}{b} \quad (4)$$

Da equação (3) inferir-se que as sucessivas posições dos mínimos são periódicas com o valor n.



Difração produzida com uma barreira (ou quina)

Quando a luz incide sobre a uma única barreira na forma de uma borda, ela também irá difratar. Se a origem das coordenadas for colocada na interseção da linha conectando PQ entre a fonte de luz e o ponto da incidência com o plano de difração, a distribuição da intensidade do padrão de difração atrás da borda é

$$I = \frac{I_0}{2} \left[\left(U(\omega) + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(V(\omega) + \frac{1}{2} \right)^2 \right] \quad (5)$$

U e V são as integrais de Fresnel, definidas como: $U(\omega) = \int_0^\omega \cos\left(\frac{\pi}{2} n^2\right) dn$ e $V(\omega) = \int_0^\omega \sin\left(\frac{\pi}{2} n^2\right) dn$

Usando a simbologia da Figura 7-2, tem-se que:

$$I_o = \frac{1}{(R_o + R)^2} \quad (6)$$

$$\omega = x \cdot \cos(\delta) \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_o} + \frac{1}{R} \right)} \quad (7)$$

A intensidade no lado da sombra diminui regularmente. No lado da luz, a intensidade exibe máximos e mínimos, enquanto a intensidade total (de acordo com a eq. 6) diminuir quadraticamente com a distância entre a fonte e luz o ponto da incidência.

Procedimento experimental da pratica 7

Objetivos:

- Medir a distribuição de intensidade do padrão de difração de uma fenda.
- Determinar a largura de uma determinada fenda.
- Medir a distribuição de intensidade do padrão de difração de uma barreira.

Materiais

- Laser
- Fenda
- Fotosensor
- Lente +20

Primeira Parte: Difração produzida por fenda estreita

- 1- O arranjo experimental é mostrado na Figura 29.
- 2- O raio⁽³⁾ de luz gerado pelo laser deve incidir simetricamente sobre a fenda.
- 3- A fenda é produzida pela proximidade de duas barreiras.
- 4- Para a difração em uma fenda, o raio de luz dever ser direcionado simetricamente sobre a dupla barreira (ou fenda).
- 5- Ajuste o tamanho da fenda de modo que a medida possa ser realizada adequadamente deslocando o fotossensor ao longo de todas as bandas claras e escuras, nomeadas de bandas de interferência.

³ Um raio de luz é uma linha reta que representa a direção do fluxo de energia radiante. Trata-se de uma entidade estritamente matemática e não de uma entidade Física^[1].

- 6- Antes de iniciar as medidas, desloque perpendicularmente o suporte do fotossensor (girando o parafuso micrométrico) para um dos extremos.
- 7- Preencha a Tabela 12. Repita o mesmo procedimento preenchendo as demais colunas.
- 8- Faça os gráficos e analise os resultados.

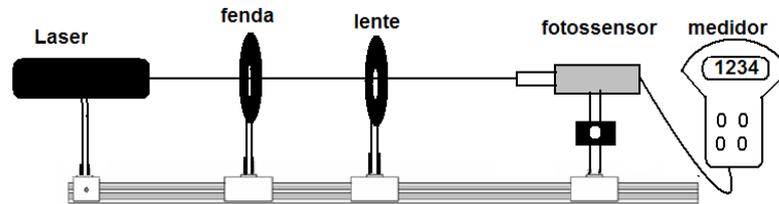


Figura 29: Arranjo experimental para produzir o padrão de difração

Tabela 12: Medida da distribuição de intensidade $I_i(lx)$ em função das posições à fenda

n	Posição (mm)	I_1 (lux)	I_2 (lux)	I_3 (lux)	I_4 (lux)	Valor Médio (\bar{I})	Erros				Desvio padrão σ	Resultado ($\bar{I} + \sigma$)
							$\bar{I} - I_1$	$\bar{I} - I_2$	$\bar{I} - I_3$	$\bar{I} - I_4$		
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												

Segunda Parte: Difração produzida por um fio de cabelo (obstáculo)

- 1- Utilizando o mesmo arranjo experimental anterior (para a fenda), coloque o fio de cabelo no caminho do laser, tome cuidado para que o feixe atravessasse simetricamente este.
- 2- Observe a forma do padrão de difração e compare com o padrão obtido colocando a fenda.
 - Valem as equações estabelecidas anteriormente para uma fenda?
 - Determine a espessura do fio de cabelo.

Terceira Parte: Difração produzida com uma barreira (ou quina)

A intensidade no lado da sombra diminui regularmente. No lado da luz, a intensidade exibe máximos e mínimos, enquanto a intensidade total (de acordo com a Eq. 6) diminui quadraticamente com a distância entre a fonte e luz o ponto da incidência. Na Figura 30 mostra-se a difração de uma borda

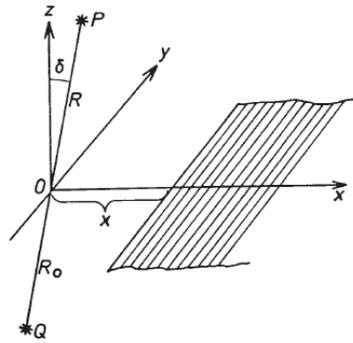


Figura 30: Difração numa borda

- 1- Utilizando o mesmo arranjo experimental anterior (para a fenda)
- 2- Para a difração na borda de uma barreira. A borda é movida na direção do feixe de luz do laser até a metade dela ser encoberta. Isto requer algum cuidado.
- 3- O medidor é fixado em uma determinada distância (por exemplo, 3 m).
- 4- Tomar cuidado com o alinhamento entre o laser e o zero da posição do medidor. Neste caso o procedimento mais simples consiste em deslocar a quina até a posição onde começa a entrar na trajetória entre o feixe o medidor.
- 5- Preencha a Tabela 13
- 6- Faça os gráficos e analise os resultados.

Tabela 13: Distribuição de intensidade $I_i(lx)$ em função das distâncias $y(\text{mm})$ para a barreira única fenda

Posição (mm)													
Intensidade (lux)													



Prática 8: Polarização da Luz

Uma das propriedades das ondas transversais é que ela pode ser polarizada. Neste experimento será investigada a produção e as propriedades de ondas eletromagnéticas polarizadas. A luz polarizada no primeiro polarizador tem sua intensidade medida quando o polarizador-analisado colocado após o primeiro polarizador é girado de -90° a 90° com intervalos de 10° .

Lei d Malus

A luz é uma onda eletromagnética transversal. Uma lâmpada incandescente emite luz não polarizada. Isto significa que o plano de vibração do campo elétrico \vec{E} muda sua orientação muito rapidamente e de modo completamente aleatório. Contudo, quando a luz interage com a matéria, o plano de vibração do campo elétrico torna-se (i) fixo em uma direção particular (polarização linear) ou rotatório (polarização circular ou elíptica).. Existem certos materiais que, ao serem atravessados por uma onda eletromagnética, transmitem a radiação cuja direção de oscilação tem uma certa orientação e absorvem o resto, são os chamados materiais anisotrópicos. A radiação que emerge desse material, portanto, é polarizada na direção de transmissão. A direção de polarização é definida pela direção de oscilação do vetor \vec{E} . O eixo ao longo do qual a luz transmitida oscila é chamado de eixo de polarização ou simplesmente eixo óptico. As placas polarizadoras utilizadas nessa experiência são feitas com um material desse tipo.

Polaróide é um plástico especial que transmite seletivamente apenas uma componente do campo elétrico paralelo ao eixo óptico do plástico. Luz não polarizada que o atravessa é, portanto, linearmente polarizada na direção do eixo óptico do polaroide. A luz também pode ser polarizada por espalhamento de pequenas partículas em suspensão. Este tipo de espalhamento é conhecido como espalhamento Rayleigh. Este tipo de espalhamento pé responsável pela cor azul do céu e avermelhada do sol. Outra forma de produzir polarização é através da reflexão da luz por um vidro.

Para um feixe de luz polarizado que é analisado pela rotação de um segundo polarizador na frente do primeiro, a intensidade é proporcional ao quadrado do cosseno do ângulo entre eixos ópticos do polarizador e analisador. Isto é conhecido como Lei de Malus. A intensidade da luz transmitida depende da orientação relativa entre a direção de polarização da luz incidente e o eixo de polarização do polarizador. A intensidade da luz transmitida descrita quantitativamente pela lei de Malus:

$$I(\theta) = |\vec{E}|^2 = I_0 \cos^2 \theta, \quad (1)$$

onde o ângulo θ é o ângulo entre a direção de polarização da luz incidente e o eixo de polarização da placa. Assim, o ângulo entre a direção de polarização da luz incidente e a direção do eixo óptico da placa está no intervalo $0 \leq \theta \leq 90^\circ$. Na Figura 31 se mostra esquematicamente a intensidade E do vetor E_0 após ser polarizado na direção θ .

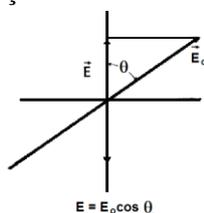


Figura 31: Mostra a intensidade E do vetor E_0 após ser polarizado na direção θ .

Polarização por reflexão

Consideremos um feixe de luz não polarizada, refletido por uma superfície plana entre dois meios materiais transparentes. A luz refletida é parcialmente polarizada, sendo o grau de polarização dependente do ângulo de incidência e do índice de refração dos dois meios materiais. Em um ângulo de incidência específico, o feixe de luz refletido e o refratado ficam perpendiculares um em relação ao outro, polarizando a

luz refletida, efeito descoberto experimentalmente por Sir David Brewster em 1812. Na **Figura 32** é representada a direção do campo elétrico da onda eletromagnética incidente, refletida e refratada.

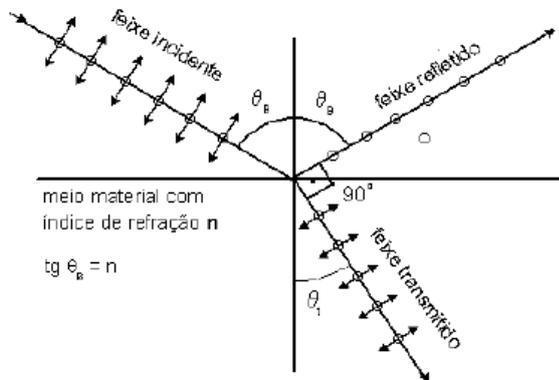


Figura 32: Polarização da luz por reflexão.

A luz incide em ângulo de Brewster sobre a superfície, resultando em um feixe de luz refletida linearmente polarizada.

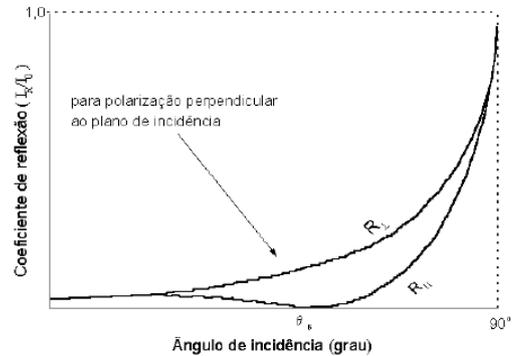


Figura 33: Curvas de reflexão, em função do ângulo de incidência, para o vidro, para luz com polarização paralela (||) e perpendicular (⊥) ao plano de incidência.

No ângulo de incidência θ_B (ângulo de Brewster) a reflexão da componente paralela (||) se anula; dessa maneira, para $\theta = \theta_B$, só a luz polarizada perpendicularmente ao plano de incidência é refletida. Na a Figura 33 são apresentadas as curvas de reflexão da luz em função do ângulo de incidência sobre uma superfície de vidro, para um feixe de luz linearmente polarizada na direção perpendicular e paralela ao plano de incidência.

Ao incidir sobre a superfície um feixe de luz em ângulo de Brewster θ_B , os raios refletidos e refratados são perpendiculares entre si, ou seja:

$$\theta_B + \theta_t = 90^\circ \quad (2)$$

Sendo θ_t o ângulo de refração

Considerando que a luz provém do meio com índice de refração n_1 e incide sobre a interface com o meio de índice de refração n_2 com ângulo de incidência θ_B tem-se que:

$$n_1 \text{sen}(\theta_B) = n_2 \text{sen}(\theta_t) \quad (3)$$

Isolando θ_t de (2) e substituindo em (3) tem-se que,

$$n_1 \text{sen}(\theta_B) = n_2 \text{sen}(90^\circ - \theta_B) \quad (4)$$

$$\text{sen}(90^\circ - \theta_B) = \text{cos}(\theta_B) \quad (6)$$

tem-se que:

$$\text{tg}(\theta_B) = \frac{n_2}{n_1} \quad (7)$$

ou seja,

$$\theta_B = \text{arctg}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (8)$$

No caso da luz se propagar do ar para um meio de índice de refração n tem-se que:

$$\theta_B = \text{arctg}(n) \quad (9)$$

Esta relação é conhecida como Lei de Brewster, sendo um método para a determinação o índice de refração do material medindo o ângulo de Brewster.

Atividade Óptica

A forma como a luz interage com a matéria fornece informações sobre a sua estrutura atômica. Em 1811 o físico francês Dominique F. J. Arago descobriu o fenômeno conhecido hoje como atividade óptica. Arago observou que o plano de polarização da luz linearmente polarizada, girava continuamente à medida que se propagava ao longo do eixo óptico de uma lâmina de quartzo, como mostra a Figura 34. Quase que na mesma época, Jean Baptiste Biot observou efeito semelhante em diversas substâncias naturais, tanto na fase de vapor quanto líquida. Substâncias que apresentam atividade óptica são denominadas de opticamente ativas.

O ângulo de rotação φ do plano de polarização da luz linearmente polarizada é proporcional ao comprimento do caminho da luz na substância d e depende da natureza da substância. Para um observador que olha no sentido de onde incide a luz, a substância é *destrógira*, se gira o plano de polarização no sentido horário (à direita), e *levógira*, se gira o plano no sentido anti-horário (à esquerda).

Certas substâncias apresentam atividade óptica apenas no estado sólido. Como exemplos, o quartzo (cristal inorgânico) e o benzil (cristal orgânico). Nestas substâncias a atividade óptica depende de arranjos especiais dos átomos e moléculas no cristal, arranjos esses que desaparecem quando as moléculas orientam-se ao acaso no estado líquido ou gasoso. Em cristais em que ao passar de uma camada atômica para outra vizinha, esta última está girada em relação à anterior de um pequeno ângulo no sentido horário, eles se comportam como substâncias destrógira. No caso de rotações no sentido anti-horário, eles se comportam como substâncias levógira.

Substâncias como *açúcar*, *terebintina* - (*resina extraída do pinheiro*), *cânfora* e *ácido tartárico*, possuem atividade óptica em qualquer estado físico como também em solução $C_{10}H_6$. Nessas substâncias, a atividade óptica está associada com as moléculas individuais e não com seus arranjos relativos.

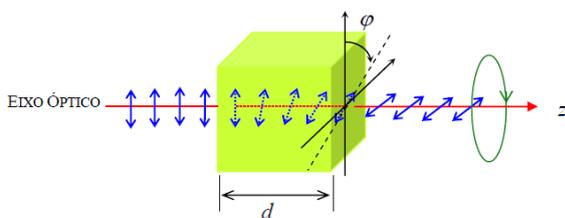


Figura 34: Rotação do plano de polarização da luz por um meio opticamente ativo.

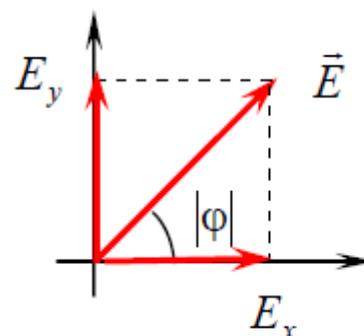


Figura 35: Componentes de polarização o vetor campo elétrico \vec{E} resultante da superposição de uma onda circularmente polarizada para a direita \vec{E}_R e de uma onda circularmente polarizada para a esquerda \vec{E}_L .

A atividade óptica de uma dada substância depende do comprimento de onda λ da luz. O ângulo de rotação φ decresce com o aumento do comprimento de onda λ . Assim, um feixe de luz branca linearmente polarizada, após passar pela substância, terá os raios de luz com as diferentes cores rodadas de ângulos diferentes em relação ao plano da luz branca incidente.



Para se entender o fenômeno da atividade óptica de uma maneira simples, basta considerar que, o meio opticamente ativo apresenta diferentes valores de índice de refração para ondas planas circularmente polarizadas com sentidos opostos de rotação. Num plano xy , os campos elétricos de uma onda circularmente polarizada para a direita \vec{E}_R e uma onda circularmente polarizada para a esquerda \vec{E}_L são definidos, respectivamente, por

$$\vec{E}_R = E_0[\hat{i} \cos(k_R z - \omega t) + \hat{j} \sin(k_R z - \omega t)] \quad \textcircled{9}$$

$$\vec{E}_L = E_0[\hat{i} \cos(k_L z - \omega t) - \hat{j} \sin(k_L z - \omega t)] \quad \textcircled{10}$$

Onde k_R e k_L são os números de onda associados à onda circularmente polarizada que gira para a direita e à onda circularmente polarizada que gira para a esquerda, respectivamente. A resultante das duas ondas definidas pelas eqs. (8.1) e (8.2), $\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_L$ será dada por

$$\begin{aligned} \vec{E} &= 2E_0 \cos\left[\frac{(k_R - k_L)}{2}(z - \omega t)\right] \left[\hat{i} \cos\frac{(k_R - k_L)}{2}z + \hat{j} \sin\frac{(k_R - k_L)}{2}z \right] \\ &= (E_{\text{máx}} \cdot \cos\varphi)\hat{i} + (E_{\text{máx}} \cdot \cos\varphi)\hat{j} \quad (11) \end{aligned}$$

Onde usou-se as seguintes identidades trigonométricas

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)$$

e, com base na Figura 35 $|\varphi| = \frac{(k_R - k_L)}{2}z$ e $E_{\text{máx}} = 2E_0 \cos\left[\frac{(k_R - k_L)}{2}(z - \omega t)\right]$

Na entrada ($z = 0$) tem-se

$$\vec{E} = (2E_0 \cos\omega t)\hat{i} \quad (12)$$

O campo é polarizado linearmente segundo o eixo x . Além disso, esse comportamento permanece a medida que o tempo passa. Assim, a onda resultante está sempre polarizada linearmente, embora a orientação do plano de polarização dependa de z .

A velocidade de fase de uma onda num meio qualquer é definida por

$$v = \lambda' f = \left(\frac{2\pi}{k'}\right) \left(\frac{\omega}{2\pi}\right) = \frac{\omega}{k'}$$

ou em termos do índice de refração n do meio

$$v = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{k'}$$

ou

$$k' = \frac{\omega}{c} n = \frac{2\pi f}{c} n = \frac{2\pi}{\lambda} n = kn$$

onde k e λ são o número de onda e o comprimento de onda da luz no vácuo respectivamente. Se n_R e n_L são respectivamente ao meio associado à onda que gira para direita e da onda que gira para esquerda, então temos

$$k_R = kn_R \quad k_L = kn_L \quad (13)$$



Quando $n_L > n_R$ ou $k_L > k_R$, o campo resultante \vec{E} deve girar para a direita (rotação destrógira). Ao se olhar de frente para a fonte de luz, pois o meio impõe uma maior “resistência” à componente desse campo que “enxerga” um índice de refração n_L . Em caso contrário, o campo resultante \vec{E} deve girar para a esquerda (rotação levógira). Se φ for o ângulo de rotação do campo resultante \vec{E} , a rotação será destrógira quando $\varphi > 0$, e levógira quando $\varphi < 0$. Para que essa convenção de sinais seja satisfeita, de acordo com a equação 11, o ângulo de rotação φ do campo resultante \vec{E} será dado por

$$\varphi = \frac{(k_R - k_L)}{2} z \quad (14)$$

pois, somente assim, $\varphi > 0$ quando $k_L > k_R$ e $\varphi < 0$ quando $k_L < k_R$. Se a espessura do meio for $z = d$, a rotação do plano de polarização será:

$$\varphi = \frac{(kn_R - kn_L)}{2} d = k \frac{(n_R - n_L)}{2} d = \frac{2\pi(n_R - n_L)}{\lambda} \frac{d}{2} = \frac{\pi d}{\lambda} (n_R - n_L) = \frac{\pi d}{\lambda} \Delta n \quad (15)$$

onde $\Delta n = (n_R - n_L)$ é a birrefringência relacionada à atividade óptica do meio. A atividade óptica dos materiais é usualmente apresentada na tabela em termos da razão $R = \varphi/d$, conhecida como poder rotatório ou rotação específica. Em termo dessa grandeza, a eq. (15) torna-se

$$R = \frac{\varphi}{d} = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n \quad (16)$$

Soluções dotadas de atividade óptica são compostas por uma substância opticamente ativa diluída num solvente neutro qualquer. Em soluções de baixa concentração ρ de substância opticamente ativa observa-se experimentalmente que $\Delta n = (n_R - n_L)$, é diretamente proporcional a essa concentração, isto é

$$\Delta n = K\rho$$

Nesse caso, da eq. (8.7), tem-se:

$$\varphi = d \frac{\pi}{\lambda} K\rho \quad (17)$$

ou

$$\frac{\varphi}{d\rho} = \frac{\pi}{\lambda} K \quad (18)$$

Os ângulos de rotação das soluções são tão pequenos que φ_s , normalmente são especificados para amostras com $d = 10 \text{ cm}$ de comprimento e em termos de uma concentração mínima de $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$. Inserindo esses dados na eq. (17), obtém-se:

$$\varphi_s = (10 \text{ cm}) \left(\frac{\pi}{\lambda} K \right) \left(1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

Procedimento Experimental da Prática 8

Primeira Parte: Lei de Malus

Objetivo da primeira parte

- Investigar a natureza da polarização da luz e demonstrar-se-á que a intensidade da luz polarizada varia com relação ao *eixo óptico* do analisador.
- Será verificada a Lei de Malus, relação que quantifica a dependência da intensidade da luz polarizada em relação ao *eixo óptico* de um segundo polarizador (chamado analisador).

Materiais:

- Uma fonte de luz (lâmpada incandescente);



- Dois polaróides (polarizador e analisador);
- Um sensor de luz (luxímetro).

Procedimento experimental

1. Inicialmente, ligue a fonte de luz incandescente (tomada 220V).
2. Para um melhor resultado, posicione o primeiro polarizador entre 5 e 10 cm da fonte de luz. Não coloque mais próximo que isto, pois o aquecimento da lâmpada pode queimar o filme polarizador.
3. Gire o eixo deste primeiro polarizador de -90° a 90° , observe se há variação da intensidade luminosa e discuta esta observação. Após isto, posicione-o na posição $\theta=0^\circ$.
4. Monte o segundo polarizador (chamado analisador) a uns 20 cm da fonte de luz e observe novamente através deste analisador a variação da intensidade da luz girando seu eixo óptico de -90° a 90° (Figura 36).
5. Finalmente, posicione o sensor de luz à aproximadamente 2 cm do analisador. Ligue (ON/OFF) o medidor.
6. A luz após ser polarizada passa através de um segundo polarizador (chamado analisador). A intensidade da luz transmitida é determinada em função do eixo óptico deste segundo polarizado (Figura 37)
7. Com o luxímetro ligado, certifique-se de que a leitura da intensidade é máxima quando $\theta=0$ no analisador.
8. O segundo polarizador (analisador) é rotacionado com intervalos de 10° entre as posições -90° e $+90^\circ$ e as correspondentes intensidades luminosas determinadas no luxímetro.
9. Anote o valor da intensidade na
10. Tabela **14**. Repita mais quatro vezes esta mesma medida, calcule o valor médio, erro relativo e o desvio padrão.

11. ATENÇÃO: Após o término do experimento desligue o sensor para que o visor não consuma bateria desnecessariamente. Atente para as escalas do medidor.

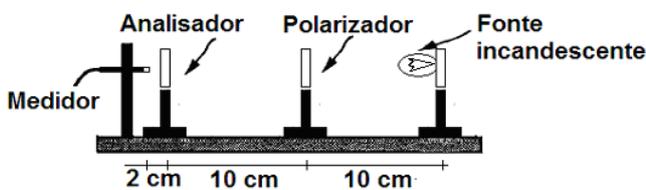


Figura 36: Montagem do experimento

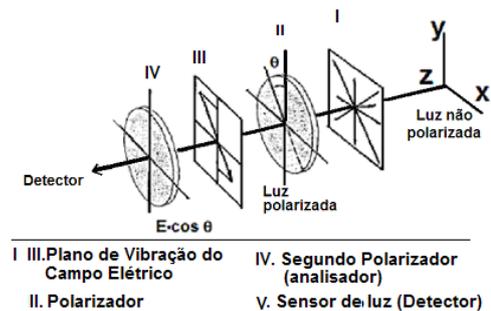


Figura 37: Diagrama do sistema de polarização e verificação da lei de Malus

RESULTADOS

- O plano de polarização da luz é determinado posicionando-se um polarizador em frente de uma fonte incandescente.
- A intensidade da luz transmitida pelo polarizador é determinada em função da posição angular do segundo polarizador (chamado analisador)
- **Verificar a Lei de Malus.**



Tabela 14-a: A primeira coluna diz respeito ao ângulo medido no analisador. I_i são as medidas de intensidade da luz.

θ	I_1 (lux)	I_2 (lux)	I_3 (lux)	I_4 (lux)	Valor Médio (\bar{I})	Erros				Desvio padrão σ	Resultado ($\bar{I} + \sigma$)
						$\bar{I} - I_1$	$\bar{I} - I_2$	$\bar{I} - I_3$	$\bar{I} - I_4$		
-90											
-80											
-70											
-60											
-50											
-40											
-30											
-20											
-10											
0											
10											
20											
30											
40											
50											
60											
70											
80											
90											

Discuta seus resultados baseados nas questões abaixo.

- 1- Calcule o médio, erro e desvio padrão. O resultado deve ser escrito na forma: $x \pm \Delta x$.
- 2- Seus resultados devem ser organizados em uma tabela



- 3- Faça o gráfico da Intensidade vs ângulo colocando as barras de erro. (Atenção: não conecte os pontos, estes são dados pontuais obtidos do experimento).
- 4- No mesmo gráfico ($I \times \theta$) determine a uma função que descreve a *Lei de Malus*.
- 5- Seus dados confirmam a Lei de Malus?

Questões

1. Meça a intensidade da luz polarizada em um ângulo qualquer. Qual é o ângulo do eixo óptico relativo à intensidade do feixe transmitido se este tem intensidade de $1/3$ da intensidade inicialmente medido?
2. Uma onda sonora pode ser polarizada? Por que?
3. Deduza a Lei de Malus, eq. (1).
4. Quando se incide luz natural, de intensidade I_0 , num conjunto de dois polaróides, com eixos de transmissão paralelos, qual deverá ser a intensidade da luz emergente?
5. Qual será a intensidade da luz emergente se o analisador do problema anterior for girado de $30,0^\circ$?
6. Considere um par de polaróides cruzados com eixos de transmissão vertical e horizontal. A intensidade da luz que emerge do primeiro polaróide é e , evidentemente, não passa luz através do analisador. Introduza agora, entre os dois elementos, um terceiro polaróide com eixo de transmissão a $45,0^\circ$ com a vertical. Calcule a intensidade de luz emergente de todo o conjunto de polarizadores

Segunda Parte: Polarização por reflexão

Objetivo da segunda parte

- Investigar a natureza da polarização da luz e demonstrar-se-á que a intensidade da luz polarizada varia com relação ao *eixo óptico* do analisador.
- Verificar a polarização por reflexão e determinar o índice de refração de um meio material através da lei de Brewster

Materiais:

- Uma fonte de luz (lâmpada incandescente);
- Dois polaróides (polarizador e analisador);
- Um sensor de luz (luxímetro).
- Uma lamina de vidro
- Uma lamina de acrílico

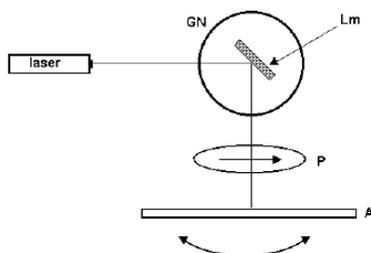


Figura 38: Diagrama da montagem experimental para verificar a polarização por reflexão, sendo **GN** o goniômetro, **Lm** uma lâmina de vidro ou acrílico, **P** um polarizador representando a polarização do laser, e **A** o anteparo com detector de luz.

Procedimento experimental

1. Montar o aparato experimental de acordo com o diagrama da Figura 38;
2. Alinhar o feixe de luz para que o mesmo passe pelo eixo de rotação do goniômetro;



3. Ajustar o braço móvel do goniômetro, focalizando o feixe luminoso no detector, zerando a escala do braço móvel do goniômetro;
4. Variar o ângulo θ de incidência com passo de 5° , entre 0° e 90° graus, medindo a intensidade (tensão) do feixe refletido. Na região de mínima intensidade (próximo ao ângulo de Brewster), o passo da variação do ângulo deve ser de 1° ;
5. Organizar os valores em uma tabela (
6. Tabela **14-b** por vocês construída), com colunas para o ângulo e seu desvio e a intensidade e seu desvio;
7. Fazer o gráfico de $I/I_0(\theta)$ para os dados de cada uma das Tabelas da segunda parte.
8. Determinar o ângulo de Brewster para as lâminas de vidro e acrílico, a partir desses valores calcular o índice de refração dos dois materiais;
9. Analisar e discutir tudo o que foi observado de relevante
10. Repetir os procedimentos 4 e 8, substituindo a lâmina de vidro por uma lâmina de acrílico;
11. Organizar os valores em uma tabela (
12. Tabela **14-c** por vocês construída), com colunas para o ângulo e seu desvio e a intensidade e seu desvio.

Terceira parte: Atividade Óptica

Objetivo da Terceira parte

- Estudo do comportamento do plano de polarização da luz ao se propagar em meios opticamente ativos.

Materiais:

- Uma fonte de luz ;
- Dois polaróides (polarizador e analisador);
- Um sensor de luz (luxímetro).
- Uma cuba com água e açúcar
- Anteparo

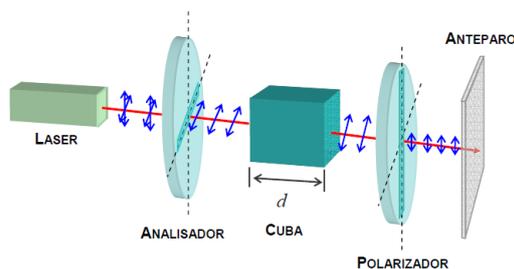


Figura 39: Esquema da montagem experimental da terceira parte

Procedimento experimental

1. Coloque a cuba vazia entre o *polarizador* e o *analisador* como mostra a figura abaixo. Alinhe a luz do laser no centro dos polarizadores com os eixos dos mesmos cruzados, de modo que a intensidade de luz seja mínima num anteparo posicionado após o *polarizador*. Meça o comprimento da cuba em centímetros e anote o resultado com um número de algarismos significativos apropriado.
2. Preencha a cuba com um volume de água conhecido e verifique se houve alguma alteração na intensidade da luz do laser no anteparo.



3. Meça a massa de uma colher de açúcar e dissolva-a na água. Calcule a densidade da solução utilizando a relação $\rho = m/V$, mantendo o número de algarismos significativos apropriados.
4. Procure com o *analisador* o novo ponto de intensidade mínima, meça a variação angular φ do eixo do *analisador* e calcule o poder rotatório $R = \frac{\varphi}{d}$ da solução, com um número de algarismos significativos apropriados.
5. Repita os procedimentos 3 e 4 mais nove vezes, em cada caso, acrescentando à solução sempre uma colher de açúcar (lembre-se de calcular a massa).
6. Disponha os pontos experimentais na forma de um gráfico $R \times \rho$ na escalar linear e ajuste com a melhor curva que ajuste os pontos experimentais. Discuta o comportamento gráfico obtido no experimento. Essa técnica poderia ser adotada para determinar a concentração de substâncias opticamente ativas?
7. Para a concentração máxima da solução, gire a cuba de 90° e procure com o analisador o novo ponto de intensidade mínima. Meça o ângulo φ e o novo comprimento d da cuba. Calcule o poder rotatório $R = \frac{\varphi}{d}$, compare-o com o último dado experimental do item 4.5 e discuta o resultado.



Referências Bibliográficas

- [1] Hecht, E. Óptica. 2ª ed. Ed. Addison Wesley, 2002.
- [2] Halliday, D; Resnick, R; Krane, K. Física 4, 5ª ed. ED. LTC, Rio de Janeiro. p.16, 2002.
- [3] GASPAR, Alberto; Física, Volume 2, Editora Ática. p. 174-175, 2000.
- [4] Lightwaves and Telecommunication, por Stewart E. M. American Scientist, p. 66, 1984; Light-Wave Communications, W.S.Boyle. Scientific American, p.40, 1977.
- [5] <http://pessoais.ufpi.br/labmo> (última atualização: 18/06/2006)
- [6] Gonçalves, D. Física: Termologia, Ótica e Ondas. Cap. 10, p. 213, 1997.
- [7] BUILDING SCIENTIPHIC APPARATUS, Moore, John H; London, 1983
- [8] CATÁLOGO FOULES, Introduction to the Modern Optius
- [9] Max Born; Emil Wolf. Principle of Optics. 7ª Ed.p. Cambridge, pág.194, 1999.
- [10] Alonso-Finn. Fundamental University Physics. Vol.II, cap. 18.11, págs. 694-703, 1967
- [11] Moysés, H. N. Curso de Física Básica 4. 3ª Ed. pág.50, 140-144, 2004.
- [12] <http://www.arauto.uminho.pt/pessoas/bda/radfoto.pdf> (acessado 01/08/2010).
- [12] <http://en.wikipedia.org/wiki/Candela> (acessado 01/08/2010).
- [13] Catalogo de experimentos do laboratório integrado de Física geral DF- Universidade estadual de Londrina, 2008.
- [14] <http://www.fisica.ufsc.br/~lab2/pdfs/exp09.pdf> (acessado 24/03/2011).
- [15] <http://educar.sc.usp.br/optica/instrume.htm> (acessado 24/03/2011)
- [16] <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Otica/Instrumentosoticos/camera.php> (acessado 24/03/2011)
- [17] <http://www.cdcc.sc.usp.br/cda/index.html> (acessado 24/03/2011)
- [18] www.fisica.ufjf.br/disciplinas/labfis4/experiencias.pdf (acessado 24/03/2012)



Apêndice A: Sistema Internacional de Unidades

Introdução

O presente texto é uma compilação de diversas fontes (internet e livros). A intenção é apenas a de tirar algumas dúvidas sobre como devem ser indicadas as unidades em textos de caráter técnico, complementando assim o item anterior sobre como elaborar um relatório. Contém também algumas definições e em especial, ao final do texto, inclui uma parte específica sobre unidades utilizadas em óptica.

Unidades SI

Unidades SI de base

Grandeza	Unidade	
	Nome	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Intensidade de corrente elétrica	ampere	A
Temperatura termodinâmica	kelvin	K
Temperatura Celsius	grau Celsius	°C
Quantidade de Matéria	mol	mol
Intensidade luminosa	candela	cd

Definição das unidades

➤ **Unidade de comprimento:** O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299\,792\,458$ s.

➤ **Unidade de massa:** O quilograma é a unidade de massa; é igual à massa do protótipo internacional do quilograma.

➤ **Unidade de tempo:** O segundo é a duração de $9\,192\,631\,770$ períodos da radiação correspondente à transição entre os 2 níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.

➤ **Unidade de intensidade de corrente elétrica:** O ampère é a intensidade de uma corrente constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de secção circular desprezível e colocados à distância de 1 m um do outro no vazio, produziria entre estes condutores uma força igual a $2 \times 10^{-7} \text{ N}$ por metro de comprimento.

➤ **Unidade de temperatura termodinâmica** O kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração $1/273,16$ da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

➤ **Temperatura Celsius** A temperatura Celsius t é definida pela equação $t = T - T_0$ entre duas temperaturas termodinâmicas T e T_0 com $T_0 = 273,15 \text{ K}$. Um intervalo ou uma diferença de temperatura podem exprimir-se quer em kelvin quer em graus Celsius. A unidade grau Celsius é igual à unidade kelvin. O grau Celsius definido pelo ponto triplo da água e o ponto de evaporação ou ebulição a pressão de uma atmosfera.

➤ **Unidade de quantidade de matéria** O mol é a quantidade de matéria de um sistema que contém tantas entidades elementares quantos os átomos que existem em $0,012 \text{ kg}$ de carbono 12. Quando se utiliza mole, as entidades elementares devem ser especificadas e podem ser átomos, moléculas, íons, elétrons, outras partículas ou agrupamentos especificados de tais partículas.



➤ **Unidade de intensidade luminosa:** A **candela** é a intensidade luminosa, numa direção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540.1012 Hz e cuja intensidade nessa direção é de $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$.

Unidades SI suplementares

Grandeza	Unidade	
	Nome	Símbolo
Ângulo plano	Radiano	rad
Ângulo sólido	Esterorradiano	sr

➤ Unidade de ângulo plano

O **radiano** é o ângulo compreendido entre dois raios de um círculo que intersectam, na circunferência, um arco de comprimento igual ao raio.

➤ Unidade de ângulo sólido

O **esferorradiano** é o ângulo sólido de um cone que, tendo o vértice no centro de uma esfera, intersecta na superfície dessa esfera uma área igual à de um quadrado cujo lado tem um comprimento igual ao do raio da esfera.

➤ Unidades SI derivadas

As unidades derivadas de modo coerente das unidades SI de base e das unidades SI suplementares são dadas por expressões algébricas sob a forma de produtos de potências das unidades SI de base ou das unidades SI suplementares com um fator numérico igual a 1 (um).

Unidades SI derivadas com nomes e símbolos especiais

Grandeza	Unidade		Em unidades SI derivadas	Em unidades SI de base
	Nome	Símbolo		
Frequência	Hertz	<i>Hz</i>	–	s^{-1}
Força	Newton	<i>N</i>	–	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Pressão e tensão	Pascal	<i>Pa</i>	$N \cdot m^{-2}$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Energia, trabalho, quantidade de calor	Joule	<i>J</i>	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Potência*, fluxo energético	Watt	<i>W</i>	$J \cdot s^{-1}$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Quantidade de eletricidade, carga elétrica	Coulomb	<i>C</i>	–	$s \cdot A$
Tensão elétrica, potencial elétrico, força eletromotriz	Volt	<i>V</i>	$W \cdot A^{-1}$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} A^{-1}$
Resistência elétrica	Ohm	Ω	$V \cdot A^{-1}$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} A^{-2}$
Condutância elétrica	Siemens	<i>S</i>	$A \cdot V^{-1}$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 A^2$
Capacidade elétrica	Farad	<i>F</i>	$C \cdot V^{-1}$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 A^2$
Fluxo de indução magnética	Weber	<i>Wb</i>	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} A^{-1}$
Indução magnética	Tesla	<i>T</i>	$Wb \cdot m^{-2}$	$kg \cdot s^{-2} A^{-1}$
Indutância	Henry	<i>H</i>	$Wb \cdot A^{-1}$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} A^{-2}$
Fluxo luminoso	Lúmen	<i>lm</i>	–	$cd \cdot sr$



Iluminação	Lux	<i>lx</i>	$lm \cdot m^{-2}$	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
------------	-----	-----------	-------------------	----------------------------

* Nomes especiais da unidade de potência: **VA** (voltampere) para exprimir a potência aparente da corrente elétrica alternada e **var** (var) para exprimir a potência elétrica reativa.

Prefixos e símbolos de certos múltiplos e submúltiplos decimais

Fator	Prefixo	Símbolo	Factor	Prefixo	Símbolo
10^{24}	iota	Y	10^{-1}	deci	d
10^{21}	zeta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E	10^{-3}	mili	m
10^{15}	peta	P	10^{-6}	micro	μ
10^{12}	tera	T	10^{-9}	nano	n
10^9	giga	G	10^{-12}	pico	p
10^6	mega	M	10^{-15}	fento	f
10^3	quilo	k	10^{-18}	ato	a
10^2	hecto	h	10^{-21}	zepto	z
10^1	deca	da	10^{-24}	iocto	y

Os nomes e símbolos dos múltiplos e submúltiplos decimais da unidade de massa são formados pela junção dos prefixos à palavra "grama" e os símbolos correspondentes ao símbolo "g".

Nomes e símbolos especiais autorizados

Grandeza	Unidade		
	Nome	Símbolo	Valor
Volume	Litro	<i>L ou l</i>	$1 l = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3$
Massa	tonelada	<i>t</i>	$1 t = 1 Mg = 10^3 kg$
Pressão e tensão	bar	<i>bar</i>	$1 bar = 10^5 Pa$

Regras de escrita e utilização dos símbolos e prefixos

- Os símbolos das unidades são impressos em caracteres romanos diretos e em geral minúsculos.
- Contudo, se o nome da unidade deriva de um nome próprio, a primeira letra do símbolo é maiúscula;
- Os símbolos das unidades ficam invariáveis no plural;
- Os símbolos das unidades não são seguidos de um ponto;
- O produto de duas ou mais unidades pode ser indicado de uma das formas seguintes:

$$N \cdot m \text{ ou } Nm$$

- Quando uma unidade derivada é formada dividindo uma unidade por outra, pode utilizar-se uma barra oblíqua (/), uma barra horizontal ou também expoentes negativos. Exemplo:

$$m/s \text{ ou } m \cdot s^{-1}$$



- 7) Nunca deve ser utilizada na mesma linha mais de uma barra oblíqua, a menos que sejam adicionados parênteses, a fim de evitar qualquer ambigüidade. Em casos complicados devem ser utilizados expoentes negativos ou parênteses. Exemplo:

Certo	Errado
m/s^2 ou $m \cdot s^{-2}$	$m/s/s$
$m \cdot kg/(s^3 \cdot A)$ ou $m \cdot kg \cdot s^2 \cdot A^{-1}$	$m \cdot kg/s^3/A$

- 8) Os símbolos dos prefixos são impressos em caracteres romanos diretos, sem espaço entre o símbolo do prefixo e o símbolo da unidade;
- 9) O conjunto formado pela junção do símbolo de um prefixo ao símbolo de uma unidade constitui um novo símbolo inseparável, que pode ser elevado a uma potência positiva ou negativa e que pode ser combinado com outros símbolos de unidades para formar símbolos de unidades compostas. Exemplo:

$$1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ cm}^{-1} = (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1}$$

- 10) Não são empregues prefixos compostos, ou seja, formados pela justaposição de vários prefixos. Exemplo:

1 nm , e **não** $1 \text{ m}\mu\text{m}$

- 11) Um prefixo não pode ser empregue sem uma unidade a que se refira. Exemplo:

$10^6 /\text{m}^3$ e **não** M/m^3

Unidades definidas a partir das unidades SI que não são múltiplos ou submúltiplos decimais dessas unidades

Grandeza	Unidade		
	Nome	Símbolo	Valor
Ângulo Plano	grau	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
	Minuto de ângulo	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10\ 800) \text{ rad}$
	Segundo de ângulo	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648\ 000) \text{ rad}$
Tempo	minuto	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	hora	h	$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3\ 600 \text{ s}$
	dia	d	$1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86\ 400 \text{ s}$

Nota: Os prefixos mencionados no n° 3.2 não se aplicam aos nomes e símbolos deste quadro.

**Unidades utilizadas com o SI, cujos valores no SI são obtidos experimentalmente**

Grandeza	Unidade		
	Nome	Símbolo	Definição
Energia	Electrão-volt	eV	O electrão-volt é a energia cinética adquirida por um elétron que transita, no vazio, através de uma diferença de potencial de 1 volt.
Massa	Unidade de massa atômica	u	A unidade de massa atômica é igual a 1/12 da massa de um átomo do nuclídeo ¹² C.

Unidades específicas para luz**O que é luz?**

Os trabalhos de Plank, Einstein, Rutherford e Bohr geraram muitos anos de controvérsia no meio da física, culminando com a relutante aceitação de que a luz se apresenta de forma dualística na natureza: ora tem comportamento de onda eletromagnética, ora de partícula. Na fonte ou no receptor, o comportamento de partícula se aplica melhor ao entendimento dos fenômenos. No meio entre a fonte e o receptor, o comportamento de onda se aplica melhor.

A Fotometria e Radiometria se ocupam da medição da luz. A Fotometria só se preocupa com a luz propriamente dita (radiação visível) e a Radiometria, com toda a radiação emitida por uma fonte (visível e não-visível). O principal objetivo da Fotometria, é medir a radiação visível, de tal forma que os resultados tenham uma correlação, a mais estreita possível, com a sensação visual produzida num observador humano normal exposto a esta mesma radiação. A resposta visual humana está restrita a uma pequena faixa do espectro das radiações eletromagnéticas. Esta faixa está situada entre 380 e 770 nm, dependendo do observador. Devemos lembrar que uma fonte de luz raramente emite radiação somente nesta faixa do espectro e que a medição destas outras radiações pode ser importante também em função dos efeitos que elas possam causar aos seres humanos. Estas outras radiações se enquadram dentro do que chamamos radiações ópticas, que são objeto de estudo da Radiometria. O ultravioleta e o infravermelho, por exemplo, são consideradas radiações ópticas.

Fotometria: quantificar a luz visível

Radiometria: quantificar toda a luz, visível e não visível.

Correspondência entre radiometria e fotometria

Radiometria	Símbolo físico	Unidades no mks
Densidade radiante		J/m^3
Energia radiante		J
Irradiancia		W/m^2
Fluxo radiante	ϕ	$Watt$
Intensidade radiante		W/sr
Radiancia		$W/sr m^2$



Fotometria	Símbolo Físico	Unidades mks
Fluxo luminoso	Φ_V	Lúmen(lm)
Energia Luminosa		lm · s = Talbot
Intensidade Luminosa	I_V	$\frac{lm}{sr} = \text{candela}(cd)$
Luminância	L_V	cd · m ²
Densidade Luminosa		Talbot/m ³
Emitância luminosa (luz emitida pela superfície)	M_V	lm/m ²
Iluminância (luz incidente na superfície)	E_V	lm/m ² (lux)

Utilizamos o subíndice V para indicar luz visível, quantifica apenas luz visível. Definiremos agora cada uma das quantidades tanto desde o ponto de vista físico (radiometria) como do útil para o olho humano (fotometria).

Nomenclatura psicofísica ou fotométrica

Para que as medições fotométricas por instrumentos tivessem validade havia a necessidade de que os instrumentos possuíssem respostas semelhantes a do olho humano. A partir dessa necessidade a Comissão Internacional de l'Eclaire (CIE), estabeleceu uma curva de resposta do observador padrão. Foram estabelecidas duas curvas: uma para visão fototica (alta luminância) denominada $V(\lambda)$, e, uma para visão escotópica (baixa luminância) denominada $V'(\lambda)$.

O experimento $V(\lambda)$

A função $V(\lambda)$ para visão fototica é baseada em medições de eficiência espectral luminosa que foram publicadas por vários pesquisadores entre 1912 e 1923, e revistas por K. S. Gibson e E. P. T. Tyndall. O trabalho de Gibson e Tyndall foi terminado em 1932 e publicado sob o título: “*Visibility of Radiant Energy*”.

Durante o Período de 1921 a 1923, 52 observadores fizeram comparações de luminância. Para cada observador era pedido para ajustar a densidade de potencia de uma fonte de luz de um dado comprimento de onda até que a sua luminância se igualasse a outra fonte de luz com comprimento de onda com 10 nm de diferença. As luminâncias eram comparadas num fotômetro de campo circular, com uma luminância no semicírculo da direita e outra no semicírculo da esquerda. O processo era repetido entre um dos dois comprimentos originais e um terceiro, distante 10 nm dele, até que todo o espectro fosse coberto.

Nessas condições foram usados pequenos campos de visão, subentendendo ângulos de abertura de 2° a 3°, com fixação central. As luminâncias no campo visual eram, muitas vezes, menores do que 10 cd/m² e apenas altas o suficiente para a condição de visão fototica, particularmente no final do espectro visível. Mais tarde a CIE (1924) adotou intervalos de 10 nm para os valores de $V(\lambda)$.

Existe uma região intermediária entre as regiões fototica e escotópica que é chamada região mesópica (luminância entre 0,034 cd/m² e 3,4 cd/m²). Devido a dificuldades metodológicas não temos uma curva para esta região, mas, ela não deixa de ter sua importância para iluminação de vias, segurança e outros casos de iluminação noturna.

Principais Grandezas e Unidades

Entre as sete unidades de base do Sistema Internacional, a unidade básica para fotometria é a candela, que é a unidade de Intensidade Luminosa. No entanto, o lúmen (unidade de fluxo luminoso) seria a



unidade de base mais adequada, porém, por razões históricas, a candela foi mantida como unidade básica. Abordaremos agora a definição das grandezas e unidades a partir do fluxo luminoso.

Em 1860, a unidade de intensidade luminosa conhecida como vela foi estabelecida usando uma vela de espermacete como padrão primário. Mais tarde, chamadas de gás foram calibradas de acordo com esta definição, sendo que a chama de gás mais comum tinha uma intensidade luminosa de 16 velas. As primeiras lâmpadas incandescentes trabalhavam numa tensão tal que sua intensidade luminosa fosse de 16 velas. Esta tensão era aproximadamente 110 V, mas variava bastante em função do comprimento e do diâmetro do filamento da lâmpada, cuja fabricação não tinha o mesmo controle e padronização que tem atualmente.

Para Iniciarmos a definição das grandezas Fotométricas precisamos partir de uma grandeza Radiométrica que é o Fluxo Radiante,

• Fluxo Radiante (Φ) Conjunto de toda radiação óptica emitida por uma fonte. Sua unidade é o *watt* (símbolo: W).

• Fluxo Luminoso (Φ_V): O fluxo luminoso é a porção do fluxo radiante emitido por uma fonte, na região do visível, segundo a curva de resposta do olho humano para visão fototica $V(\lambda)$, multiplicando por um fator de escala. Sua unidade é o lúmen (símbolo: lm).

$$\Phi_V = Km \int_{360nm}^{890nm} \phi(\lambda)V(\lambda) d\lambda$$

onde Km = fator de escala, $\phi(\lambda)$ = Fluxo radiante ou Potencia radiante.

O lúmen é o fluxo luminoso emitido dentro de uma unidade de ângulo sólido por uma fonte pontual e isotrópica que tem a intensidade luminosa de 1 *cd*.

Observação: Fonte isotrópica = fonte que irradia energia igualmente em todas as direções.

- **Intensidade luminosa (I):** A intensidade luminosa é a parcela do fluxo luminoso de uma fonte luminosa, contida num ângulo sólido, numa dada direção. Sua unidade é a candela (símbolo: *cd*). A definição da candela é a seguinte: “A candela é a intensidade luminosa, em uma dada direção, de uma fonte que emite radiação monocromática de frequência de $540 \times 10^{12} Hz$ e que tem uma intensidade radiante nesta direção de $(1/683) (W \cdot sr^{-1})$. Podemos dizer que

$$I = \frac{\Phi_V}{\omega} [lm/sr]$$

onde ω é o ângulo sólido na direção considerada.

- **Illuminância (E):** A iluminância é a relação entre a quantidade de fluxo luminoso que incide sobre uma superfície e a área desta. Sua unidade é o *lux* (símbolo: *lx*). Podemos dizer que :

$$E = \frac{\Phi_V}{S} [lm/m^2]$$

onde: Φ_V = fluxo luminoso que atinge a superfície;

S = área da superfície.

- **Luminância (L):** O conceito de luminância é o mais complicado de entender. A luminância se refere a uma intensidade luminosa que atinge o observador e que pode ser proveniente de reflexão de uma superfície, ou de uma fonte de luz, ou ainda simplesmente de um feixe de luz no espaço. Ela é dada como a relação entre a intensidade na direção considerada e a área aparente da superfície real ou imaginária de onde provém o fluxo luminoso (Figura 1). Sua unidade é a candela por metro quadrado [cd/m^2]. Podemos dizer que

$$L = \Phi_V/(\omega A \cos(\theta)) [cd/m^2],$$

onde:

ω = ângulo sólido na direção de visão do feixe;



θ = ângulo entre a direção de visão e a normal;

A = área da superfície ou fonte de onde provém o fluxo luminoso.

Ou, podemos dizer também que

$$L = I/A_{ap} \text{ [cd/m}^2\text{]},$$

onde:

I = intensidade luminosa

A_{ap} = área aparente da superfície na direção de visão do feixe.

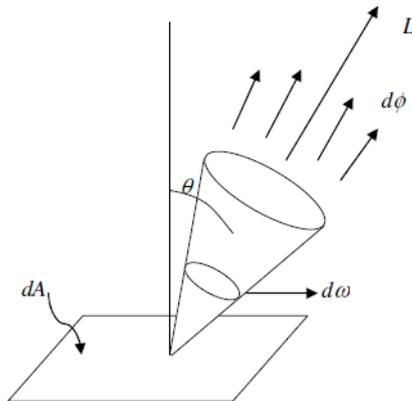


Figura 1 Esquema da Luminância

- **Refletância (ρ):** É a relação entre o fluxo luminoso refletido e o incidente. É um número adimensional.

$$\rho = \Phi_{vr}/\Phi_{vi}$$

onde:

Φ_{vr} = fluxo luminoso refletido;

Φ_{vi} = fluxo luminoso incidente.

O ângulo sólido

Relembrando algumas definições:

- **O radiano (rad):** Ângulo que subtende um arco de círculo de comprimento igual ao do respectivo raio (trabalhando com $r = 1$ + unidades significa que $a = 1$ + unidades, ver Figura 2).
- **O esteroradiano (sr):** Ângulo sólido que tendo vértice no centro de uma esfera, subtende na superfície uma área igual ao quadrado do raio da esfera (significa que $A = r^2$ + unidades de r^2).



Figura 2: Como medir os ângulos num círculo e num ângulo sólido.



Para caracterizar um ângulo sólido precisamos caracterizar um vértice, ou seja, no nosso caso, é necessário que possamos considerar a fonte de luz pontual. Dessa forma temos que para uma superfície de área S , qualquer distância d , a partir de um ponto, o valor do ângulo sólido será de:

$$\omega = \frac{S}{d^2} [sr]$$

Desta forma temos a seguinte relação entre as diferentes quantidades definidas:

$$E = \frac{\Phi_V}{S} \rightarrow \Phi_V = E \cdot S$$

Substituindo Φ_V na expressão da intensidade luminosa temos

$$I = \frac{\Phi_V}{\omega} = \frac{E \cdot S}{\omega} = \frac{E \cdot S}{(S/d^2)} = E d^2$$

De onde podemos concluir que a iluminância E varia com o inverso do quadrado da distância. Isto é

$$E = \frac{I}{d^2}$$

Comentários sobre a curva $V(\lambda)$

Como em todas as medições, os instrumentos estarão de acordo com a curva $V(\lambda)$ e cabe aqui observar que esta curva tem determinadas limitações. Em geral se supõe que as fotometrias realizadas segundo a curva $V(\lambda)$ dão valores bem próximos aos que teríamos com nosso próprio olho para condições de adaptação fototópica. Entretanto, na prática, só podemos considerar isto se as condições forem às mesmas em que a curva foi levantada, isto é, um campo visual centralizado com abertura angular entre 2° e 3° e sem diferenças de cor significativas. Esta condição, em geral, não, é a que temos no meio em que vivemos. Para ângulos maiores do que 4° ou muito menores do que 2° (fontes distantes), mesmo sem variação significativa da cor, a precisão já diminui. Não existem ainda métodos aceitos internacionalmente para efetuarmos estas correções, mas é bom termos em mente as limitações do método que estamos usando.

Apêndice B: Expressando valores de amostragem

Em situações nas quais vários valores são tomados numa medida, é conveniente expressar o valor final como a média aritmética dos vários valores medidos. Assim, se são medidos os valores $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, então o valor medido deve ser

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Além disso, se várias medidas são realizadas, deve-se ainda expressar o desvio de cada valor medido x_i em relação ao valor médio \bar{x} . Esse desvio é calculado como segue. Toma-se o desvio δx_i para cada valor medido x_i em relação ao valor médio \bar{x} , ou seja, $\delta x_i = x_i - \bar{x}$, e em seguida calcula-se a média aritmética dos desvios:

$$\delta x = \frac{\delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3 + \dots + \delta x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta x_i}{n}$$

Por fim, o valor a ser apresentado como resultado da medida é

$$x_{exp} = \bar{x} \pm \delta x$$

Exemplo 1: Por exemplo, os seguintes valores são obtidos para a velocidade máxima em km/h alcançada por um carro de corrida numa volta completa do circuito de competição:

v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
235	254	236	248	235	243



Assim, o valor médio é:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^6 v_i}{6} = \frac{235+254+236+248+235+243}{6} = 241,83 \text{ km/h}$$

E o desvio para cada medida é:

$$\delta v_1 = 235,00 - 241,83 = -6,83$$

$$\delta v_2 = 254,00 - 241,83 = 12,17$$

$$\delta v_3 = 236,00 - 241,83 = -5,83$$

$$\delta v_4 = 248,00 - 241,83 = 6,17$$

$$\delta v_5 = 235,00 - 241,83 = -6,83$$

$$\delta v_6 = 243,00 - 241,83 = 1,17$$

Portanto,

$$\delta v = \frac{-6,83+12,17-5,83+6,17-6,83+1,17}{6} = 0,003 \text{ km/h.}$$

Enfim, o valor da velocidade média alcançada é

$$v_{\text{max}} = (241,830 \pm 0,003) \text{ km/h}$$

O valor expresso indica que o valor da velocidade média está entre 241,833 km/h e 241,827 km/h.

Apêndice C: Cálculo do erro percentual

O erro percentual $Er\%$ dá uma precisão do resultado da medida através da diferença entre o valor esperado, também chamado valor teórico, $X_{\text{teórico}}$, e o valor medido, também chamado valor experimental, X_{exp} . Ele é definido como segue:

$$Er\% = \frac{|X_{\text{teórico}} - X_{\text{exp}}|}{X_{\text{teórico}}} \times 100.$$

O valor encontrado dá então a proximidade ou discrepância entre o valor esperado ou previsto pela teoria e o valor encontrado a partir do experimento.

Valores aceitáveis são aqueles até 10%. Além disso, considera-se que o experimento foi realizado de maneira mal sucedida ou com pouco zelo.

Exemplo 2: Como exemplo, suponhamos que a velocidade máxima fornecida pela equipe do piloto do exemplo anterior fosse de 248,00 km/h. Portanto, a discrepância entre o valor nominal e o valor verificado é:

$$Er\% = \frac{|248,00 - 241,83|}{248,00} \times 100 = 2,49\%.$$

Assim, o valor verificado é perfeitamente aceitável.

Vale lembrar que as informações contidas neste texto são apenas orientações simplificadas, sem o rigor que concerne a completa Teoria Estatística. O objetivo é auxiliar na confecção dos relatórios. Textos mais rigorosos podem ser encontrados na literatura.ⁱ

ⁱ Otaviano A. M. Helene; Vito R. Vanin; TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1981.