



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

GEISSE KELLY SOARES NERY PONTES

**A PROPAGAÇÃO DA LUZ EM MEIO INOMOGÊNICO: UMA ANÁLISE A
PARTIR DA REFLEXÃO INTERNA TOTAL**

**ARARUNA/PB
2021**

GEISSE KELLY SOARES NERY PONTES

A PROPAGAÇÃO DA LUZ EM MEIO INOMOGÊNICO: UMA ANÁLISE A PARTIR DA REFLEXÃO INTERNA TOTAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação/Departamento do Curso de graduação em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física.

Orientador: Prof. Dr. Mário César Soares Xavier.

**ARARUNA/PB
2021**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

P813p Pontes, Geisse Kelly Soares Nery.
A propagação da luz em meio inhomogêneo [manuscrito] :
uma análise a partir da reflexão interna total / Geisse Kelly
Soares Nery Pontes. - 2021.
21 p.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências,
Tecnologia e Saúde , 2021.
"Orientação : Prof. Dr. Mário César Soares Xavier ,
Coordenação do Curso de Licenciatura em Física - CCTS."
1. Luz . 2. Óptica geométrica. 3. Experimento científico . I.
Título

21. ed. CDD 535

GEISSE KELLY SOARES NERY PONTES

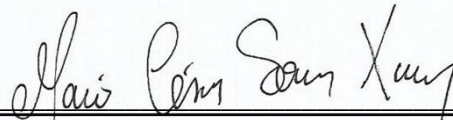
A PROPAGAÇÃO DA LUZ EM MEIO INOMOGÊNICO: UMA ANÁLISE A PARTIR DA
REFLEXÃO INTERNA TOTAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Coordenação /Departamento do Curso de
graduação em Física da Universidade Estadual
da Paraíba, como requisito parcial à obtenção
do título de Licenciado em Física.

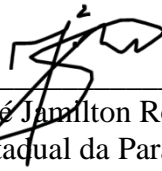
Área de concentração: Física.

Aprovada em: 20/07/21.

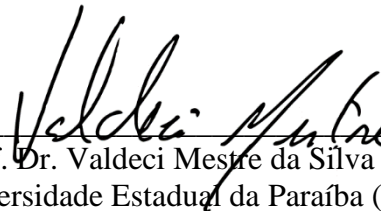
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Mário César Soares Xavier (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. José Jamilton Rodrigues
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Valdeci Mestre da Silva Júnior
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Fontes luminosas e os meios ópticos	11
2.2 Fenômenos relacionados a propagação da luz	13
2.2.1 Reflexão e refração da luz.....	13
2.2.2 Índice de refração.....	17
2.2.3 Reflexão interna total.....	18
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1 Propagação da luz em meios homogêneos	19
3.2 Propagação da luz em um meio material inhomogêneo	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
REFERÊNCIAS	24

A PROPAGAÇÃO DA LUZ EM MEIO INOMOGÊNICO: UMA ANÁLISE A PARTIR DA REFLEXÃO INTERNA TOTAL

RESUMO

O presente trabalho demonstra fenômenos relacionados aos caminhos da luz e como esta se comporta ao interagir com diferentes meios transparentes e quais leis regem fenômenos como estes. Objetivamos estudar os fenômenos de refração e reflexão da luz, em condições controladas e determinar parâmetros do sistema que determinam a trajetória da luz, assim como evidenciar os conceitos físicos provenientes dos mesmos. A partir do experimento relatado, pode-se observar fatos teóricos de maneira prática, que envolvem e relacionam conceitos pertinentes ao estudo da óptica geométrica. Os dados são apresentados em forma de dados discretos, gráficos e imagens das etapas experimentais para então ser feita uma análise dos mesmos.

Palavras chave: Óptica geométrica. Leis. Experimento.

ABSTRACT

This work demonstrates phenomena related to light paths and how it behaves when interacting with different transparent media, and which laws govern phenomena like these. We aim to study the phenomena of refraction and reflection of light, under controlled conditions and determine system parameters that determine the path of light, as well as highlight the physical concepts arising from them. From the reported experiment, theoretical facts can be observed in a practical way, which involve and relate concepts relevant to the study of geometric optics. The data are presented in the form of discrete data, graphs and images of the experimental steps to then be analyzed.

Keywords: Geometric optics. Laws. Experiment.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, o homem se propôs a investigar o comportamento e a natureza da luz, fenômenos estes, que sempre foram sinônimos de curiosidade. As primeiras observações sobre a óptica e os fenômenos da luz datam das civilizações da Antiguidade, como na Grécia Antiga. No século XVI, os estudos de Galileu Galilei subsidiaram fortemente este ramo científico que começou a intensificar seu desenvolvimento. Com contribuições e descobertas de importantes cientistas como: René Descartes, Christian Huygens, Isaac Newton, entre outros. Em geral a óptica se divide em: Óptica geométrica e Óptica física (XAVIER, 2020).

Durante o período correspondente ao século XVII, surgiram duas diferentes linhas no pensamento científico que buscavam a explicação do comportamento da luz: a teoria corpuscular e a teoria ondulatória da luz. A primeira, afirma que a luz é composta por minúsculas partículas de energia emitidas pelos corpos luminosos, essa teoria conseguia explicar os processos de reflexão e refração da luz e tinha como seu principal defensor Isaac Newton (1642-1627). Por sua vez, Christian Huygens (1629-1695) defendia a ideia de que a luz era uma onda, o que também conseguia explicar satisfatoriamente os mesmos fenômenos. Passaram-se dois séculos para que alguns experimentos, como o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de raios X, conseguissem sugerir a capacidade de dualidade da luz, ou

seja, esta poderia se comportar tanto como partícula quanto como onda dependendo do fenômeno em questão. Dessa maneira, durante o século XVII, dois modelos para a natureza da luz balançavam o cenário da óptica. O primeiro, corpuscular, associado ao nome de Isaac Newton, que sustentava a ideia de que a luz era composta por partículas, e o segundo, ondulatório, em que Christian Huygens se destacava.

Em 1905, Albert Einstein (1879-1955), apresentou sua contribuição no estudo da natureza da luz, propondo que ela poderia ser descrita como pequenos pacotes de energia (quantum de luz), levando em consideração o fato que a matéria nos parece contínua, no entanto, ela é composta por átomos.

O físico francês Louis-Victor de Broglie (1892-1987), incorporou as ideias introduzidas por Einstein, dando passos importantes em direção ao desenvolvimento da mecânica quântica, realizando um trabalho no sentido de associar um modelo ondulatório à teoria corpuscular. (ALBUQUERQUE, 2017, p.145).

Assim, ele postulou que a dualidade se aplicava também às partículas de matéria, como o elétron, este teria característica de onda e de partícula, dessa maneira, quando a luz interage com a matéria e ocorre a colisão com elétrons e os fótons de luz se comportam como partículas de energia, já nos fenômenos da refração e da interferência, a luz se comporta como onda. Isso evidencia a natureza dual da luz, que se apresenta como onda e também como um feixe de partículas (os quanta de luz), dando origem assim ao termo “dualidade onda partícula”.

A luz se propaga em linha reta em meios homogêneos, porém em meios inhomogêneos ela pode apresentar trajetórias curvas. Um exemplo disso é o processo de refração, que consiste no processo da luz passar pela superfície que separa dois meios com diferentes índices de refração. Neste trabalho, objetivamos estudar esse fenômeno em condições controladas e determinar parâmetros do sistema que determinam a trajetória da luz. Para realizar as medidas de índices de refração dos meios materiais líquidos, utilizamos o fenômeno de reflexão total da luz.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fontes luminosas e os meios ópticos

É denominado fonte de luz qualquer corpo que possa emitir luz. Quando o corpo emite luz própria, como o Sol, as demais estrelas, uma vela ou uma lâmpada acesa, é chamado de fonte primária de luz ou corpo luminoso. Quando o corpo emite a luz que recebeu de outro corpo, ele é uma fonte secundária de luz ou corpo iluminado: é o caso dos planetas, dos satélites naturais, como a Lua, ou até mesmo uma parede clara refletindo a luz. O corpo iluminado pode ser observado porque ele reflete parte da luz que recebe de um corpo luminoso. A representação gráfica da propagação da luz emitida por uma fonte de luz é dada por segmentos de reta, que indicam direção e sentido, denominados raios de luz. De acordo com Youg e Freedman (p.3, 2009):

Para descrever as direções de propagação da luz, em geral é mais conveniente representar a onda luminosa por meio de um raio. (...) os raios de luz foram empregados muito tempo antes de se estabelecer a natureza ondulatória da luz. Na descrição corpuscular da luz, os raios são as trajetórias das partículas. Já do ponto de vista ondulatório, um raio é uma linha imaginária ao longo da direção de propagação da onda. (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p.3)

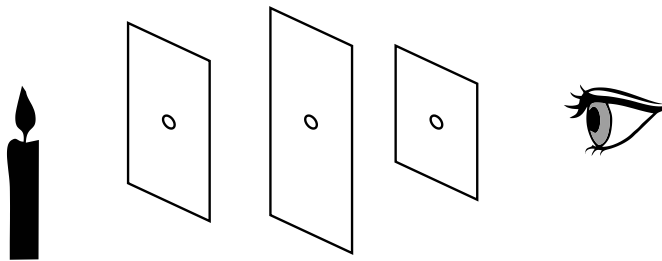
Para entender os fenômenos ópticos, é necessário conhecer o “caminho que a luz percorre”, verificar como ela se propaga, e também como se desvia ao passar por determinados meios. Para isso, é fundamental conhecer estes meios de propagação.

Um meio que permite a propagação de luz em trajetórias regulares e bem definidas, fornecendo uma visão nítida dos objetos, ou que possibilita enxergar com nitidez a fonte de luz, é chamado meio transparente. O único meio absolutamente transparente à luz é o vácuo, mas podemos considerar transparentes alguns materiais, como o vidro, a água e o ar, em pequenas quantidades. Já os meios em que a luz se propaga em trajetórias irregulares e indefinidas, não permitindo uma visão nítida da fonte de luz ou de objetos através deles, são chamados meios translúcidos. O vidro fosco, a água turva, o papel de seda e o nevoeiro são alguns exemplos. Os meios que impedem a propagação da luz em seu interior, não permitindo a visão dos objetos ou da fonte de luz através deles, são denominados meios opacos. São exemplos: paredes, portas, chapas de metal e caixas de papelão.

É possível observar três princípios da óptica geométrica que são fundamentais para a compreensão de muitos fenômenos quando a luz se propaga em meios homogêneos e transparentes. São eles: princípio da propagação retilínea, princípio da independência dos raios de luz e princípio da reversibilidade da luz.

O princípio da propagação retilínea acontece quando a luz se propaga em linha reta. Essa propriedade pode ser verificada na figura a seguir:

Figura 1 - experimento que comprova o princípio da propagação retilínea da luz, onde a luz só atravessa os antepassos quando os orifícios estão na mesma linha.

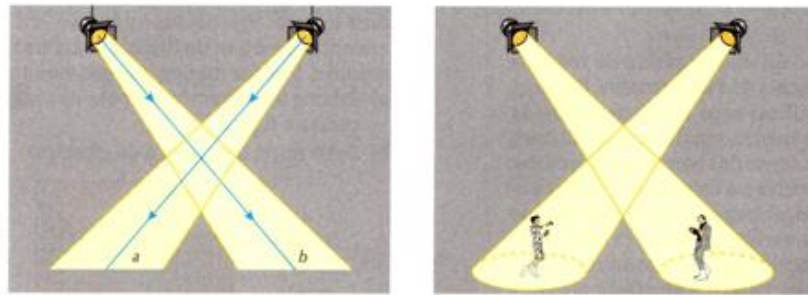


Fonte: próprio autor.

O princípio em si afirma que, “Em um meio homogêneo e isotrópico a luz se propaga em linha reta em todas as direções e sentido”, considerando um meio homogêneo como sendo aquele em que todos os pontos que o constituem apresentam as mesmas propriedades físicas, de densidade, temperatura e pressão. Um meio isotrópico é aquele em que a velocidade da luz é a mesma em qualquer direção de propagação, e um meio transparente é aquele que permite a visualização dos objetos através dele.

De acordo com o princípio da independência dos raios de luz, é possível enxergar dois objetos ao mesmo tempo, pois os raios de luz que são emitidos por eles se cruzam sem que ocorram mudanças na direção de propagação.

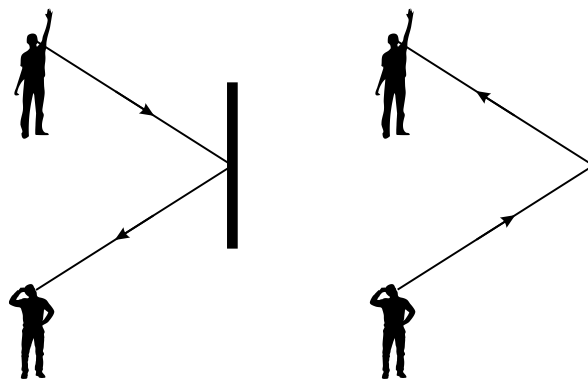
Figura 2 - Esquema de propagação onde os raios se cruzam e não há interferência entre eles, caracterizando o princípio da independência dos feixes.



Fonte: <https://www.gestaoeducacional.com.br/luz-refracao-e-reflexao/>

O princípio da reversibilidade da luz indica que, a trajetória seguida pela luz é a mesma, independentemente do sentido de propagação, ou seja, independe do lugar em que esteja a fonte, então por exemplo, quando um motorista está dirigindo, ele pode enxergar um passageiro sentado no banco de trás, pelo espelho retrovisor. Da mesma maneira, o passageiro pode enxergar o motorista pelo mesmo espelho.

Figura 3 - Esquema ilustrando que trajetória dos raios não depende do sentido de propagação. Portanto, podemos ver uma pessoa através de um espelho quando a pessoa nos vê através dele também.



Fonte: próprio autor.

2.2 Fenômenos relacionados a propagação da luz

2.2.1 Reflexão e refração da luz

A luz se propaga com grande velocidade, em linha reta e em todas as direções. Quando um feixe de luz incide em uma superfície qualquer, podem acontecer os chamados fenômenos ópticos. Entre uma série de fenômenos ópticos importantes, dependendo da superfície, o feixe de luz pode sofrer reflexão, refração e absorção. Os três podem ocorrer simultaneamente, em maior ou menor intensidade, dependendo do material e da superfície. A maior parte desses fenômenos conhecidos envolvem o comportamento de uma onda quando esta atinge uma interface entre dois materiais.

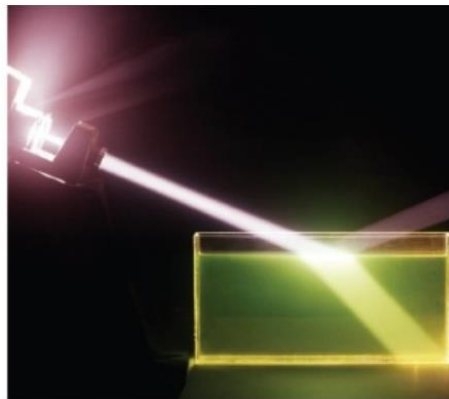
Quando a luz incide sobre uma superfície separando dois meios, podem ocorrer dois fenômenos distintos: reflexão e refração da luz. “A passagem da luz por uma superfície (ou interface) que separa dois meios diferentes é chamada de refração” (HALLIDAY et. Al, 2009). Ocorre neste processo, a alteração da velocidade de propagação da luz por meio de um desvio da direção original, sendo assim, a luz sofre um desvio angular em relação à reta normal, passando de um meio transparente para outro com índices de refração diferentes. Assim, se a incidência da luz no meio for normal, o ângulo de incidência é igual a zero, ou seja, a luz não

sofrerá desvio e, portanto, seu ângulo refratado será nulo. Por outro lado, quando a incidência da luz provocar um desvio oblíquo, o raio luminoso se aproximará mais da reta normal, levando ao desvio na trajetória luminosa.

A reflexão da luz é um processo pelo qual, um feixe de luz ao incidir sobre uma superfície, retorna ao seu meio de origem. Esse fenômeno nos permite enxergar os objetos ao nosso redor. Dessa maneira, os raios incidentes de luz, são aqueles que atingem a superfície enquanto os raios refletidos, são aqueles que retomam ao meio de propagação. As condições necessárias para que ocorra a reflexão regular da luz, também denominadas de leis da reflexão afirmam que os raios de luz incidente e refletido precisam formar o mesmo ângulo com relação à direção normal, a esta condição é atribuída a primeira lei da reflexão. De acordo com a segunda lei da reflexão da luz, os raios de luz incidente e refletido precisam estar contidos no mesmo plano.

A figura abaixo, demonstra um exemplo de ondas luminosas que se propagam aproximadamente em linha reta, onde um feixe luminoso incidente, proveniente da esquerda e que se propaga no ar, encontra uma superfície plana de água, parte da luz é refletida pela superfície, formando um feixe que se propaga para cima e para a direita. (HALLIDAY et. al, 2009).

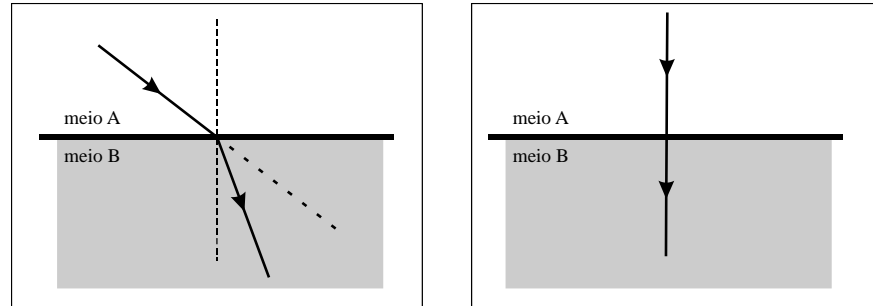
Figura 4 - Neste esquema, a mudança de direção do feixe luminoso ocorre apenas na interface; dentro da água a luz se propaga em linha reta, como no ar. É perceptível os dois fenômenos descritos acima, que ocorrem simultaneamente.



Fonte: (Halliday, 2009)

Ocorre neste processo, a alteração da velocidade de propagação da luz por meio de um desvio da direção original, sendo assim, a luz sofre um desvio angular em relação à reta normal, passando de um meio transparente para outro com índices de refração diferentes. Assim, se a incidência da luz no meio for normal, o ângulo de incidência é igual a zero, ou seja, a luz não sofrerá desvio e, portanto, seu ângulo refratado será nulo. Por outro lado, quando a incidência da luz provocar um desvio oblíquo, o raio luminoso se aproximará mais da reta normal, levando ao desvio na trajetória luminosa.

Figura 5 - (1) incidência de raio oblíquo, onde a passagem de um meio para o outro, ocasiona um desvio na trajetória do raio. (2) incidência perpendicular, onde a refração ocorre sem desvio.



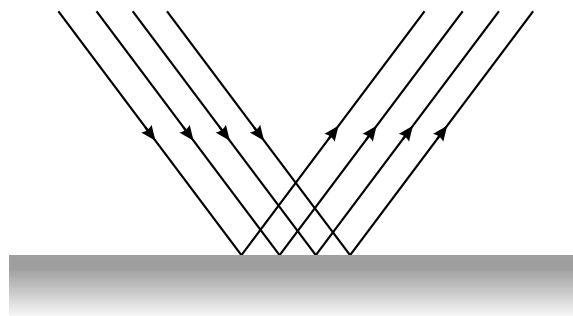
Fonte: próprio autor.

No fenômeno de refração, a frequência da luz não se altera, no entanto, sua velocidade e comprimento de onda variam de maneira inversamente proporcional, sendo assim, se a velocidade da luz diminui, seu comprimento de onda aumenta e vice-versa. Quando um raio de luz incide obliquamente, fazendo um ângulo θ_1 com a reta normal à superfície, na interface entre dois meios, por exemplo, ar-vidro, tem-se um raio refletido fazendo um ângulo θ_1' com a normal, de maneira que:

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

A quantidade de energia refletida, quando comparada à energia incidente, depende de uma série de fatores, como a natureza da superfície e a direção da incidência, por exemplo. A reflexão da luz pode ser classificada em dois tipos, são eles: especular (ou regular) e difusa. Respectivamente, na reflexão especular da luz, a superfície refletora é polida e lisa, sendo assim, os raios são refletidos regularmente, o que torna possível observar a imagem do objeto. A luz é refletida numa só direção, ou seja, os raios que incidem paralelos entre si, permanecem paralelos após a reflexão, são exemplos: espelhos, metais, vidros e até mesmo na reflexão da paisagem na superfície de um lago. A figura abaixo ilustra a descrição deste tipo de processo:

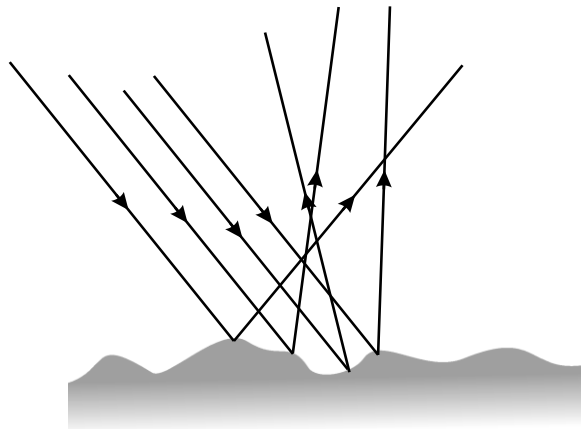
Figura 6 - Diagrama simples da ilustração do processo de reflexão especular ou regular da luz. Os raios da esquerda caracterizam a luz incidente e os raios da direita a luz especular refletida.



Fonte: próprio autor.

No caso da reflexão difusa da luz (irregular), acontece quando se tem uma superfície refletora que não é polida, após a incidência, e a luz se espalha em todas as direções e sentidos. Por exemplo, a lousa e a parede são superfícies irregulares. Assim, superfícies que apresentam reflexão difusa refletem a luz, mas não são capazes de produzir imagens refletidas. A reflexão é reforçada em metais pela supressão de propagação da onda além de suas profundezas da pele. A figura abaixo ilustra esse tipo de processo:

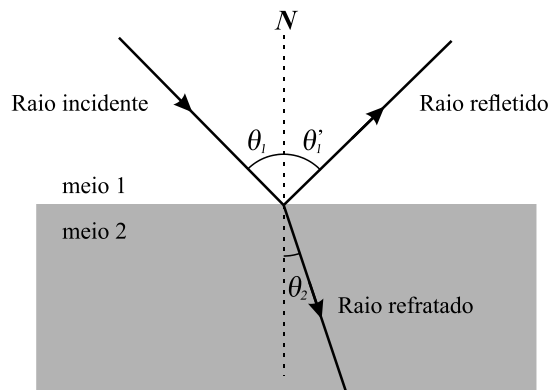
Figura 7. Diagrama simples da ilustração do processo de reflexão difusa ou irregular, que ocorre em superfícies com rugosidade e ocasionam o espalhamento dos raios luminosos.



Fonte: próprio autor.

A figura 8 abaixo, ilustra a reflexão e a refração de um feixe de luz incidente em uma superfície de água horizontal através da representação de raios, onde os ângulos de incidência (θ_1), de reflexão (θ_1') e de refração (θ_2) estão indicados, respectivamente.

Figura 8 - Reflexão e a refração de um feixe de luz incidente em uma superfície.



Fonte: próprio autor.

O raio refletido está no plano incidente e tem um ângulo de reflexão idêntico ao ângulo de incidência. Já o raio refratado também está no plano incidente e apresenta um ângulo de refração θ_2 que se relaciona com o ângulo θ_1 e pode ser expressa matematicamente através da equação:

$$n_2 \text{sen} \theta_2 = n_1 \text{sen} \theta_1 \quad (2)$$

Onde, n_1 e n_2 são constantes adimensionais, denominadas de índice de refração.

A equação acima caracteriza a segunda lei da refração, onde os senos dos ângulos de incidência e refração são diretamente proporcionais às velocidades da onda nos respectivos meios. É comumente conhecida como a Lei de Snell-Descartes, por ter sido descoberta experimentalmente pelo holandês Willebrord van Royen Snell (1591-1626) e mais tarde

deduzida por René Descartes, a partir de sua teoria corpuscular da luz. Na primeira lei, temos que o plano de incidência e o plano da luz refratada coincidem, ou seja, são coplanares. A Lei de Snell também pode ser expressa em termos de uma razão dos comprimentos de onda do raio em cada meio, λ_1 e λ_2 :

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (3)$$

2.2.2 Índice de refração

Todos os materiais apresentam um índice de refração, propriedade que quantifica a resistência que eles apresentam para propagação da luz em relação ao vácuo, que é definido como sendo exatamente 1; por meio do desvio que o raio sofre ao refratar-se, caracterizando assim o meio onde se propaga uma determinada luz monocromática. O índice de refração absoluto de um material é dado por:

$$n = c/v \quad (4)$$

Representado pela letra n , o índice de refração absoluto corresponde a razão entre a velocidade da luz no vácuo c e a velocidade da luz no meio considerado v , na medida que, quanto maior for o índice de refração de um meio, menor será a velocidade de propagação da luz nesse meio.

O índice de refração absoluto sempre tem um valor maior ou igual a 1 ($n > 1$). A velocidade da luz no vácuo c é de $3,8 \times 10^8 \text{m/s}$, em qualquer outro meio é menor que este valor, sendo assim, o valor do índice de refração em qualquer outro meio é sempre maior que 1.

O índice de refração relativo calcula o índice de um meio para o outro, expresso pela seguinte fórmula:

$$n_{a,b} = \frac{n_a}{n_b} = \frac{v_b}{v_a} \quad (5)$$

Onde n é o índice de refração e v a velocidade da luz no meio. A luz sempre se propaga mais lentamente através de um material do que no vácuo, portanto, o valor de n em qualquer meio material é sempre maior do que 1. Vejamos, na tabela 1 os valores dos índices de refração para algumas substâncias:

Tabela 1 - Índices de refração para determinadas substâncias

Material	Índice de refração (n)
Ar	1,0003
Gelo	1,31
Água	1,33
Álcool	1,36
Óleo	1,46

Diamante	2,42
----------	------

Fonte: próprio autor.

Note que o valor de n para o ar é muito próximo do seu valor para o vácuo. Assim, em certos casos, pode-se considerar seu valor como 1. Observe que o valor para a refração da luz no diamante é muito grande, fazendo com que a luz viaje muito mais devagar nesse meio do que no vácuo.

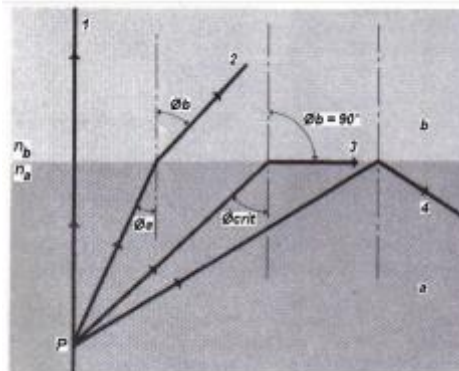
A velocidade da luz depende do ambiente em que ela se propaga, pois quanto maior for índice de refração menor a velocidade da luz no meio, ou seja, o índice de refração varia de um ambiente para outro. A essa capacidade de redução da velocidade de propagação da luz entre dois meios distintos, denominamos de refringência. Quando temos dois meios distintos, o meio que apresenta um maior índice de refração é chamado de mais refringente, já o que apresenta o menor índice é chamado de menos refringente.

2.2.3 Reflexão interna total

A reflexão interna total é um fenômeno óptico que acontece quando a luz que incide em uma superfície que separa dois meios, no sentido do mais refringente para o menos refringente é refletida totalmente, de modo com que ela não saia do meio de origem. Para esse fenômeno ocorrer é necessário que o ângulo de incidência seja maior que um certo ângulo limite ou ângulo crítico.

Quando um raio incide de um meio a para um meio b , onde $n_a > n_b$, conforme a Figura 9, existe um ângulo de incidência para o qual o raio refratado emerge tangente à superfície. Este ângulo é chamado ângulo crítico ou ângulo limite.

Figura 9 - Características do raio refratado quando o raio incide com diferentes ângulos. (1) incidência normal; (2) incidência com ângulo qualquer menor que o ângulo crítico; (3) incidência com o ângulo crítico; (4) incidência com ângulo maior que o ângulo crítico.



Fonte: <http://demonstracoes.fisica.ufmg.br/artigos/ver/84/7.-Reflex%CB%9Cao-Total>

De acordo com a lei de Snell, se um raio de luz passa de um meio mais refratário para um meio menos refratário $\text{sen}\theta_r > 1$. Onde nesse caso, não teremos raio refratado, pois todo raio incidido é refletido. Portanto, a reflexão interna total ocorre quando toda luz que incide na água, por exemplo, não passa de um meio para o outro, isso ocorre para ângulos de incidências maiores que o ângulo crítico θ_c . Podemos determinar o ângulo crítico:

$$n_1 \text{sen}\theta_c = n_2 \text{sen}90^\circ \quad (6)$$

Ou,

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (7)$$

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

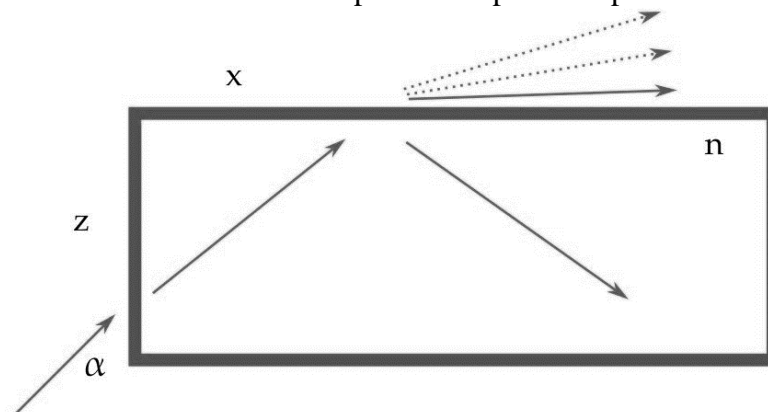
Materiais e métodos:

- uma cuba de vidro de dimensões 40 cm × 5 cm × 5 cm ($n_v=1,5$);
- 500 ml de água de torneira;
- 150 ml de água misturada com açúcar;
- Suporte para a ponteira laser;
- LASER de diodo verde;
- Régua;
- Marcador pincel para o vidro da cuba;
- Fita adesiva.

3.1 Propagação da luz em meios homogêneos

Iniciamos o procedimento experimental calculando a medida do índice de refração da água por meio da reflexão interna total. Nesta primeira parte, iremos observar os fenômenos envolvidos quando a luz passa de um meio homogêneo para outro, do sentido do menos refringente para o mais refringente. Para isso, preenchemos uma cuba de vidro de dimensões 5 cm de altura x 40 cm de comprimento com 500 ml de água pura. Em seguida, com apoio de um suporte posicionamos a ponteira de um laser de 532nm apontando o feixe para uma das faces quadradas da cuba, conforme indicado na figura a seguir:

Figura 10 - Esquema ilustrativo da visão superior do aparato experimental.



Fonte: sociedade brasileira de física.

É importante padronizar a posição da ponteira do laser objetivando atenuar incertezas. Para realizar as medidas de índices de refração dos meios materiais líquidos, utilizamos o fenômeno de reflexão total da luz. Na figura acima temos as bordas remarcadas, representado o vidro, ou seja, o vidro está no começo do caminho do feixe do laser, o que interfere nas medições, entretanto, vamos aceitar a fórmula negligenciando sua participação, que é dada pela seguinte expressão:

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{1}{n} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + z^2}} \quad (8)$$

$$n = \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{x} \quad (9)$$

$$z = x \cdot \sqrt{n^2 - 1} \quad (10)$$

É possível ajustar o ângulo α para observar o fenômeno de reflexão total, observando o feixe transmitido que irá ficando mais rasante até não poder ser mais visto fora da cuba.

3.2 Propagação da luz em um meio material inhomogêneo

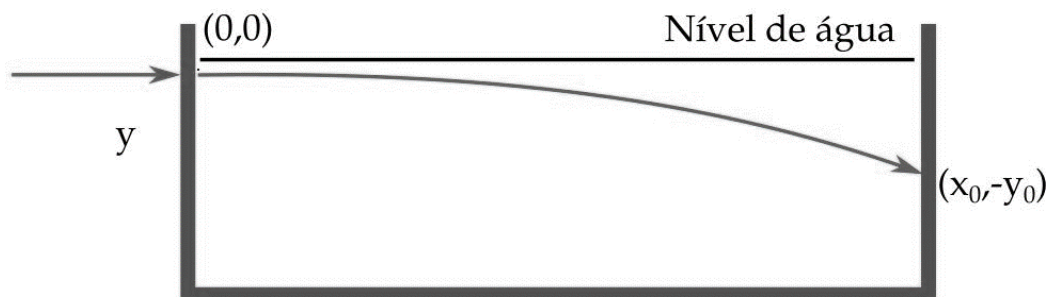
A luz se propaga em linha reta em meios homogêneos, mas em meios inhomogêneos ela pode apresentar trajetórias curvas. Diferente dos meios homogêneos estudados até agora, neste meio, o índice de refração varia continuamente de um ponto para outro. Nesta parte do experimento, objetivamos estudar esse fenômeno em condições controladas e determinar parâmetros do sistema que determinam a trajetória da luz.

Segundo a teoria, o índice de refração da solução cresce lentamente com a profundidade com a expressão:

$$n(y) = n_0 + ky \quad (11)$$

Sendo n_0 o índice de refração à altura inicial, a profundidade (y), e k uma constante. Observe que não há dependência com outras coordenadas do sistema. Considerando que um feixe de luz laser penetra no meio na posição y próxima à superfície da água, como esquematizado na figura abaixo:

Figura 11 - Feixe laser se propagando em meio inhomogêneo.



Fonte: sociedade brasileira de física.

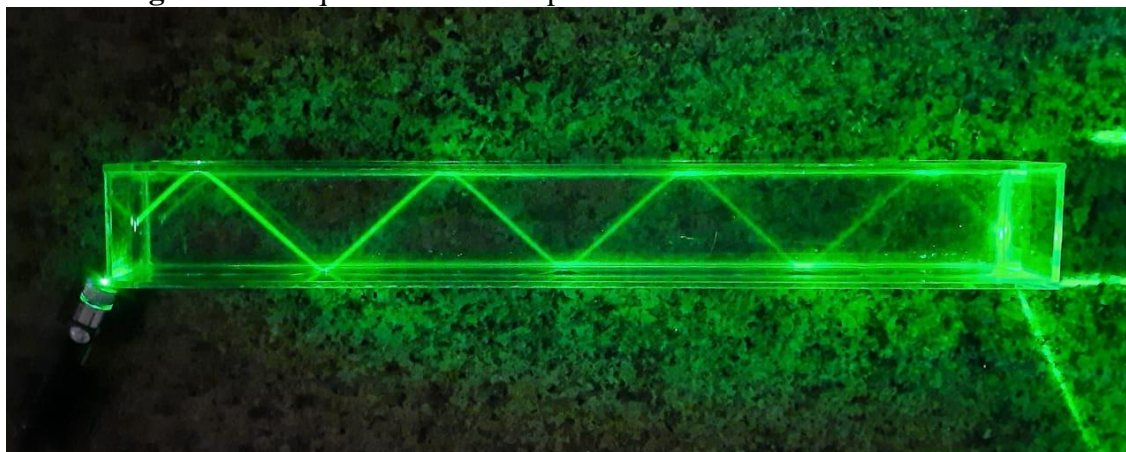
Para a preparação da solução, colocamos 150 ml de água com açúcar e em seguida adicionamos lentamente, a fim de evitar turbulências, 500 ml de água em uma das extremidades da cuba, causando a menor perturbação possível no sistema. Posicionamos o laser na extremidade oposta à inserção da água.

Neste momento, utilizaremos o método de reflexão total utilizado na parte 1 do experimento. Investigaremos a dependência do índice de refração n com a profundidade y .

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observe a figura abaixo, onde ocorre a reflexão interna total no interior da cuba de vidro em meio homogêneo, proposta na primeira parte de nosso procedimento experimental.

Figura 12 - Esquema de visão superior do fenômeno de reflexão interna total.



Fonte: próprio autor.

Calculamos o ângulo limite de maneira indireta, a partir das medidas de distâncias X e Z que estão indicadas na figura 10, acima.

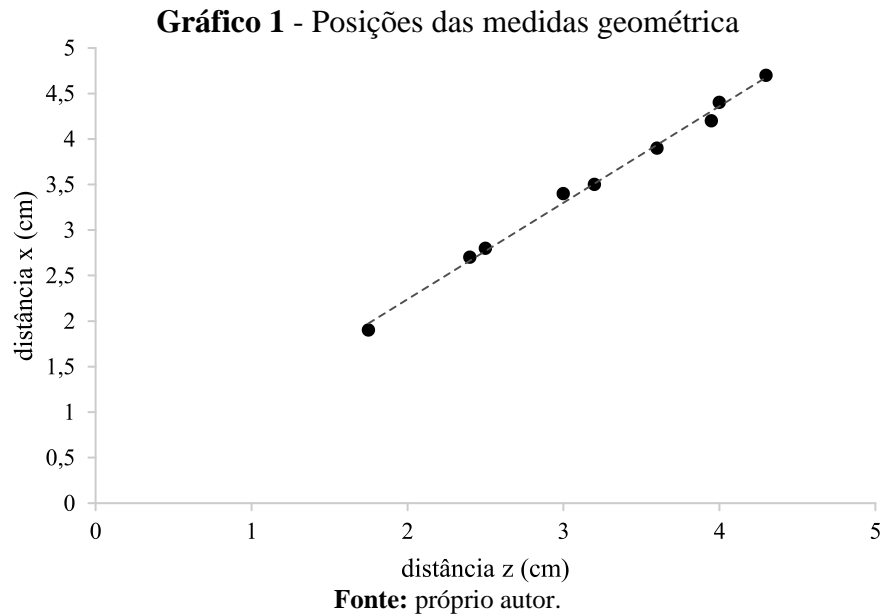
A tabela 2 abaixo, ilustra os valores das medidas geométricas encontradas no ângulo crítico, ou seja, quando há a ausência de luz transmitida para fora do aparato experimental, e movimentamos o feixe de luz paralelamente à parede da cuba mantendo esse ângulo de interesse.

Tabela 2 - medidas geométricas e seus respectivos índices

$(Z \pm 0,1)$ cm	$(X \pm 0,1)$ cm	n
1,75	1,9	1,36
2,4	2,7	1,34
2,5	2,8	1,34
3	3,4	1,33
3,2	3,5	1,35
3,6	3,9	1,36
3,95	4,2	1,37
4	4,4	1,35
4,3	4,7	1,36

Fonte: próprio autor.

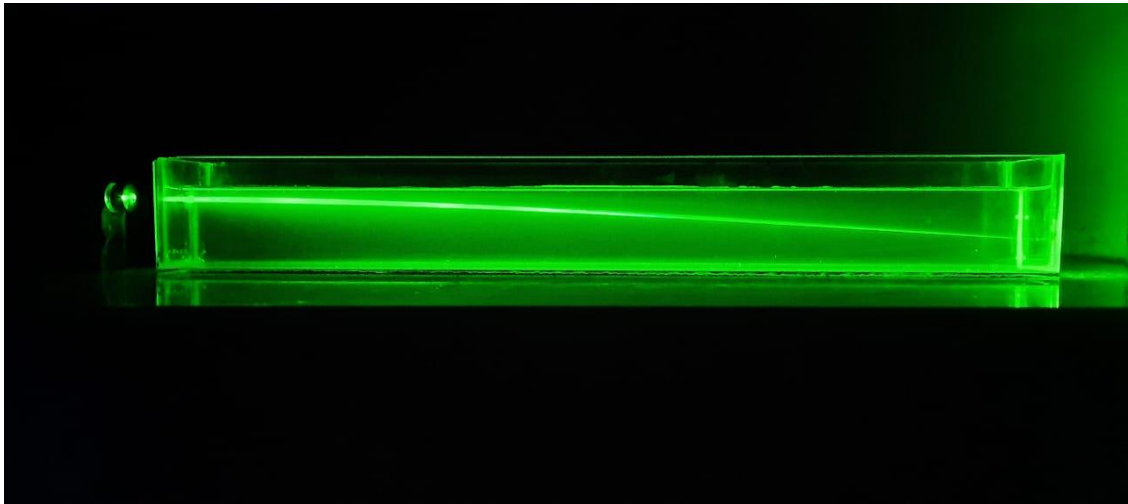
Após as medições dos valores de Z e X , onde ocorre a reflexão interna total, plotamos o gráfico abaixo que relaciona as medidas geométricas índice de refração n . A média entre as medidas de n corresponde ao valor de 1,35. Podemos considerar um valor coerente, já que o valor do índice de refração da luz na água equivale a 1,33.



Através dos dados expostos no gráfico 1, é possível calcular os coeficientes a partir da regressão linear, que apresentaram o valor de 1,06 para o coeficiente angular e 0,11 para o coeficiente linear, que são dados com valores significativos e dentro da margem esperada. A partir da equação (10), podemos deduzir o índice de refração, já que $1,06 = \sqrt{n^2 - 1}$. O comportamento praticamente linear das medidas se deu pelo fato dos ângulos estarem bem alinhados.

A figura abaixo ilustra a propagação do feixe de luz em um meio inhomogêneo, que caracteriza a segunda parte experimental.

Figura 13 - Propagação da luz em um meio inhomogêneo.



Fonte: próprio autor.

Iniciamos direcionando o laser para uma extremidade da cuba com os suportes fornecidos, posicionando-o na maior altura possível, próxima ao nível de água. Por conseguinte, realizamos as medidas da profundidade de saída y_0 em função do tempo, marcando as variações de altura com uma caneta, de acordo com os sinais sonoros emitidos a cada 5 min. Adotamos o referencial como sendo a base da cuba, e com isso nossos valores obtidos passaram a ter valores positivos como indicados na tabela 3. Repetimos esse

procedimento durante o intervalo de 30 min, e observamos o comportamento do feixe luminoso. A tabela abaixo ilustra os valores de saída em função do tempo.

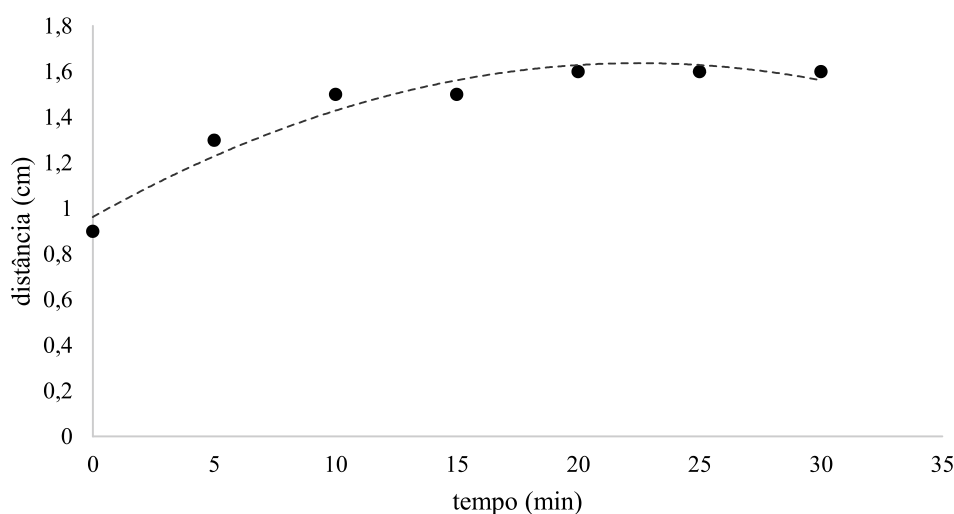
Tabela 3 - Valores de saída do feixe de luz em função do tempo t .

$t(\text{min})$	$(y_0 \pm 0,1) \text{ cm}$
0	0,9
5	1,3
10	1,5
15	1,5
20	1,6
25	1,6
30	1,6

fonte: próprio autor.

Como podemos observar nos dados acima, as variações de profundidade de saída y_0 foram maiores nos instantes iniciais, isso se deu pelo fato da concentração de água com açúcar passar pelo processo de decantação e se estabilizar no fundo da cuba de vidro. Com isso, obtemos o gráfico abaixo:

Gráfico 2 - Variações de profundidade de saída y_0 em função do tempo t .



Fonte: próprio autor.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização dos experimentos, foi possível observar diferentes fenômenos ópticos envolvidos na propagação de luz em diferentes meios, a refração, a reflexão e a reflexão interna total. Conseguimos observar que a luz sofre reflexões em todas as direções, e nos casos onde o ângulo incidente é maior que o ângulo limite, ocorre a reflexão interna total da luz. Verificou-se ainda que, as porcentagens de reflexão e de transmissão variam de acordo com o ângulo de incidência θ_1 .

Existe uma relação qualitativa entre o índice de refração e concentração do açúcar, quanto maior for o número de partículas, ou seja, moléculas na região em que o feixe de luz está passando, maior será o valor do índice de refração n .

Este procedimento experimental se apresenta com um grande potencial por explorar diversas propriedades ópticas em apenas uma atividade, além disso, deixamos aqui a proposta

para futuros trabalhos de utilizarem outras substâncias líquidas e observarem a variação dos índices de refração e como a densidade destes interferem nas medições. É também uma proposta de ensino com materiais de baixo custo para ser aplicada na educação básica, por poder ser reproduzida com facilidade e trabalhar de forma simplificada e significativa os conceitos físicos relativos a natureza da luz.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Teresinha Aparecida Soares. **Dualidade onda partícula da luz**. 201?

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física básica**/H. Moyses Nussenzveig-.1a edição -- São Paulo: Editora Blucher, 1998.

HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. Fundamentos de Física, volume 4: **óptica e física moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PAIVA, R. de. **Leis da refração da luz**. Revista de Ciência Elementar, Casa das Ciências, v. 2, n. 3, 2014.

PAIVA, R. de. **Refração da luz**. Revista de Ciência Elementar. Casa das Ciências, v. 2, n. 1, 2014.

XAVIER, Anita da Conceição Duarte. **Introdução a Óptica: uso da tecnologia contribuindo para o ensino de Física**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

YOUNG, Hugh D., Roger A. FREEDMAN, and A. Lewis FORD. "Sears e Zemansky, Física II." **Óptica e Física Moderna** (2009).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, que foi minha fonte de força, fé e determinação para concretização desse sonho.

Ao meu orientador, Dr. Mário César Soares Xavier, pelas orientações e pela oportunidade de participar do grupo Fotônica, que motivou a realização desse trabalho.

À professora e amiga, Dra. Alessandra Gomes Brandão, pelas orientações e oportunidades de participar de grandes projetos de iniciação científica e de extensão.

À minha família, pela compressão, apoio e suporte prestado durante todo o período de graduação, em especial a meu esposo, Maciel Costa, por sempre acreditar em mim.

À minha amiga e companheira de curso, Mônica Paulino, por todo apoio, incentivo e momentos de descontração durante todo esse percurso.

À meus colegas do grupo Fotônica por todos os momentos compartilhados, em especial ao meu amigo, Acson Clementino, por todo suporte na realização deste e de outros trabalhos.