Física Experimental IV

Roteiros de Experiências

APOSTILA

Curso: Licenciatura em Física

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Apresentação

O laboratório fornece ao estudante uma oportunidade única de validar as teorias físicas de uma maneira quantitativa num experimento real. A experiência no laboratório ensina ao estudante as limitações inerentes à aplicação das teorias físicas a situações físicas reais e introduz várias maneiras de minimizar esta incerteza experimental. O propósito dos laboratórios de Física é tanto o de demonstrar algum princípio físico geral, quanto permitir ao estudante aprender e apreciar a realização de uma medida experimental cuidadosa.

Esta apostila desenvolvida pelo grupo de professores de Física do CEUNES contempla um estudo introdutório à teoria de erros com vista ao tratamento de dados obtidos no Laboratório e a construção de gráficos lineares, além da descrição detalhada de 09 experimentos nas áreas de mecânica, fluidos e calor.

A Coordenação

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

As três primeiras aulas estão reservadas para um estudo introdutório à teoria dos erros, com vistas ao tratamento dos dados obtidos no Laboratório, sendo que a segunda aula será reservada, especificamente, para o estudo de gráficos em papel milimetrado e/ou monolog.

No restante das aulas serão realizadas oito experiências, divididas em duas séries de quatro, havendo a possibilidade de uma experiência extra.

Os alunos serão distribuídos em quatro grupos, sendo que cada grupo desenvolverá uma experiência em cada aula.

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

CRITÉRIO GERAL:

As avaliações no decorrer do semestre serão feitas através de duas provas, dois testes e relatórios com os seguintes pesos:

$$M_{parcial} = \frac{3M_{provas} + M_{testes} + M_{relatorios}}{5}$$

M_{provas} = Média aritmética das notas obtidas nas 2 provas parciais

M_{testes} = Média aritmética das notas obtidas nos 2 testes

$M_{relatórios}$ = Média aritmética das notas obtidas nos relatórios.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

1. Provas:

A primeira prova será aplicada após as quatro primeiras experiências, portanto com o conteúdo abordado nestas experiências.

A segunda prova será aplicada após se completarem as quatro experiências finais, sendo abordado o conteúdo referente a estas experiências.

As provas consistirão de problemas ou questões que poderão abordar qualquer aspecto das experiências, como procedimentos, conceitos físicos envolvidos diretamente com as mesmas, dedução de fórmulas específicas para os cálculos das grandezas, cálculos numéricos, etc.

2. Testes:

O teste consistirá de questões referentes ao conteúdo de teoria de erros e compreensão da utilidade de multímetros, fontes de tensão, resistores, capacitores e indutores.

3. Relatórios:

Após cada aula com experiência, o grupo deverá elaborar um relatório seguindo os roteiros disponibilizados pelos professores contendo: os cálculos, os gráficos (quando houver), discussão das questões propostas, dedução de fórmulas se forem solicitadas na apostila e conclusão que deverá incluir comentários referentes aos resultados obtidos, aos procedimentos adotados e sua relação com a teoria envolvida.

Observações:

- ✓ Cada grupo deverá apresentar apenas um relatório elaborado por todos os seus membros.
- ✓ Os grupos deverão apresentar o relatório, na aula seguinte àquela da realização da experiência, sem prorrogação.
- ✓ Pontualidade: será dada uma tolerância de, no máximo, 15 minutos. Um atraso maior será considerado na nota do relatório correspondente.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Informações gerais sobre o curso:

- **NÃO** será permitido, **em hipótese nenhuma**, o uso de **calculadoras programáveis** (tipo HP ou similares), em **provas** e **testes**. Entretanto, recomenda-se a utilização de uma calculadora científica comum.

- Em caso de reutilização de apostilas de anos anteriores, **NÃO** deverão constar, **em hipótese nenhuma**, os dados tomados naquela ocasião: estes deverão estar **todos apagados**.

- O aluno poderá repor, em caso de falta, **apenas UMA** experiência da primeira série e **UMA** experiência da segunda série, nos **dias e horários** de **'Reposição de Experiências'** indicados no calendário.

- A 'Reposição de Experiências' é feita somente com a presença do monitor e o relatório relativo à experiência reposta só poderá atingir o **valor máximo de 7,0**.

- É importante repetir: os relatórios das experiências (**1 relatório por grupo**) deverão ser apresentados na aula seguinte daquela da realização da experiência, **sem prorrogação**.

- Em caso de falta do aluno às aulas dos dias dos testes, **NÃO** caberá reposição dos mesmos. Em caso de falta do aluno a uma das provas e **somente mediante a apresentação de atestado médico** na aula seguinte ao dia da prova, esta poderá ser reposta.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

1 Cronograma.

Semana 1: Apresentação do curso e revisão de Teoria de erros e gráficos;

Semana 2: Utilização de multímetros e fonte de tensão. Reconhecimento de um resistor, capacitor e indutor. Montagem de circuitos simples.

Semana 3: Teste;

Semana 4: Experimentos;

Semana 5: Experimentos;

Semana 6: Experimentos;

Semana 7: Experimentos;

Semana 8: Semana de Reposição de Experimentos;

Semana 9: Semana de dúvidas;

Semana 10: Primeira prova;

Semana 11: Experimentos;

Semana 12: Experimentos;

Semana 13: Experimentos;

Semana 14: Experimentos;

Semana 15: Semana de Reposição de Experimentos;

Semana 16: Semana de dúvidas;

Semana 17: Segunda prova;

Semana 18: Prova final.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

2 Relatórios

De uma forma geral, em ciência os resultados de um dado estudo são registrados e divulgados na forma de relatórios científicos. Entende-se por relatório científico um documento que segue um padrão previamente definido e redigido de forma que o leitor, a partir das indicações do texto, possa realizar as seguintes tarefas:

1) Reproduzir as experiências e obter os resultados descritos no trabalho, com igual ou menor número de erros;

2) Repetir as observações e formar opinião sobre as conclusões do autor;

3) Verificar a exatidão das análises, induções e deduções, nas quais estiverem baseadas as conclusões do autor, usando como fonte as informações dadas no relatório.

2.1 Partes de um relatório

1. Capa: Deve incluir os dados do local onde a experiência foi realizada (Universidade, Instituto e Departamento), disciplina, professor, equipe envolvida, data e título da experiência.

2. Introdução: Esta parte deve incluir um as equações mais relevantes (devidamente numeradas), as previsões do modelo teórico (de preferência em forma de tabela ou lista) e todos os símbolos utilizados para representar as grandezas físicas envolvidas.

A introdução não deve possuir mais que duas páginas em texto com fonte 10 ou três páginas manuscritas.

3. Dados experimentais: Deve apresentar os dados obtidos (preferencialmente em forma de tabelas), ou seja, todas as grandezas físicas medidas, incluindo suas unidades. Dados considerados anômalos devem ser identificados com uma anotação. **As incertezas de cada medida devem estar indicadas.** As tabelas devem ser numeradas em sequência e conter uma legenda descritiva.

4. Cálculos: Todos os cálculos devem ser apresentados, incluindo as etapas intermediárias (cálculo de erros, métodos de análise gráfica, etc.), para permitir a conferência e recálculo pelo mesmo caminho. Os resultados

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

experimentais devem ser apresentados com os algarismos significativos apropriados.

Em caso de repetição de procedimentos idênticos de cálculo, como, por exemplo, a multiplicação de 10 valores da posição de um corpo por uma constante é permitido que apenas o primeiro cálculo seja detalhado no relatório, mas os resultados de todos eles devem ser apresentados sob a forma de tabela.

Aliás, os valores de cada grandeza obtida por meio dos cálculos devem ser apresentados de forma organizada (preferencialmente sob a forma de tabelas) no fim desta seção.

Caso a tabela com os resultados dos cálculos claramente apresentados não seja incluída, o professor tem a opção de cortar todos os pontos referentes a esta seção do relatório.

Quando houver gráficos, com cálculo de coeficiente angular, estes devem ser incluídos nesta seção. O cálculo do coeficiente deve ser feito nas costas da folha de gráfico.

5. **Análise de dados:** Esta é a parte mais importante do relatório, na qual o aluno verifica **quantitativamente** se o objetivo inicialmente proposto foi atingido. As previsões teóricas mostradas na introdução devem ser confrontadas com os resultados experimentais e a diferença numérica entre os valores esperados e obtidos deve ser discutida. Sempre que possível, a comparação deve ser feita sob a forma de tabelas ou gráficos que devem ser comentado(as) no texto. Também é razoável comentar aqui valores de coeficientes angulares obtidos na seção anterior. O objetivo é comprovar ou não as hipóteses feitas na teoria.

6. **Conclusão:** A conclusão apresenta um resumo dos resultados mais significativos da experiência e sintetiza os resultados que conduziram à comprovação ou rejeição da hipótese de estudo. Aqui deve ser explicitado se os objetivos foram atingidos, utilizando preferencialmente critérios quantitativos. Também se deve indicar os aspectos que mereciam mais estudo e aprofundamento.

7. **Bibliografia:** São as referências bibliográficas que serviram de embasamento teórico.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

2.2 Apresentação dos resultados

Os resultados devem ser apresentados, sempre que possível, em forma de tabelas, destacando dentro de "retângulos" os resultados isolados.

2.3 Recomendações sobre os cálculos numéricos

Deve-se evitar que sucessivos arredondamentos e/ou truncamentos conduzam a valores incorretos para as incertezas resultantes dos cálculos efetuados. Assim, recomenda-se:

- ✓ Efetuar os cálculos intermediários para a propagação das incertezas com, no mínimo, **TRÊS** algarismos "significativos" nas incertezas.
- ✓ Ao avaliar graficamente o coeficiente angular de uma reta e sua incerteza, considere esta avaliação como um cálculo intermediário.
- ✓ Os resultados finais devem ser apresentados com **UM** só algarismo significativo na incerteza.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

3 Roteiros da Primeira Sequência

1. Experimento 1: Óptica Geométrica em Meios Homogêneos e Isotrópicos

3.1.1 Objetivos

- ✓ Conceituar raios de luz;
- ✓ Verificar os princípios da óptica geométrica para meios homogêneos e isotrópicos;
- ✓ Verificar as leis da reflexão;
- ✓ Verificar a lei de Snell e obter o índice de refração de um vidro;
- ✓ Determinar o ângulo limite de um vidro;
- ✓ Determinar o foco e identificar os raios principais de uma lente convergente e divergente;
- ✓ Obter imagens formadas por uma lente convergente, medindo suas distâncias e seus aumentos.

3.1.2 Materiais Necessários

- ✓ Uma fonte de luz branca com lente acoplada
- ✓ Um barramento com escala milimetrada
- ✓ Um disco de Hartl
- ✓ Uma lente plano convexa de 8 dioptrias (distância focal de 125 mm)
- ✓ Uma lente plano convexa de 4 dioptrias (distância focal de 250 mm)
- ✓ Um conjunto de lentes convergentes e divergentes.
- ✓ Um espelho plano
- ✓ Letra vazada (coberta por um retângulo difusor de poliéster ou papel vegetal)

3.1.3 Fundamentação Teórica

A Óptica Geométrica

O domínio da óptica geométrica inclui o estudo das propriedades dos espelhos e das lentes, a formação de sombras, penumbras, miragem etc... Nestes estudos consideram-se os casos em que a luz se propaga em feixes de raios e encontram objetos cujas dimensões são muito maiores do que o seu comprimento de onda.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Um raio luminoso é uma representação da propagação de uma frente de ondas eletromagnéticas, em uma determinada direção. Por definição, uma frente de ondas é o lugar geométrico de todos os pontos adjacentes que possuem a mesma fase da vibração da onda eletromagnética. Para uma fonte pontual, estas frentes de onda são representadas por círculos concêntricos com os raios luminosos perpendiculares a estas frentes [Figura 1 (a)]. Se a frente de ondas está muito distante da fonte, estas podem ser consideradas como frentes de ondas planas e neste caso os raios são representados por feixes aproximadamente paralelos [Figura 1 (b)].

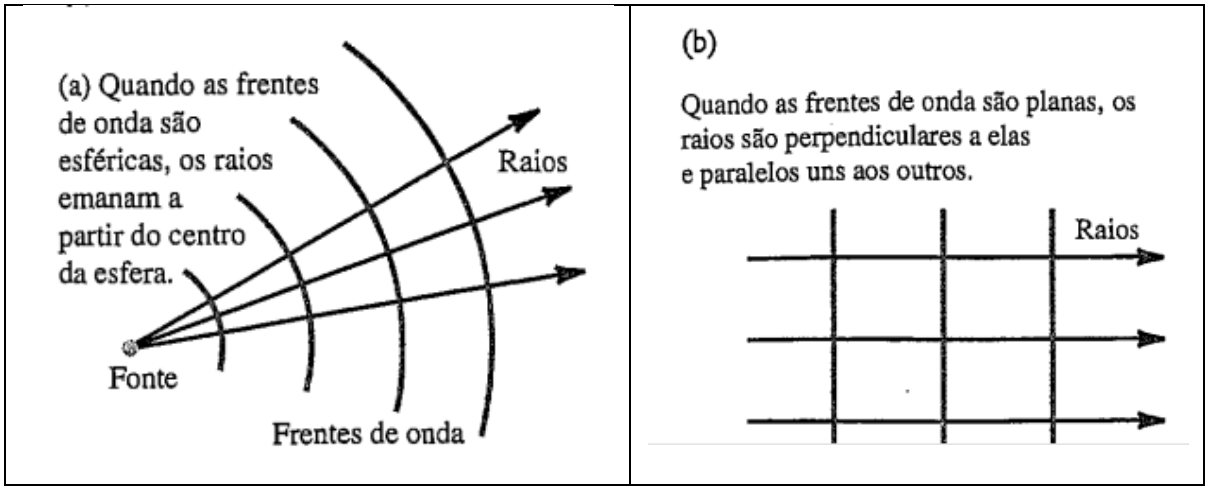

Figura 1- Representação de raios luminosos para (a) uma frente de ondas esféricas e (b) uma frente de ondas planas.

Consideremos, em resumo, alguns dos princípios e leis para a óptica geométrica:

- ✓ Três são os princípios da óptica geométrica:

(I) Nos meios homogêneos e isotrópicos (um material que possui as mesmas propriedades em todas as regiões e em todas as direções) a luz se propaga em linha reta em todas as direções e sentidos.

(II) Um raio de luz não interfere na trajetória de outro raio de luz, cada um se comportando como se o outro não existisse.

(III) A trajetória percorrida por um raio de luz é a mesma que ele percorreria caso seu sentido de propagação fosse invertido.

- ✓ Duas são as leis da reflexão em uma superfície plana e polida (reflexão especular):

(I') O raio refletido está contido no mesmo plano formado pelo raio incidente e pela reta normal à superfície polida do espelho, no ponto de incidência.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

(II') O ângulo incidente na superfície (θ_i), é igual ao ângulo refletido (θ_R), para todos os comprimentos de onda e, para qualquer par de materiais.

- ✓ Define-se o índice de refração, n, como a razão entre a velocidade da luz no vácuo ($c = 2{,}99792.10^5$ m/s) e a velocidade da luz em um determinado meio (v). Assim, n = c/v.

  A direção de propagação da luz em um determinado meio depende tanto da velocidade da luz neste meio, como do comprimento de onda da luz incidente. Este fenômeno é conhecido como refração. As leis da refração são:

(I") O raio incidente, a reta normal e o raio refratado, se encontram sobre o mesmo plano.

(II") O produto do índice de refração de um meio [(1) onde se propaga o raio incidente] pelo seno do ângulo de incidência, é igual ao produto do índice de refração de um outro meio [(2) onde se propaga o raio refratado] pelo seno do ângulo de refração. Assim:

$$n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2 \qquad (1)$$

Quando a luz, que propaga em um meio 1, incide em um determinado meio 2, de índice de refração inferior, observa-se que esta tem sua direção de propagação desviada para um ângulo maior, em relação à normal, no ponto de incidência. O ângulo de incidência, para o qual, o raio refratado é de 90°, denomina-se *ângulo limite*. Para um ângulo, maior que o ângulo limite, observa-se somente uma reflexão interna. Esta é chamada de reflexão *interna total*.

Lentes Esféricas: Características e Formação de Imagens

As lentes Esféricas

Uma lente é definida como toda substância transparente, limitada por dois dióptros, dos quais pelo menos um é curvo. Um dióptro é o conjunto de pontos que determinam a superfície de separação entre dois meios transparentes. As lentes esféricas podem ser de dois tipos:

- ✓ Lentes convergentes: Os raios que nelas incidem tendem a se aproximar, convergindo em determinados pontos.

- ✓ Lentes divergentes: Os raios que nelas incidem tendem a divergir, afastando-se relativamente um ao outro.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

As lentes são classificadas de acordo com suas curvaturas. A Figura 2 representa alguns exemplos usuais de lentes:

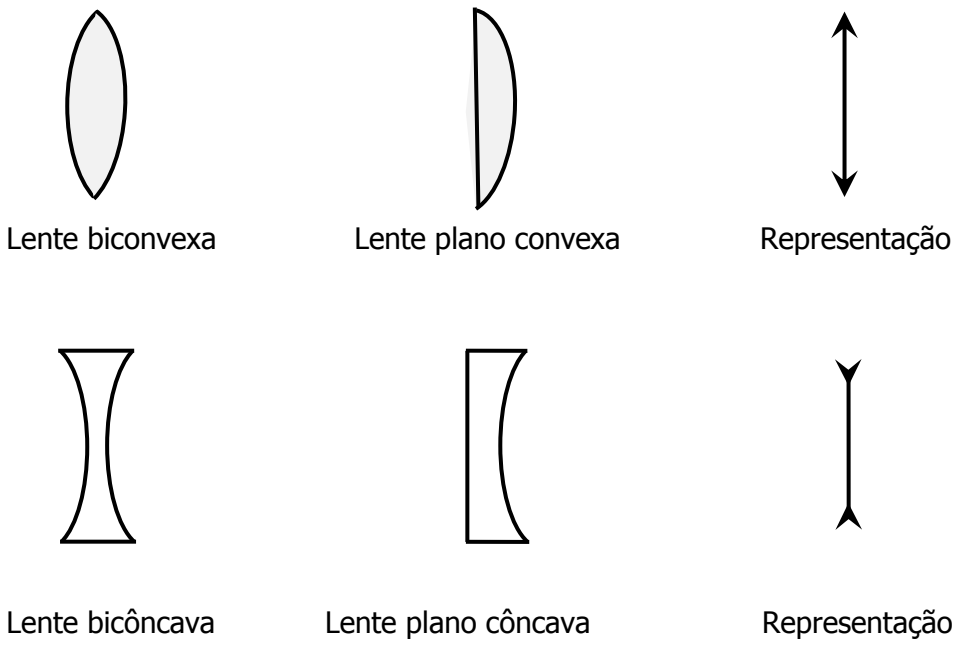

Figura 2 - Exemplos usuais de lentes convergentes e divergentes e suas representações

Os Focos de uma Lente

- ✓ Foco objeto: É o ponto (F) localizado sobre o eixo principal, em que todo raio (1) de luz que por ele passa e incide sobre a lente, emerge paralelamente ao eixo principal da lente [Figura 3]
- ✓ Foco imagem: É o ponto (F') localizado sobre o eixo principal, em que todo raio de luz (2) que incide paralelamente ao eixo principal da lente, emerge passando por este foco [Figura 3].

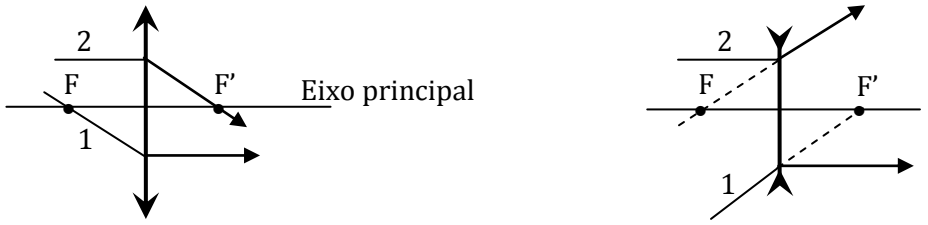

Figura 3 – Focos objeto (F) e imagem (F') que constituem uma lente convergente e divergente.

A relação entre o foco (F) de uma lente e o centro de curvatura (C) é: C = 2F.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Como informação adicional, se um raio (3) de luz passar sobre o eixo da lente, esta emerge sem "sofrer" nenhum desvio. Os raios (1), (2) e (3) constituem os *raios principais* de uma lente esférica e são primordiais no estudo da formação de suas imagens.

O Referencial Gaussiano

O referencial Gaussiano tem por função dar estrutura ao estudo analítico das imagens, atribuindo, às abscissas e ordenadas dos objetos e imagens, sinais algébricos adequados.

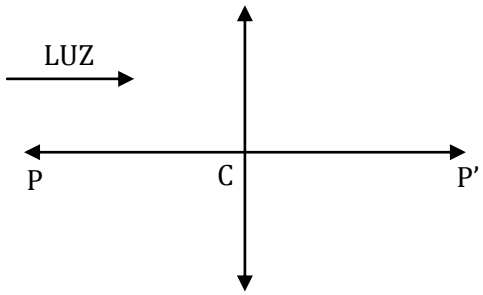

Figura 4 - Referencial gaussiano

No referencial Gaussiano, define-se para as lentes esféricas:

- Objetos (P) e imagens (P') *reais*: Abscissa *positiva*;
- Objetos e imagens *virtuais*: Abscissa *negativa*;
- Imagem *direita*: Objeto e imagem com ordenadas de *mesmo sinal*;
- Imagem *invertida*: Objeto e imagem com ordenadas de *sinais contrários*;
- Lente convergente: distância focal *positiva*;
- Lente divergente: distância focal *negativa*.

Nas lentes esféricas, as abscissas F, P e P' se relacionam matematicamente segundo a equação dos pontos conjugados (equação de Gauss):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{P} + \frac{1}{P'} \tag{2}$$

Define-se o aumento linear transversal (A) como a grandeza adimensional dada pela relação entre a ordenada da imagem (i) e a ordenada do objeto (o) na forma:

$$A = \frac{i}{o} \tag{3}$$

Outra forma de expressar o aumento linear transversal é através da relação:

$$A = -\frac{P'}{P} \tag{4}$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Para o aumento linear transversal, observa-se que quando A > 0, a imagem é virtual e direita e, se A < 0, a imagem é real e invertida.

3.1.4 Procedimentos Experimentais

Montagem dos Experimentos

- ✓ Posicione a lanterna de luz policromática na pare frontal do barramento (Figura 5).
- ✓ Posicione o diafragma (de 1 ou 3 ranhuras, dependendo da experiência) o mais próximo da lanterna. Este deve ficar na posição horizontal.
- ✓ Posicione lente de 8 dioptrias a ***aproximadamente*** 15 cm do diafragma. A lente de 4 dioptrias deve ficar a aproximadamente 26 cm da lente com 8 dioptrias.
- ✓ O disco de Hartl deve estar levemente inclinado.

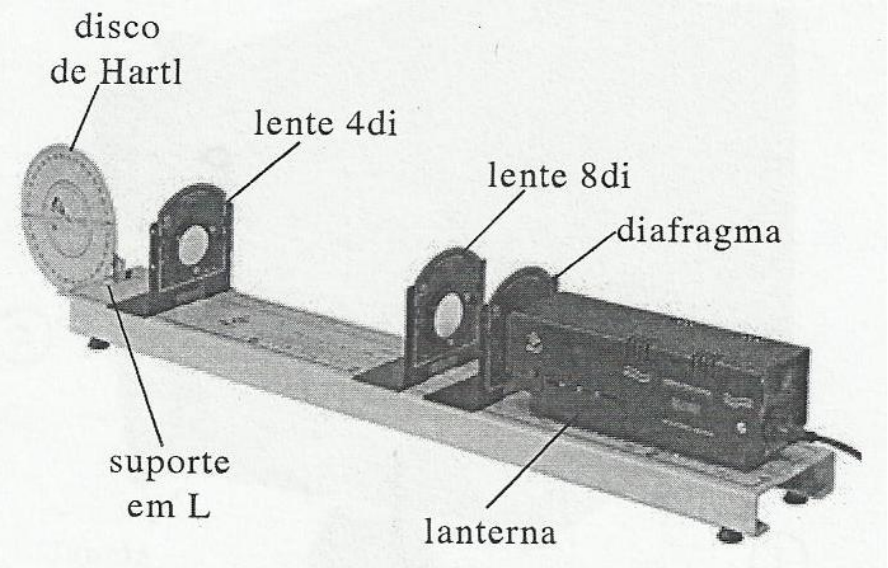

Figura 5 - Procedimento de montagem para realização dos experimentos

Parte 1: Princípio da Óptica Geométrica

1 - Posicione o diafragma de 3 ranhuras, com suporte magnético e, observe sobre o disco, a formação de três raios de luz (Figura 6).

2 - Com base nesta informação, enuncie o primeiro princípio da óptica geométrica.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

3 - Coloque o espelho com suporte magnético sobre o disco, fazendo com que o raio 1 incida sobre ele. Incline o espelho, de tal forma que este cruze os raios 2 e 3. Observe o ocorrido. Enuncie o segundo princípio da óptica geométrica.

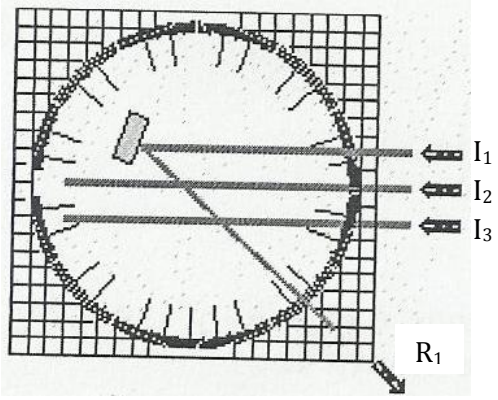

Figura 6 - Procedimento de montagem para realização dos experimentos

Parte 2: Reflexão no Espelho Plano

1 - Mantenha o espelho com suporte magnético, sobre o disco. Substitua o suporte magnético de três ranhuras por um de somente uma ranhura. Projete um raio de luz, de modo que este incida sobre o centro do disco e no espelho (Figura 7).

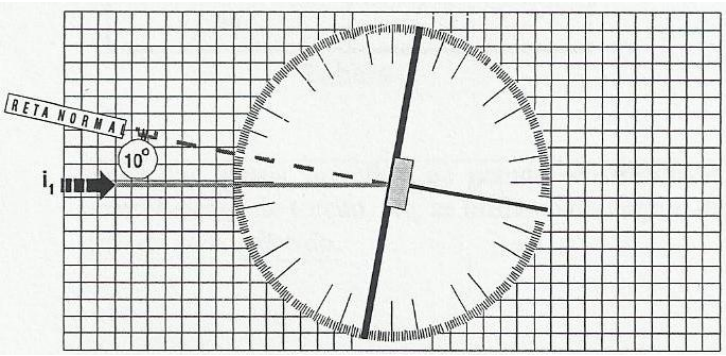

Figura 7 - Procedimento de montagem para o estudo das leis da reflexão

2 - Varie o ângulo de inciência (i) e anote o ângulo de reflexão (r), completando a Tabela 1.

Tabela 1 – Estudo da reflexão em espelhos planos

i	Δi	r	Δr
10°			
25°			
40°			
65°			

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

3 - Pode-se verificar que i = r ? Os raios incidente e refletido estão contidos em um mesmo plano ? Suas observações verificam os princípios da reflexão especular em espelhos planos ?

Parte 3: Refração: Lei de Snell-Descarte e Reflexão Interna Total

1 - Substitua o espelho por uma lente plano convexa de vidro. Faça o raio luminoso incidir no centro desta lente, conforme a Figura 8. Desta forma, todo raio emergente é perpendicular à superfície da lente. Preencha a Tabela 2, onde θ_i é o ângulo de incidência e, θ_R é o ângulo de refração.

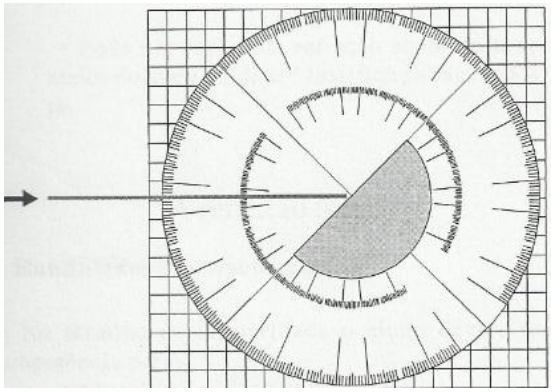

Figura 8 - Procedimento de montagem para o estudo da refração: lei de Snell-Descarte

Tabela 2 – Estudo da refração em uma lente plano convexa.

θ_i	$\Delta\theta_i$	$Sen(\theta_i \pm \Delta\theta_i)$	θ_R	$\Delta\theta_R$	$Sen(\theta_R \pm \Delta\theta_R)$	$\frac{Sen(\theta_i \pm \Delta\theta_i)}{Sen(\theta_R \pm \Delta\theta_R)}$
0						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

2 - Nesta parte do experimento, foi observada uma constância na razão entre $\text{sen}\theta_i/\text{sen}\theta_R$? Esta razão deve ser numericamente igual a razão entre o índice de refração do vidro (n_V) e o índice de refração do ar (n_{ar} = 1.0, neste experimento) [lei de Snell-Descarte].

3 - Obtenha uma média nos valores de $\text{sen}\theta_i/\text{sen}\theta_R$ e adote o desvio padrão como incerteza no valor médio calculado.

4 - Obtenha o índice de refração médio do vidro (n_V) [pois estamos usando luz branca] com incerteza.

5 – Inverta a posição da lente, de tal forma que o raio incida em sua superfície curva.

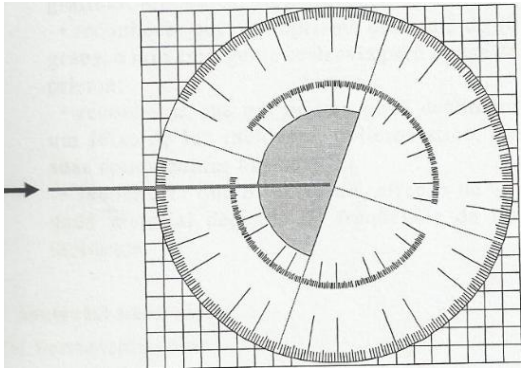

Figura 9 - Procedimento de montagem para o estudo da refração: lei de Snell-Descarte

6 - Observe o fenômeno da reflexão interna total. Meça o valor do ângulo de inciência limite (θ_L) e calcule novamente n_V. Compare o valor obtido e sua incerteza, com o valor obtido no item 3. Qual procedimento é melhor para obter o índice de refração do vidro ?

Parte 4: Identificação das Lentes Segundo suas Bordas

1 - Coloque o diafragma de três ranhuras. No disco de Hartl, coloque as 4 lentes disponíveis, uma de cada vez. Em cada caso, identifique as lentes e obtenha:

(i) Um desenho, mostrando os desvios dos raios incidente e emergente;

(ii) O tipo de lente: Convergente ou divergente, observando os raios emergentes;

2 - Coloque a lente biconvexa sobre o disco de Hartl. Gire a mesma, fazendo com que um raio de luz incida sobre seu foco. Descreva o que ocorreu com a direção de propagação do raio refratado. Este raio constitui um daqueles raios principais que passa pela lente ? (Veja se preciso, a a parte teórica).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Parte 5: A Formação de Imagens em uma Lente Convergente

1 - Posicione a lente de distância focal 125 mm, com suporte fixo, sobre o barramento com escala milimetrada.

2 - Com uma régua milimetrada, meça a o tamanho (o) do objeto.

3 - A imagem formada pela lente deverá se encontrar no anteparo, fixo num suporte. Projete uma imagem para a observação.

4 - Para cada caso, você deverá completar a Tabela 3, medindo a distância entre o objeto e a lente (P), a distância entre a imagem e a lente (P'), o tamanho da imagem (i) e o aumento linear transversal (A).

Tabela 3 - Formação de imagem em uma lente biconvexa de distância focal de 125 mm.

Caso	P (mm)	P' (mm)	I (mm)	A = i/o	A = P'/P
(a)	175				
(b)	150				
(c)	125				
(d)	100				

5 - Responda:

(i) Em todos os casos foi possível obter a formação da imagem ?

(ii) Em todos os casos foi possível realizar a medição direta de P' ?

(iii) Em quais dos casos, têm-se imagem real ? E imagem virtual ?

- Justifique sua resposta, traçando os raios principais que partem do objeto, incidem sobre a lente e formam a imagem no anteparo.

6 - Use a equação (2) e obtenha os valores de P' e A. Compare, se possível, com os valores obtidos da Tabela (3). Os Valores encontrados se igualam ? Justifique.

3.1.5 O que Incluir no Relatório do Experimento

- Os enunciados da óptica geométrica.
- Deduza a equação (2).

- Resultados e discussão dos dados da Tabela 1 (reflexão).
- Resultados e discussão dos dados da Tabela 2 (Lei de Snell).
- Cálculo do índice de refração médio do vidro com incerteza, utilizando dados da Tabela 2 e, o ângulo limite.
- Discussão dos dados da Tabela 3 incluindo os itens 5 e 6 da parte 5 dos procedimentos experimentais.
- Pesquise como se dá a formação de imagens nos microscópios e lunetas terrestres simples.

3.1.6 Bibliografia

Caderno de experimentos da Empresa CIDEPE (site: cidepe.com.br).

Física 4. Halliday, Resnick e Krane. 4ª edição. Editora LTC, Rio de janeiro RJ (1996).

Ótica, Relatividade, Física Quântica. H. Moysés Nussenzveig. 4ª edição. Editora Blucher, São Paulo SP (2011).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

2. Experimento 2: Difração da Luz por Fendas

3.2.1 Objetivos

- ✓ Estudar a figura de difração da luz monocromática por uma fenda fina em função da largura da fenda.
- ✓ Estudar a figura de interferência e difração da luz monocromática por várias fendas paralelas e idênticas em função da quantidade de fendas e do espaçamento entre elas.
- ✓ Estudar a figura de difração da luz branca.

3.2.2 Materiais Necessários

- ✓ Uma fonte de luz branca com lente acoplada
- ✓ Um lazer de luz vermelha
- ✓ Uma tela com N = 2, 5 e 10 fendas de espaçamento idêntico entre elas.
- ✓ Uma tela com fendas duplas com espaçamentos de 0,2; 0,4; e 0,6 mm entre elas. A abertura das fendas são identicas
- ✓ Uma tela com fendas únicas e aberturas de 0,1; 0,2 e 0,3 mm entre elas.
- ✓ Rede de difração com 1000 fendas.
- ✓ Régua milimetrada.

3.2.3 Fundamentação Teórica

A ótica geométrica considera os casos em que a luz se propaga em feixes paralelos de raios e encontra objetos cujas dimensões são muito maiores do que o seu comprimento de onda. Neste domínio, inclui-se o estudo das propriedades dos espelhos e das lentes. A experiência mostra, entretanto, que a luz ao atravessar obstáculos muito finos, comparáveis ao comprimento de onda da luz, passa a apresentar suas propriedades ondulatórias, que é o caso da difração por fendas finas. A difração é o desvio ou dispersão de ondas que encontram um objeto em seu caminho. A observação experimental da difração da luz se dá quando um feixe de ondas coerentes (quando as amplitudes das ondas e suas fases são constantes no tempo) atravessa uma abertura muito fina e, um espalhamento de luz é observado em todas as direções. Este caso está ilustrado na Figura 1.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

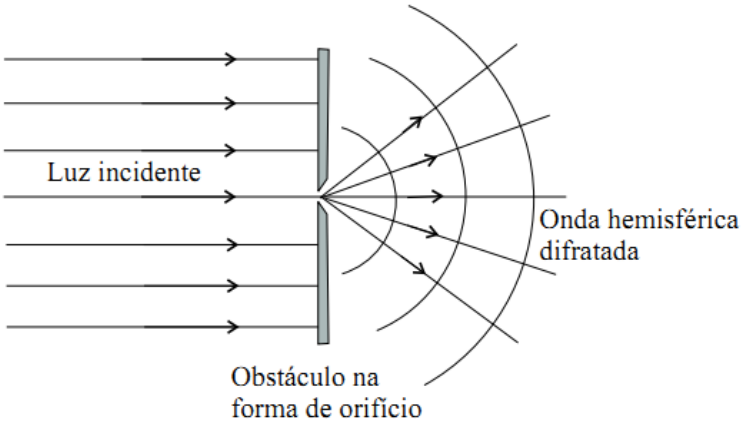

Figura 1 – ilustração da difração da luz por uma fenda fina

Difração por Fenda Única

Considere que o obstáculo tenha forma de uma fenda fina. A luz, após ser difratada pela fenda, será formada pela superposição de superfícies esféricas alinhadas e eqüidistantes da fenda, conforme a Figura 1. Um ponto P qualquer em um anteparo distante e paralelo à fenda receberá as ondas esféricas produzidas ao longo da abertura da fenda. Estas ondas se interferirão e produzirão a chamada *figura de difração*. Uma ilustração deste fenômeno é apresentada na Figura 2, onde os raios que partem da fenda, de abertura *a*, se interferem em um ponto P do anteparo a uma distância *D*. A experiência mostra que na figura de difração existem pontos com intensidade mínima e máxima, dependendo se a interferência das ondas luminosas que incidem em P é construtiva ou destrutiva. A Figura 3 é uma imagem de difração, produzida por uma única fenda, quando uma luz monocromática de um laser incide sobre uma fenda.

Para explicar os pontos de mínima interferência, considera-se um anteparo a uma distância *D*. Se a distância *D*, do anteparo a fenda for muito maior que a abertura *a* da fenda, os raios que emergem da fenda serão praticamente paralelos.

Considere que θ, na Figura 4, seja tal que a diferença entre os caminhos percorridos pelos raios 1 e 3 seja λ/2, onde λ é o comprimento de onda da luz monocromática que incide em um ponto P no anteparo. Desta forma, o vale de uma das ondas irá coincidir com a crista da outra (veja interferência de ondas em Halliday Resnick, vol 2), havendo uma interferência destrutiva num ponto do anteparo. Observa-se nesta figura, para estes raios, que a diferença de caminho entre eles é dado por (a/2)sen θ. Um raio muito próximo, abaixo do raio 1, também se interferirá destrutivamente com um raio muito próximo e abaixo do raio 2.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

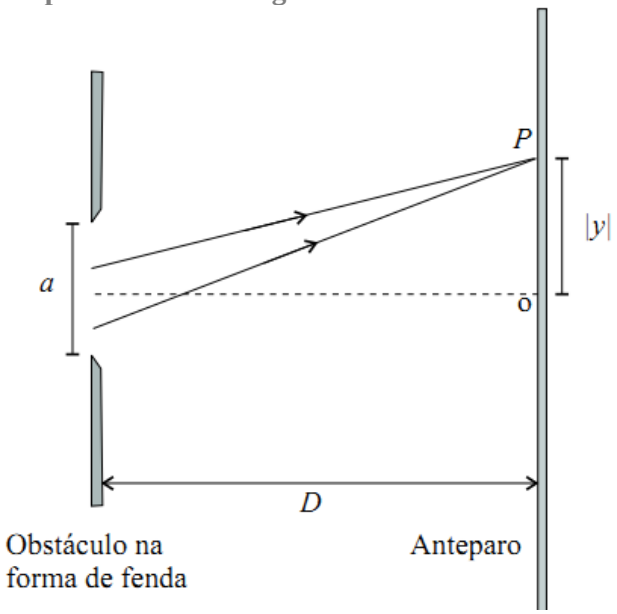

Figura 2 – Vista de corte de dois raios de que partem de uma fenda e chegam em um ponto do anteparo. Nesta Figura, *D* é a distância do anteparo à fenda, *a* é a abertura da fenda e *y* é a distância do ponto de interferência à fenda.

Figura 3- Figura de difração de uma fenda única produzida em um anteparo.

Seguindo este raciocínio para todos os raios, cujas diferenças de caminho seja (a/2)sen θ, temos um mínimo num ponto do anteparo, dado pela condição:

$$\frac{a}{2} sen\theta = \frac{\lambda}{2}$$

ou

$$asen\theta = \lambda$$

Observa-se que quando a << λ, o ângulo ɵ se aproxima de 90°, iluminando uniformemente o anteparo.

Na Figura 5, representa-se agora 4 raios emergindo da fenda e interferindo em um ponto P', diferente do ponto P.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

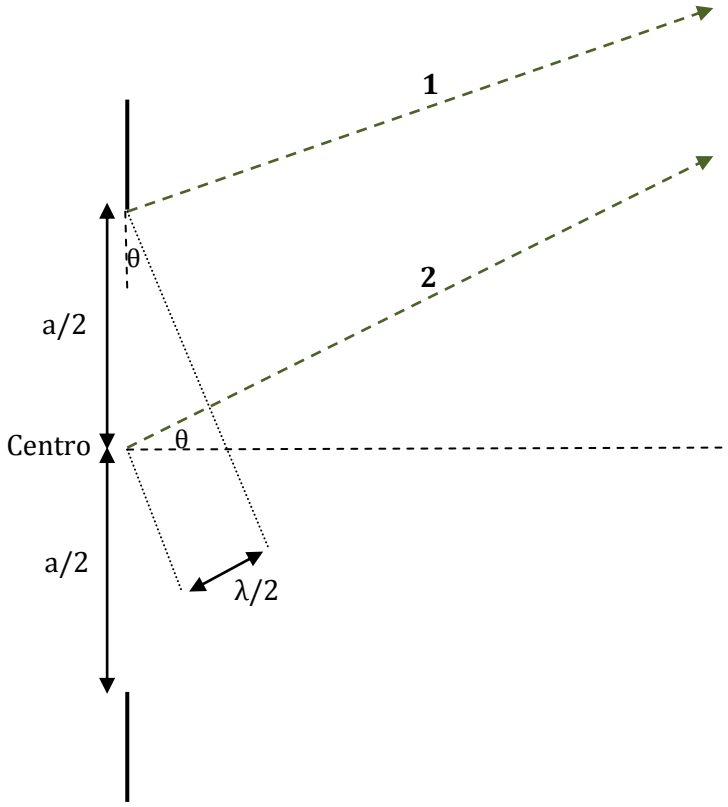

Figura 4- Ilustrações de dois raios luminosos que partem de uma fenda de abertura a e se interferem em um ponto P do anteparo. A diferença de caminho é indicada por λ/2.

Novamente, se o ângulo θ′, é tal que o par de raios (1, 2) esteja meio comprimento de onda defasados, assim como o par (3,4), haverá uma interferência destrutiva, desses raios, num ponto P′ do anteparo. Da mesma forma, os raios imediatamente abaixo de cada raio 1, 2, 3 e 4, interferirão destrutivamente aos pares e novamente, um mínimo se estabelecerá, em um ponto P′ do anteparo, se:

$$\frac{a}{4} sen\theta = \frac{\lambda}{2}$$

ou

$$asen\theta = 2\lambda$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Se agora, houver 2m raios (Figura 5), onde m é o número de pares de raios, a condição geral para os mínimos tem a forma:

$$\frac{a}{2m} sen\theta = \frac{\lambda}{2}$$

ou

$$asen\theta = m\lambda \quad com\ m = 1, 2, 3, \ldots \quad \text{Pontos de mínimo} \qquad (1)$$

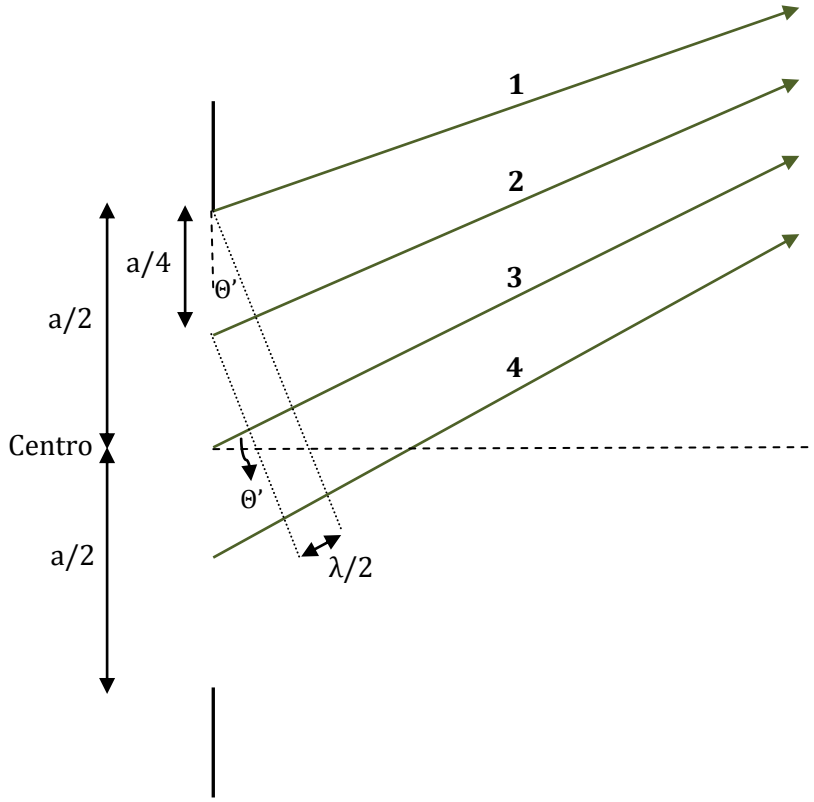

Figura 5- Ilustração de dois pares [(1,2) e (3,4)] de raios luminosos que partem de uma fenda de abertura *a* e se interferem em um ponto P' do anteparo. A diferença de caminho é indicada por λ/2.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Como a intensidade de cada máximo varia com a distância do ponto central do anteparo? A curva deitada na Figura 6 é um gráfico de como intensidade dos pontos na difração de fenda única, varia em função do ângulo de abertura θ. Demonstra-se que, sendo I_o a intensidade luminosa no ponto central (o mais brilhante), a intensidade luminosa em uma posição y (tal que y/D <<1) sobre o anteparo é dada pela função:

$$I = I_o \left(\frac{\text{sen}\alpha}{\alpha}\right)^2$$

onde (2)

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda}\text{sen}\theta$$

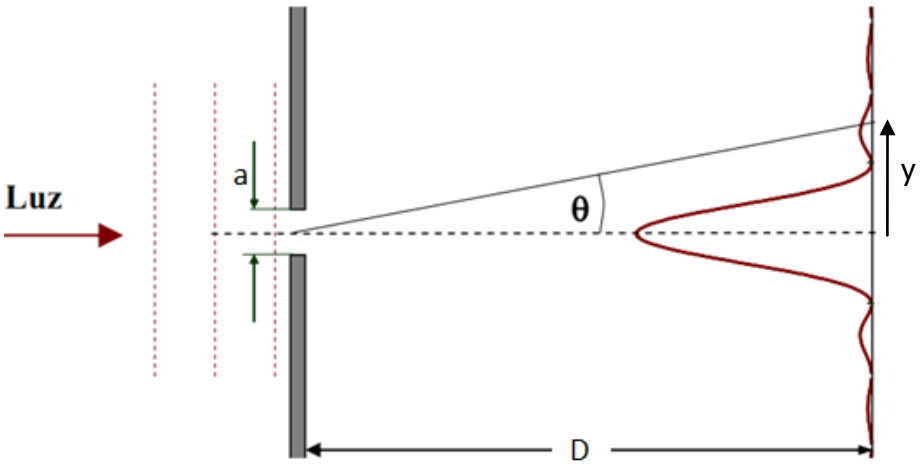

Figura 6- Ilustração da difração da luz por uma fenda de abertura *a*. Acurva ilustra os pontos de máxima e mínima interferência dos raios luminosos em função do ângulo θ. Figura adaptada de Hugo L. Fragnito e Antônio C. Costa.

Como o anteparo está localizado a uma distância D, muito distante da fenda, temos que θ *<<1* e neste caso *sen θ ~ tg θ = y/D. Assim, temos:*

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda D} y$$

Os mínimos de intensidade luminosa ocorrem quando senα = 0, ou seja, quando

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

$$\frac{\pi a}{\lambda D} y_{min} = m\pi$$

Neste caso

$$y_{min} = m\frac{\lambda D}{a} \qquad m = 1, 2, 3 \ldots \tag{3}$$

Com a expressão acima, a largura do máximo central é o dobro da largura de qualquer máximo lateral, que então é expresso por

$$\Delta y = \frac{2\lambda D}{a} \tag{4}$$

$$onde\ é\ usado\ m = 1\ (1^a\ ordem\ de\ difração)$$

Difração por Fenda Dupla

Considere a situação na Figura 7, onde a abertura *a* de cada uma das fendas é muito menor do que o comprimento de onda *λ* da luz incidente nas fendas. Cada raio de luz difratado que emerge da fenda superior irá se interferir, em um ponto P do anteparo, com um raio difratado da fenda inferior, quando a distância entre eles é *d.*

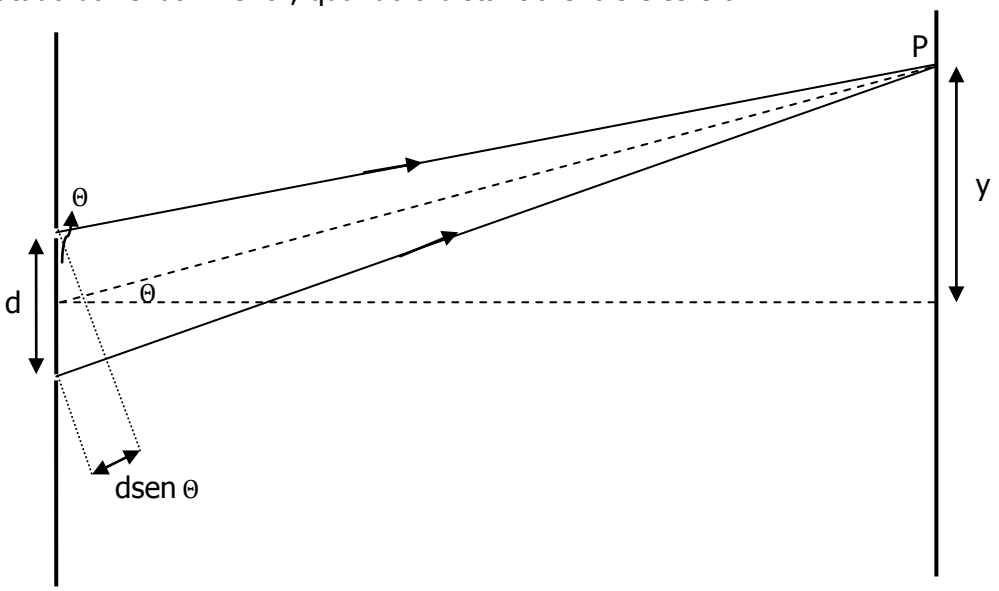

Figura 7- Difração da luz por uma fenda dupla de espaçamento d visto em um anteparo a uma distância *D* da fenda.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Observa-se na Figura 7 que sendo $d.sen\theta$ a diferença de caminho percorrido pelos raios da fenda superior e inferior, as seguintes situações para máximo e mínimo de interferência serão observadas:

$$dsen\theta = m\lambda \quad com\ m = 1, 2, 3, \ldots \qquad \text{Pontos de máximo} \qquad (5)$$

$$dsen\theta = (m + \tfrac{1}{2})\lambda \quad com\ m = 1, 2, 3, \ldots \qquad \text{Pontos de mínimo} \qquad (6)$$

Observa-se experimentalmente que no caso, $a << \lambda$, a figura de difração é constituída por pontos de mesma intensidade e igualmente espaçados. Este fato é resultado da interferência da figura de difração de cada fenda, quando cada uma delas ilumina uniformemente o anteparo (se $a << \lambda$). A Figura 8 é uma ilustração das franjas de difração produzidas por uma fenda dupla.

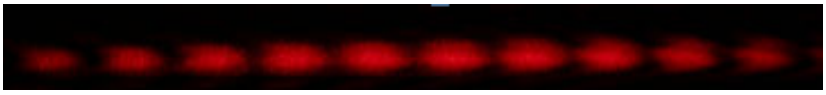

Figura 8- Padrão de difração para uma fenda dupla, onde a é da ordem de λ.

A intensidade luminosa em um ponto P do anteparo, localizado a uma distância $D >> d$, na difração de fenda dupla, quando $a << \lambda$, é dado pela expressão

$$I_\theta = I_m cos^2\beta$$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda D} y \qquad (7)$$

A figura de difração é composta por pontos, ou franjas de intensidades uniforme. A intensidade é proporcional ao quadrado do cosseno do parâmetro β (função periódica). Os máximos de difração serão periódicos com a posição y no anteparo, medidas a partir do seu centro.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Os máximos de interferência correspondem à condição $\beta = n\pi$ (n = 0, ±1, ±2,...). Substituindo estes valores de β na equação (7) obtém-se a separação ou a largura (Λ) entre máximos (ou mínimos) de interferência consecutiva:

$$\Lambda = \frac{\lambda D}{d}$$

Na Figura 9, a curva tracejada (de mesma amplitude) é uma representação da intensidade das franjas de difração na fenda dupla sobre o anteparo. Esta curva teórica está de acordo com a Figura 8 (obtida experimentalmente), para uma difração de fenda dupla. A separação entre as franjas adjacentes (Λ) é constante. Discute – se no próximo parágrafo, a curva sólida na Figura 9.

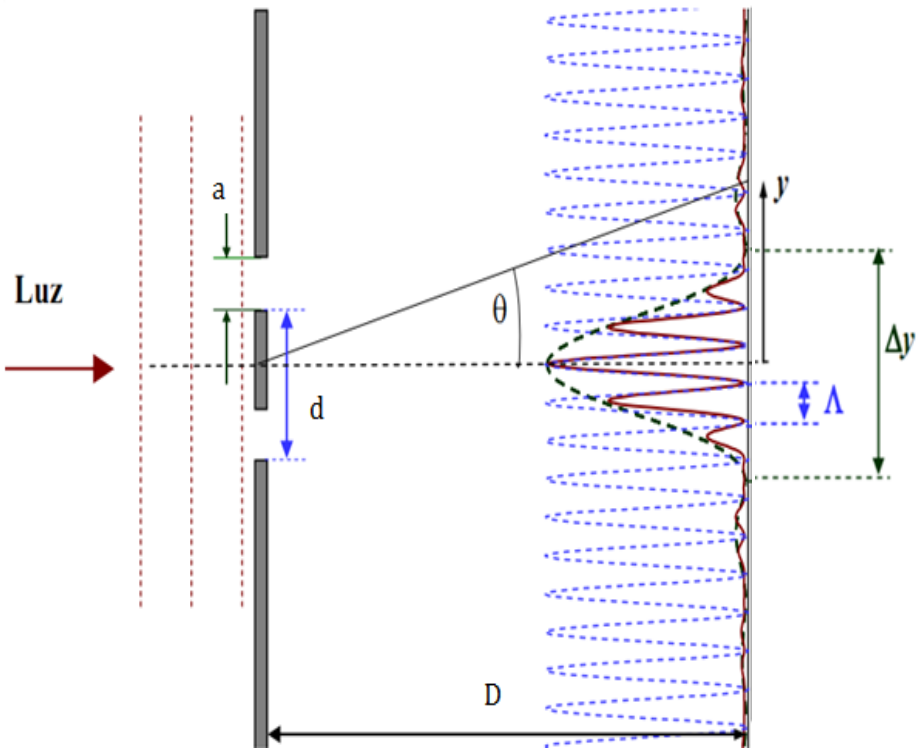

Figura 9 - Ilustração da difração da luz por uma fenda dupla de espaçamento d. A curva em tracejado azul ilustra os pontos de máxima e mínima interferência dos raios luminosos em função do ângulo θ, quando a << λ. A curva em vermelho é a modulação da difração de fenda única na difração de fenda dupla quando a condição a << λ, não é satisfeita. Figura adaptada de Hugo L. Fragnito e Antônio C. Costa.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Na prática, em se tratando da luz visível, a condição a << λ geralmente não é satisfeita. Para estas franjas relativamente largas, a intensidade das franjas de interferência formada sobre o anteparo, não é uniforme. Quando isto ocorre, a intensidade das franjas é modulada pelo padrão de difração de fenda única (Figura 9). Na ilustração da Figura 9 observa-se este efeito, da abertura *a* das fendas, sobre a interferência de fenda dupla espaçadas de uma distância *d*. A curva que descreve a intensidade das franjas em função do ângulo θ é ilustrada nesta figura, através da envoltória tracejada.

A Figura 10(a) é um resultado experimental de uma difração de fenda dupla com a condição a << λ não é satisfeita. Para comparação, a Figura de difração de uma fenda única é colocada logo embaixo desta [Figura 10(b)].

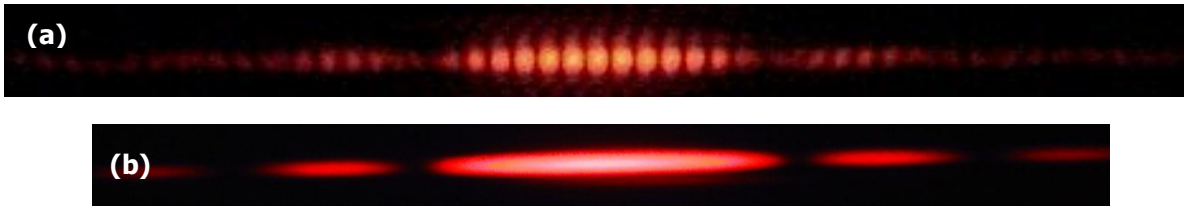

Figura 10 - (a) Padrão de difração para um laser de luz vermelha num sistema de fenda dupla onde a largura da fenda não é desprezível em comparação com o comprimento de onda. (b) padrão de difração de uma única fenda de mesma largura.

Para apenas duas fendas, pode-se mostrar que a intensidade luminosa, sobre um anteparo, onde *D >> d*, é dada por:

$$I_\theta = I_m\left(\frac{sen\alpha}{\alpha}\right)^2(cos\beta)^2 \tag{8}$$

onde

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda D}y$$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda D}y$$

O termo $(\mathrm{sen}\alpha/\alpha)^2$ é o fator de modulação de uma fenda única e o termo $(\cos\beta)^2$ é devido a difração das duas fendas. As franjas centrais são mais intensas e, a sua largura (distância entre os dois mínimos que a cercam) é dada pela equação (4).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Difração por Fendas Múltiplas

Quando o número de fendas é maior que duas fendas, dois fatos importantes são observados experimentalmente: (i) as franjas de difração se tornam mais finas (mais definidas) e (ii) máximos secundários de baixas intensidades aparecem entre as franjas claras. Na Figura 11 observa-se uma porção do padrão de difração para N = 2 fendas até N = 5 fendas. Não se discute neste experimento, o aparecimento dos máximos secundários, cuja abordagem envolve o método de fasores para o campo elétrico das ondas de luz incidentes no anteparo.

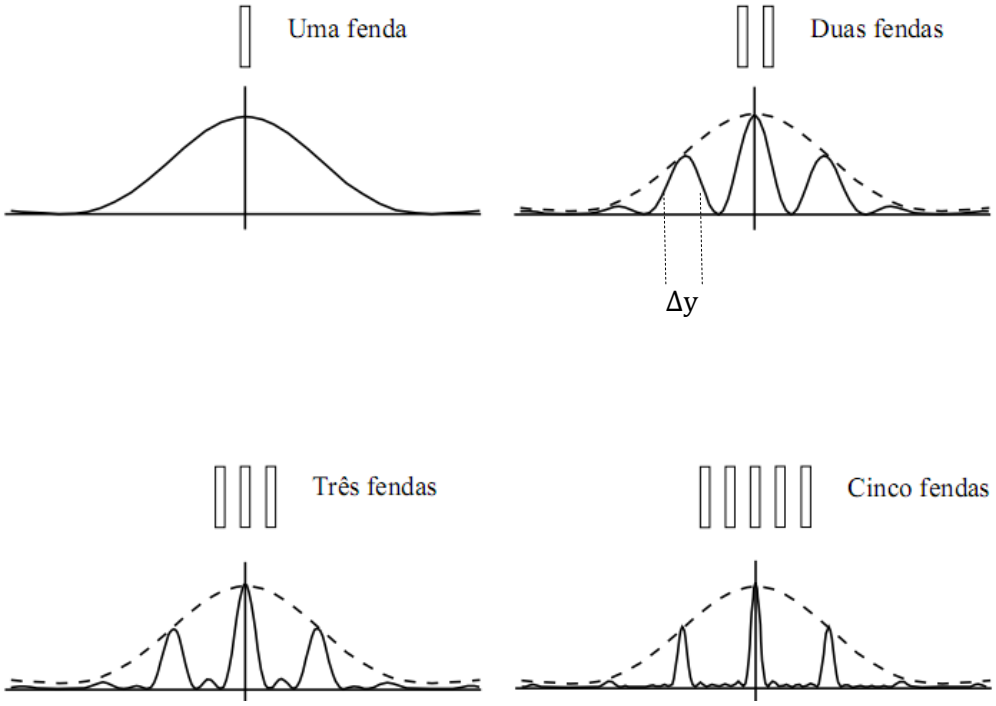

Figura 11 - Ilustração da difração da luz por N = 1, 2, 3 e 4 fendas de mesmo espaçamento d. Figura adaptada de N. B. Oliveira.

O número de fendas pode ser tão grande quanto 10^4 fendas. Tal arranjo de fendas múltiplas é chamado de rede de difração. Conforme o número de fendas vai aumentando, para uma distância fixa entre elas, o número de máximos secundários também aumenta mais seu brilho diminui; por outro lado, os máximos principais se tornam mais destacados, pois vão se tornando mais estreitos. Para um dado comprimento de onda, o espaçamento entre as franjas é determinado pela distância *d* entre as fendas, enquanto as intensidades das franjas são determinadas pelos efeitos de difração associados a largura (*a*) da fenda.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

O valor aproximado da largura de linha à meia altura (Δy) de qualquer máximo é dada pela expressão:

$$\Delta y = \frac{\lambda D}{N d} \tag{10}$$

3.2.4 Procedimentos Experimentais

1. Realize a montagem experimental conforme a Figura 12.

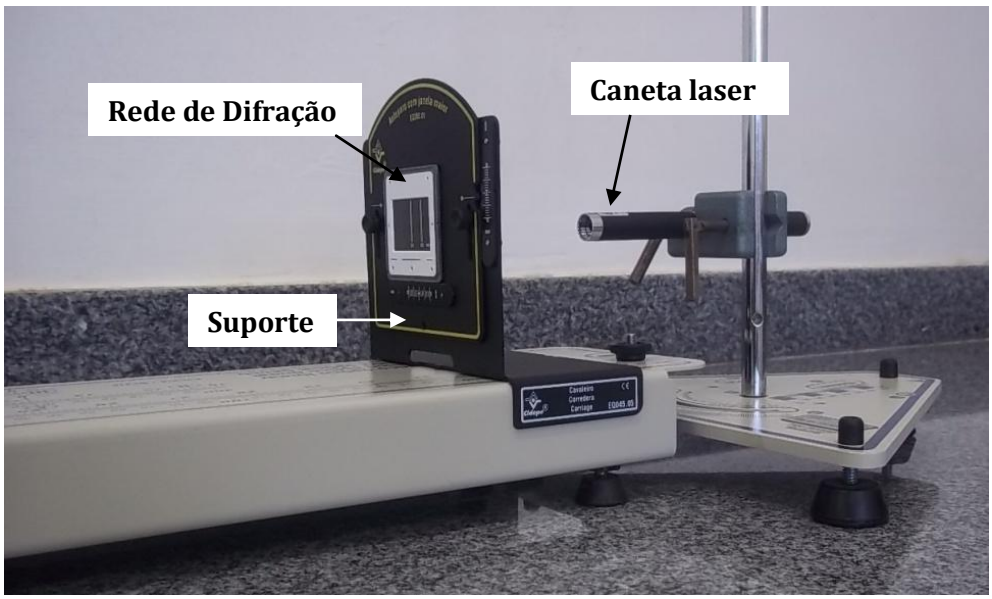

Figura 12 – Montagem experimental para a difração da luz por fendas

2. Para que as medidas sejam feitas da melhor forma possível, a tela com a rede de difração deve ser colocada perpendicularmente ao feixe do laser. Isso pode ser facilmente feito enviando o feixe refletido no vidro novamente para a saída do laser. Isto deve ser feito toda vez que a tela com as fendas forem trocadas.

3. Fixe uma folha de papel com fita adesiva em um anteparo (ou na parede do laboratório). Assim é possível registrar com um lápis o perfil da difração.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Parte 1 - Difração por fenda única

4. Monte o conjunto com o laser, a tela com fenda única e anteparo. Use inicialmente a fenda com abertura **a = 0,1 mm**. Projete o padrão de difração/interferência sobre o anteparo, tal que os padrões de difração possam ser facilmente observados.

5. Utilize uma trena para medir a distância $D \pm \Delta D$, da tela com fenda única ao anteparo.

D ± ΔD =

6. Desenhe cuidadosamente sobre a folha no anteparo, a lápis, o padrão de difração, indicando claramente as posições dos máximos e mínimos. Meça com uma régua a largura $\Delta y_1 \pm \delta(\Delta y_1)$ do máximo central. Anote esta medida na Tabela 1.

Tabela 1 – Largura dos máximos centrais para a tela com fenda única de abertura variável.

a_1 = 0,1 mm	$\Delta y_1 \pm \delta(\Delta y_1) =$
a_2 = 0,2 mm	$\Delta y_2 \pm \delta(\Delta y_2) =$
a_3 = 0,3 mm	$\Delta y_3 \pm \delta(\Delta y_3) =$

7. Deslize a tela com a rede de difração sobre o suporte, tal que a abertura da fenda seja de **a = 0,2 mm**. Suba cerca de 3 cm a folha de papel sobre o anteparo. Repita o item 5. Anote os dados na Tabela 1. Faça o mesmo para a abertura **a = 0,3 mm**.

8. Comente no espaço abaixo: (i) as mudanças observadas no padrão de difração, quando a abertura (**a**) da fenda única é aumentada e, (ii) a relação entre o máximo central e os padrões de difração secundários. No caso (ii), você deverá realizar medidas da largura do máximo central e os padrões de difração secundários.

Comentários:

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

9. Para cada linha da Tabela 1, calcule o comprimento de onda do laser utilizado ($\lambda \pm \Delta \lambda$). Obtenha o valor médio com seu respectivo desvio padrão.

Parte 2 - Difração por fenda dupla

1. Substitua a tela de fenda única por uma que possui fendas duplas, separadas pelas distâncias de **d = 0,2, 0,4 e 0,6 mm**. A abertura (**a**) das fendas é constante.

2. Antes de iniciarmos as medidas, deslize sobre o suporte, a tela com fenda dupla, aumentando continuamente a distância entre as aberturas até **d = 0,6 mm**. Para cada separação, desenhe cuidadosamente sobre a folha no anteparo, a lápis, o padrão de difração, indicando claramente as posições dos máximos e mínimos. Faça comentários a respeito dos padrões de difração, incluindo:

a) O que é modificado com relação ao experimento anterior ?

_____
_____
_____

b) Padrão com separação d = 0,2 mm

_____
_____
_____

c) Padrão com separação d = 0,4 mm

_____
_____
_____

d) Padrão com separação d = 0,6 mm

_____
_____
_____

e) A largura do máximo central se modifica ? Explique.

_____
_____
_____

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

3. Use a fenda dupla com separação **d = 0,6 mm**. Meça a largura do máximo central (distância entre os mínimos que cercam as franjas centrais) e calcule a abertura **a** ± Δ**a** das fendas. Anote o resultado no espaço abaixo. Utilize para isto o comprimento de onda da luz verde [$\lambda = (532 \pm 10)\times10^{-9}$ m], que está impresso na caneta laser e, a distância D ± ΔD, entre o anteparo e a tela com as fendas duplas.

a ± Δ**a** =

4. Tome agora, a distância (Λ) entre 4 franjas à esquerda e 4 franjas à direita da franja central. Obtenha uma média destas distâncias. Obtenha também o desvio padrão, que servirá como incerteza nestas distâncias. Anote os dados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores medidos da distância entre franjas adjacentes.

Λ_1	Λ_2	Λ_3	Λ_4	Λ_5	Λ_6	Λ_7	Λ_8	$\Lambda_{médio}$	$\delta\Lambda$

5. De posse do valor de $\Lambda_{médio} \pm \delta\Lambda$ e, o comprimento de onda $\lambda = (532 \pm 10)\times10^{-9}$ m da luz laser, faça um cálculo da distância entre o anteparo e a tela com as fendas duplas. Este valor coincide, dentro da faixa de incertezas com o valor medido de D ± ΔD ?

Parte 3 - Difração por fendas múltiplas

1. Substitua o conjunto de fendas duplas pelo conjunto com fendas múltiplas. Mova a tela para a esquerda, aumentando o número de fendas, desde N = 2 até N = 5 fendas. Observe as mudanças que ocorrem no padrão de difração. Descreva suas observações no espaço abaixo e explique em seu relatório.

2. De acordo com a Figura 13, substitua o laser pela lanterna com luz branca. Tome agora a tela com a rede de difração (1000 fendas por milímetro). Ligue a lanterna e

observe o padrão de difração sobre o anteparo, que deve estar agora, bem mais próximo da rede de difração.

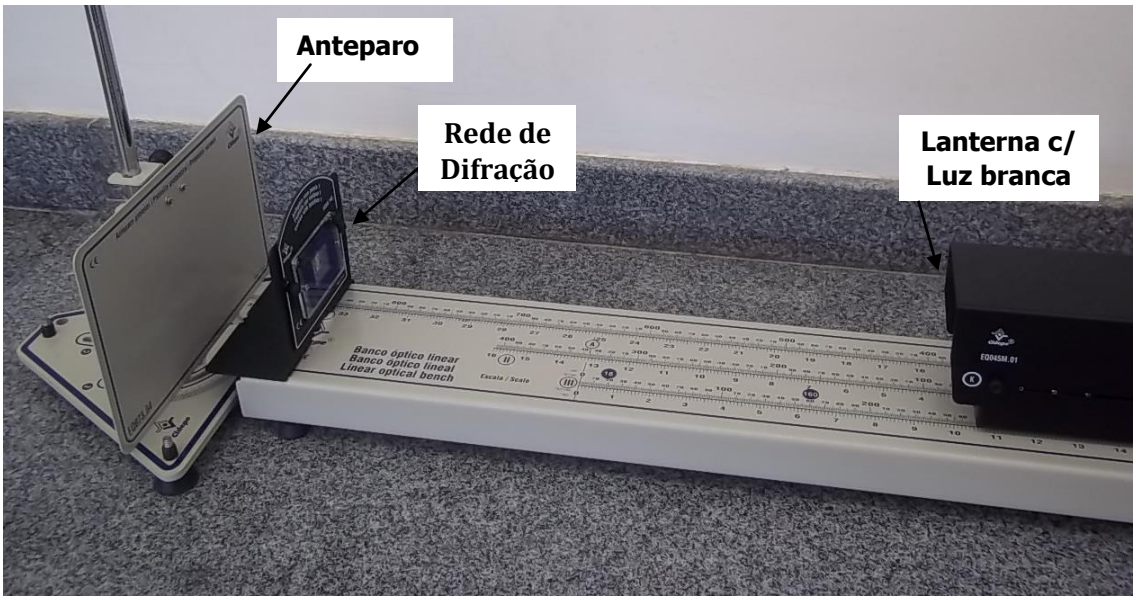

Figura 13 – Montagem experimental para a difração da luz branca

3. Você deverá observar uma luz branca no centro e a partir desta as cores do arco-íris na sequência: violeta, anil, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. Explique em seu relatório esta sequência de cores sobre o anteparo, baseado nos comprimentos de onda de cada componente da luz branca.

3.2.5 O que Incluir no Relatório do Experimento

Parte 1 - Difração por fenda única

- Desenho sobre o papel das figuras de difração.
- Todos os comentários do tópico 8, da parte 1.
- Cálculos dos comprimentos de onda da luz laser incluindo o valor médio e seu desvio padrão.

Parte 2 - Difração por fenda dupla

- Todos os comentários do item 2, da parte 2.
- Cálculo da abertura a ± Δa das fendas.

- Cálculo da distância D ± ΔD que separa o anteparo da tela com as fendas.

Parte 3 - Difração por fendas múltiplas

- Mudanças observadas quando o número de fendas aumenta de N = 2 a 5 fendas.
- Explicação do padrão de cores e suas posições sobre o anteparo quando é realizado a difração da luz branca.

3.2.6 Bibliografia

Difração da luz por fendas Hugo L. Fragnito e Antonio C. Costa. Unicamp – IFGW, Março de 2010.

Física 4. Halliday, Resnick e Krane. 4ª edição. Editora LTC, Rio de janeiro RJ (1996).

Ótica, Relatividade e Física Quântica. Moysés Nussenzveig. 4ª edição. Editora Blucher, São Paulo SP (2011).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

3. Experimento 3: Polarização da Luz

3.3.1 Objetivos

- ✓ Compreender o conceito de irradiância luminosa.
- ✓ Medir a irradiância luminosa em função da distância à fonte.
- ✓ Estudar a polarização da luz.
- ✓ Verificar a lei de Malus.

3.3.2 Materiais Necessários

- ✓ Lâmpada incandescente
- ✓ Um detector de luz
- ✓ Medidor de irradiância luminosa (luxímetro)
- ✓ 1 trilho com graduação milimetrada
- ✓ 2 polarizadores de luz com analisador

3.3.3 Fundamentação Teórica

Irradiância de uma Fonte Luminosa

A irradiância luminosa emitida por uma fonte de luz isotrópica (que emite igualmente em todas as direções) varia com a distância à fonte. Neste momento investiga - se a lei do inverso do quadrado da distância para a irradiância luminosa de uma fonte, localizada a uma distância *r*. Para uma melhor compreensão da irradiância, define - se algumas grandezas como potência, intensidade radiante e irradiância de uma fonte luminosa.

A potência ou **fluxo de energia radiante** (Φ) de uma fonte luminosa é definido como a quantidade de energia emitida por unidade de tempo e, expressa como:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \tag{1}$$

No sistema internacional de unidades (SI) esta é medida como Joule por segundo (J/s). Onde 1J/s é igual a 1 Watt (W).

Define-se a **intensidade radiante** (I), como o fluxo de energia radiante emitida por unidade de ângulo sólido *Ω*. Para esta grandeza, todas as direções dos

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

raios luminosos emitidos devem estar compreendidas dentro de um determinado ângulo sólido *Ω*. Esta quantidade é expressa como

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Um elemento de ângulo sólido é expresso como $d\Omega = dA/R^2$, onde dA é um elemento de área de uma esfera de raio R centrada na fonte luminosa *S*. A Figura 1 é uma ilustração de raios luminosos (representados por setas) compreendidos em um ângulo sólido *Ω* emitidos de uma fonte S. O efeito dos raios em um anteparo localizado em A, é o de produzir um clarão circular, delimitado pelos raios luminosos.

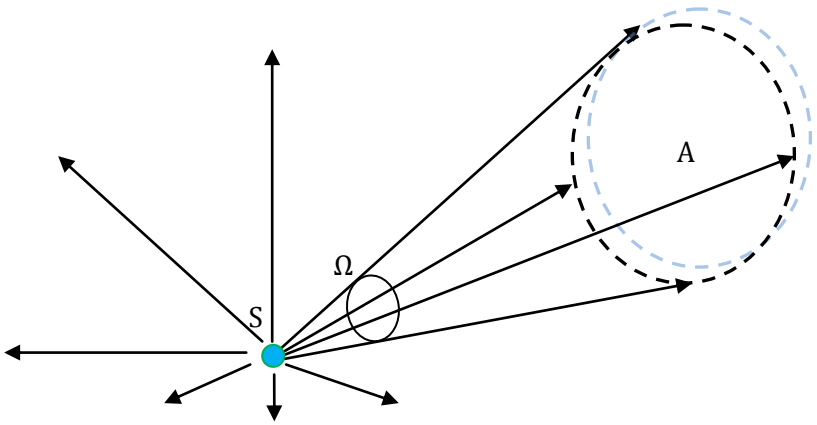

Figura 1. Raios luminosos que partem de uma fonte *S* e atravessam um ângulo sólido *Ω*.

No S.I a intensidade radiante é medida como watts (W) por esferoradiano (sf). Um esferoradiano é a medida de ângulo sólido que subentende na superfície da esfera uma área de R^2. Sendo assim, uma esfera completa possui ângulo sólido de 4π esferoradianos. Outra unidade de medida, para a intensidade luminosa, é o candela (cd). Um candela no SI é definida como a intensidade luminosa emitida por uma fonte, em uma dada direção, de luz monocromática de frequência 540 x 10^{12} hertz e cuja intensidade de radiação em tal direção é de 1/683 watts por esferorradiano. Desta forma, 1 cd = 1/683 W/Sr.

A partir do candela (unidade fundamental do SI), define - se outra unidade para o fluxo de energia radiante (Φ), o lúmen (lm). Um lúmen é o fluxo de energia radiante dentro de um angulo sólido de 1 esferorradiano, emitido por um ponto luminoso com intensidade de 1 candela (em todas as direções).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Na Figura 1, o fluxo de energia radiante que atravessa qualquer área localizada a uma distância *r* da fonte, correspondida pelo ângulo sólido *Ω,* é o mesmo. O mesmo raciocínio vale para a intensidade radiante, visto que *Ω* é o mesmo para qualquer uma dessas superfícies.

Finalmente, se uma elemento de área *dA,* a uma distância *r* da fonte, é iluminado por um fluxo luminoso *dΦ* , a **irradiância** (E) fica definida como:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \tag{3}$$

Mas como dA se relaciona com um ângulo sólido, por meio da equação $d\Omega = dA/R^2$, a equação acima fica:

$$E = \frac{1}{r^2}\frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Logo

$$E = \frac{I}{r^2} \tag{4}$$

A unidade SI da irradiância luminosa é lux. 1 lux é definido como a razão de 1 lumen por metro qudrado (1 lux = lm/m^2). A equação acima descreve a lei do inverso do quadrado da distância (também conhecida como lei fotométrica da distância). Espera-se então que a irradiância da fonte luminosa sobre uma superfície decresça com o quadrado da distância à fonte. A Figura 2 é uma ilustração da geometria da lei do inverso do quadrado para a intensidade luminosa de uma fonte S.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

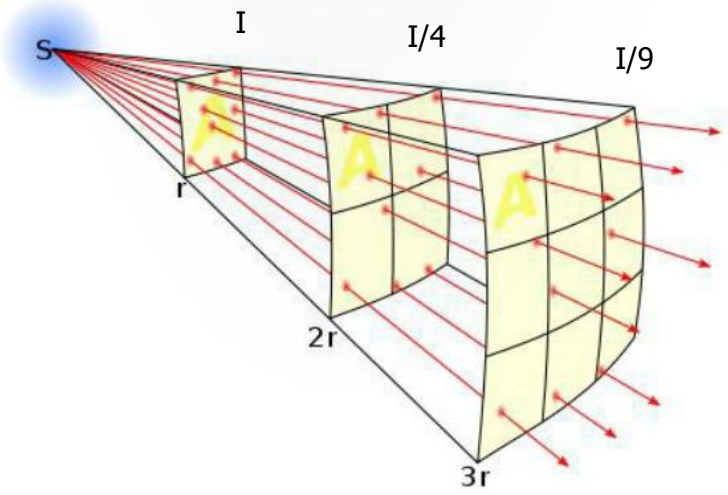

Figura 2- Raios luminosos partindo da fonte S atravessam uma área *A,* delimitada por um ângulo sólido Ω. A uma distancia r, a intensidade luminosa é I e decresce com o inverso do quadrado de da distância.

3.3.4 Procedimentos Experimentais

1 – Posicione detector de irradiância luminosa, com o cabo do luxímetro conectado, conforme a Figura 5 abaixo:

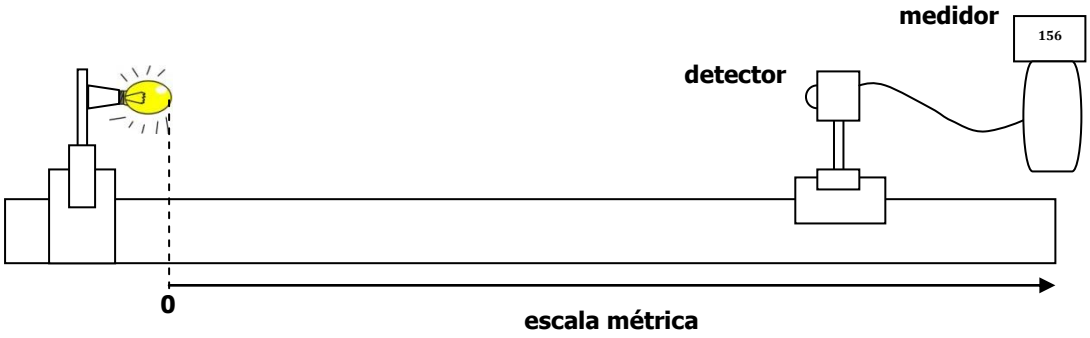

Figura 5 – ilustração do aparato experimental para medição da intensidade luminosa em função da distância à fonte luminosa.

2 – Ligue a lâmpada de 127 V/ AC e o luxímetro.

3 – Posicione o detector a uma distância de 10 cm da lâmpada. Afastando a lâmpada de 5 em 5 cm, meça a irradiância até uma distância de 70 cm. Avalie a incerteza na distância e realize mais três medições, calcule a média e adote o desvio padrão como incerteza. Complete a Tabela 1.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Tabela 1- Valores de irradiância luminosa em função da distância à fonte

Distância (cm)	I_1 (lux)	I_2 (lux)	I_3 (lux)	$I_{médio} \pm \Delta I$
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				

3.3.5 O que Incluir no Relatório do Experimento

- De que forma a luz ambiente pode afetar os resultados da experiência ?
- Faça um gráfico de irradiância em função do inverso do quadrado da distância. O gráfico traçado corresponde ao esperado ? Justifique sua resposta e avalie as possíveis causas de erro.

3.3.6 Bibliografia

Lei de Malus e Lei Fotométrica da distância. Física experimental IV. Centro de Ciências da Natureza, Departamento de Física (Prof. Angel Alberto Hidalgo).

Física 4. Halliday, Resnick e Krane. 4ª edição. Editora LTC, Rio de janeiro RJ (1996).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

4. Experimento 4: Irradiância Luminosa

- ✓ Estudar a polarização da luz.
- ✓ Verificar a lei de Malus.

3.4.1 Materiais Necessários

- ✓ Lâmpada incandescente
- ✓ Um detector de luz
- ✓ Medidor de irradiância luminosa (luxímetro)
- ✓ 1 trilho com graduação milimetrada
- ✓ 2 polarizadores de luz com analisador

3.4.2 Fundamentação Teórica

Polarização da Luz

Em fontes ordinárias de luz, como uma lâmpada incandescente ou o Sol, os átomos agem independentemente e emitem ondas cujos campos eletromagnéticos são orientados aleatoriamente em torno da direção de propagação. Nestas fontes de luz, os campos eletromagnéticos são ondas transversais e, a direção de propagação da luz é dada pelo produto vetorial do campo elétrico (**E**) e magnético (**B**) [**E** X **B**]. Pelo fato de os campos eletromagnéticos não oscilarem em um plano preferencial, diz-se que estas fontes de luz são *não polarizadas*. A direção de polarização é definida, por convenção, como sendo a do campo elétrico da onda. A Figura 3 (a) é uma ilustração de uma onda eletromagnética não polarizada, que se propaga perpendicularmente ao plano da página, cuja direção do vetor **E** muda de direção aleatoriamente.

Existem certos materiais comerciais polarizadores chamados de polaróide que ao serem atravessados por uma onda de luz não polarizada, permitem somente a transmissão de luz, cuja direção de oscilação do campo **E** é fixa no espaço. Esta direção é determinada pelas propriedades da lâmina e a luz desta forma fica *polarizada*. A direção de polarização da lâmina é estabelecida durante o processo de produção, inserindo-se certas moléculas de cadeia longas em uma lâmina de plástico flexível, de modo que estas se alinhem paralelamente. A radiação com a componente do vetor **E** paralelo às moléculas é fortemente absorvida, enquanto que a componente perpendicular passa através da lâmina.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

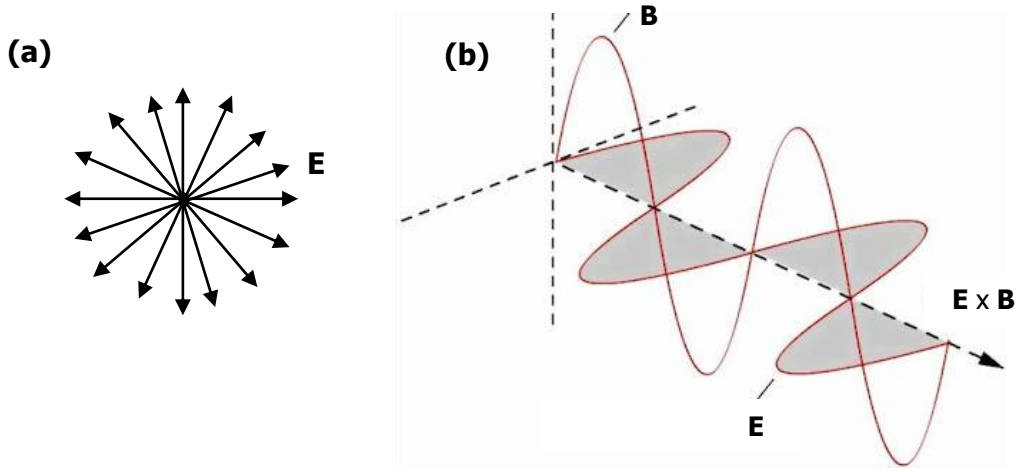

Figura 3 – (a) Ilustração de uma vista de frente de um campo elétrico oscilante de uma luz não polarizada. (b) Ao atravessar um polarizador, os campos E e B oscilam em um direção fixa, determinada pelas propriedades do polarizador

A Figura 3(b) é uma ilustração de uma onda de luz que ao atravessar um polarizador fica com as direções dos campos eletromagnéticos fixas no espaço. A luz também pode ser total ou parcialmente polarizada, por reflexão ao incidir em um meio, ou por um processo chamado espalhamento. Assim a luz solar é parcialmente polarizada pelo processo de espalhamento na atmosfera.

A Figura 4 é a ilustração de uma forma de analisar a intensidade do campo **E** da onda de luz transmitida por um polarizador, com relação a um segundo polarizador, onde suas direções de polarização são determinadas por um ângulo Θ.

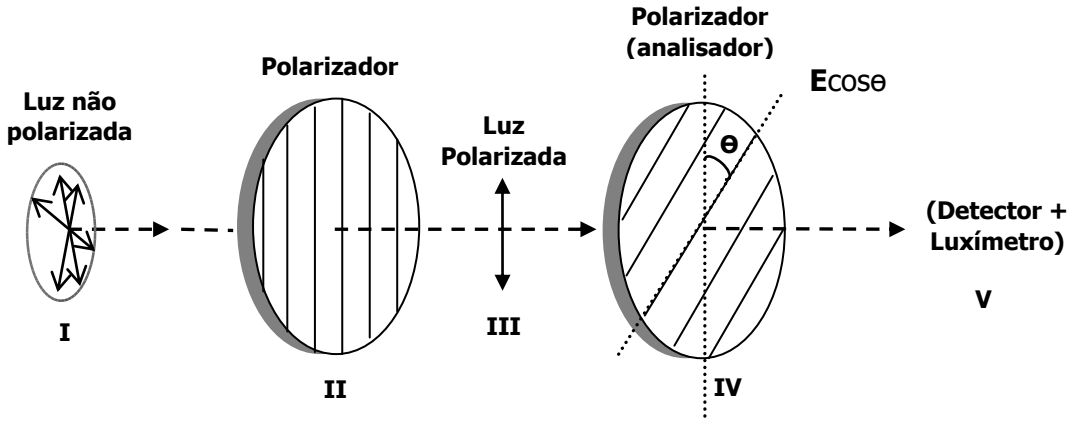

Figura 4 – A Luz não polarizada (I) ao emergir do polarizador (II) fica polarizada na direção vertical (III). Um segundo polarizador funciona como analisador (IV). A intesidade luminona é medida, como função do ângulo Θ, com o auxílio de um detector acoplado ao luxímetro (V).

A direção de polarização está representada por linhas paralelas em cada polarizador. A luz não polarizada (I) ao atravessar o polarizador (II) fica polarizada na direção vertical (III). Um segundo polarizador (IV), que funciona como um analisador da intensidade da luz polarizada, tem sua direção de polarização variada de $0 \leq \theta \leq 90^o$. Desta forma, se amplitude da luz polarizada (III) é $\mathbf{E_m}$, a amplitude da luz emergente do analisador é dada por $\mathbf{E_m}\cos\theta$. Lembrando que a "intensidade" (irradiância) de um feixe luminoso é proporcional ao quadrado da amplitude, a intensidade transmitida varia com θ de acordo com a equação:

$$I = I_m \cos^2\theta$$

Esta equação, chamada de lei de Malus, foi descoberta em 1809 por Etienne Louis Malus, usando técnicas de polarização diferentes das descritas neste roteiro.

3.4.3 Procedimentos Experimentais

1 – Observe o que acontece quando você gira uma placa polarizadora sobre um relógio digital ou um mostrador de cristal líquido.

2 – Olhando para uma lâmpada da sala através de uma placa polarizadora, gire a placa e veja o que acontece. Faça o mesmo com o reflexo da lâmpada na mesa de granito polido da bancada. O fenômeno que você deve observar é chamado de polarização por reflexão. O ângulo de incidência para o qual a luz refletida é totalmente polarizada é chamado de ***ângulo de Brewster***.

3 – Observe a Figura 6 posicione o primeiro polarizador entre uma distância de 5 a 10 cm da lanterna. Não coloque mais próximo para não danificá-lo. Gire o eixo deste polarizador de -90 a 90° e observe se há variação da intensidade luminosa e discuta esta observação. Após isto, posicione-o na posição angular $\Theta = 0^o$.

4 – Monte o segundo polarizador (analisador) a uns 10 cm do primeiro polarizador. Gire o eixo deste analisador de -90° a 90°. Discuta sua observação.

5 – Posicione o detector de irradiância à aproximadamente 2 cm do analisador. Com o luxímetro ligado, certifique-se de que a leitura é máxima quando $\Theta = 0^o$ no analisador.

6 – O segundo polarizador (analisador) é rotacionado com intervalos de 10° entre as posições -90° e 90° e as correspondentes intensidades luminosas determinadas no luxímetro. Complete a Tabela 2 e calcule a média e adote o desvio padrão como incerteza.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

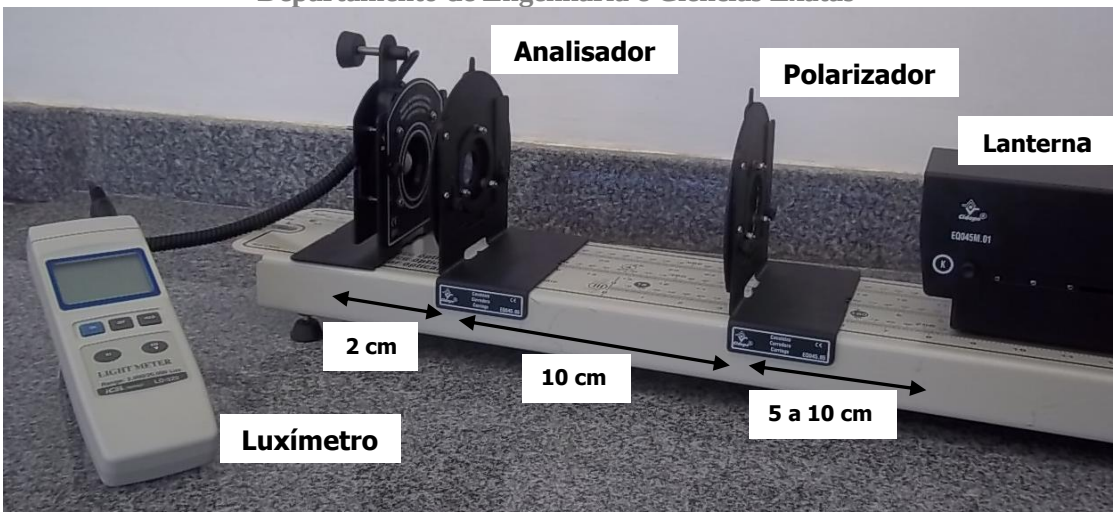

Figura 6 – Ilustração do aparato experimental para medição da intensidade luminosa em função do ângulo entre as direções do polarizador e analisador.

7 – Com os dados obtidos construa uma tabela contendo as intensidades normalizadas $N(\theta) = I(\theta)/I_o$ em função dos ângulos θ.

Tabela 2 – Valores de intensidade luminosa em função do ângulo (Θ) entre as direções de polarização do polarizador.

Θ (o)	I_1 (lux)	I_2 (lux)	I_3 (lux)	$I_{médio} \pm \Delta I$
-90				
-80				
-70				
-60				
-50				
-40				
-30				
-20				
-10				
0				
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

3.4.4 O que incluir no Relatório do Experimento

- Dedução da lei de Malus.

- Em um mesmo gráfico trace as curvas de $I(\theta)/I_o$ em função de θ e $\cos^2\theta$ em função de θ e, verifique se a lei de Malus é obedecida. Não se esqueça de mostrar as incertezas.

- <u>Responda às questões:</u>

  (a) De que forma a luz ambiente pode afetar os resultados da experiência ?

  (b) O que é polarização por reflexão ? Discuta sobre a lei de Brewster.

  (c) Uma onda sonora pode ser polarizada ? Explique.

  (d) Por que os óculos de sol feitos de materiais polarizados têm uma vantagem marcante sobre aqueles que contam simplesmente com efeito de absorção ? Que desvantagem eles podem ter ?

3.4.5 Bibliografia

Lei de Malus e Lei Fotométrica da distância. Física experimental IV. Centro de Ciências da Natureza, Departamento de Física (Prof. Angel Alberto Hidalgo).

Física 4. Halliday, Resnick e Krane. 4ª edição. Editora LTC, Rio de janeiro RJ (1996).