



ENSINO DE ÓPTICA ONDULATÓRIA COM EXPERIMENTOS DE AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS VIA MICROCONTROLADOR ARDUINO COM PYTHON

MARCELO DOS SANTOS RÔXO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadores:

Dr. Luís Antônio Cabral

Dr. Nilo Maurício Sotomayor Choque (coorientador)

Araguaína, TO
Abril de 2019

MARCELO DOS SANTOS RÔXO

ENSINO DE ÓPTICA ONDULATÓRIA COM EXPERIMENTOS DE
AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS VIA MICROCONTROLADOR
ARDUINO COM PYTHON

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF) foi avaliada para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Data de Aprovação 26 / 04 / 19

Banca examinadora:



Prof. Dr. Luís Antônio Cabral
Orientador, UFT



Profa. Dra. Regina Lelis de Sousa,
Examinadora, UFT



Profa. Dra. Glaucia Carøena Azevedo de
Oliveira, Examinadora, UNIFESSPA
Participação por videoconferência

Rôxo, Marcelo dos Santos

Ensino de Óptica ondulatória com experimentos de aquisição automática de dados via microcontrolador Arduino com Python/ Marcelo dos Santos Rôxo– Araguaína: UFT, 2019.

viii, 158 f. ; il. 30 cm.

Orientador: Luís Antônio Cabral

Coorientador: Nilo Maurício Sotomayor Choque

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal do Tocantins, Araguaína, 2019.

1. Ensino de Física. 2. Difração. 3. Interferência. I. Cabral, Luís Antônio. II. Choque, Nilo Maurício Sotomayor. III. Universidade Federal do Tocantins. IV. Araguaína. V. Ensino de Óptica ondulatória com experimentos de aquisição automática de dados via microcontrolador Arduino com Python.

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial aos meus pais Raimundo C. Rôxo e Zildete R. S. Rôxo. À minha esposa Vanessa B. S. Rôxo, à minha querida filha Lara Sophia S. Rôxo, e aos meus irmãos Marcos S. Rôxo e Márcia S. Rôxo

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela dádiva da vida, pela saúde e condição para concluir mais esta importante etapa.

À minha esposa Vanessa Rôxo pela compreensão; nas muitas vezes que passei dia e noite ausente, nas várias noites mal dormidas, nos fins de semana que passou sozinha, por cuidar e dar atenção à nossa filha quando não pude, principalmente na fase final deste trabalho.

À minha querida filha Lara Sophia Rôxo, que nasceu durante toda essa "confusão" e correria, e passou a ser a alegria de nossa casa, fazendo meus dias mais felizes e nos dando mais um propósito e motivação para viver.

Aos meus pais Raimundo Rôxo e Zildete Rôxo, pela educação e formação que me proporcionaram, e mesmo estando longe, as muitas ligações com palavras de motivação e esperança fizeram sempre toda diferença neste e em todos os desafios que a vida nos impõe.

Ao professor Luís Antônio Cabral, orientador e grande mestre, a quem admiramos deste de 2010, quando ainda calouro na graduação no interior do Maranhão, tivemos a oportunidade de assistir a uma palestra sua, à qual muito nos motivou a seguir naquele curso, e agora tivemos a gratificação de trabalhar juntos neste projeto. Pelos valiosos conselhos, direcionamentos, explicações, instigações e incentivo.

À todos os professores do Colegiado de Física da Universidade Federal do Tocantins - Campus Araguaína, pelos ensinamentos, dedicação e disposição que imprimem neste curso. Em especial ao professor Nilo Maurício Sotomayor Choque, nosso coorientador, pelas valiosas ideias e dicas que contribuí para o aperfeiçoamento do trabalho.

À direção e coordenação do Colégio Adventista de Araguaína, por serem amigos, por nos darem a oportunidade de trabalhar naquela instituição, à qual muito nos orgulhamos, e nos permitiu aplicar o produto desenvolvido neste trabalho.

À todos os colegas de nossa sala, os quais descrevemos para lembrar: Marina, Thiago, Lenilson, Matheus, Renato, Humberto, Laércio, Eduardo, Joel e Cláudio. Pelo companheirismo, pelos momentos de dificuldades que nos ajudamos e momentos de descontração que tivemos.

Aos colegas do LabMade, em especial, a Welliton Leite da Silva, pelas valiosas discussões e contribuições durante o estágio inicial deste trabalho.

À estrutura do MNPEF-SBF que nos permitiu ter esta oportunidade.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“Ninguém comete erro maior do que não
fazer nada porque só pode fazer um pouco.”*
Edmund Burke

Resumo

ENSINO DE ÓPTICA ONDULATÓRIA COM EXPERIMENTOS DE AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS VIA MICROCONTROLADOR ARDUINO COM PYTHON

Marcelo dos Santos Rôxo

Orientadores:

Dr. Luís Antônio Cabral

Dr. Nilo Maurício Sotomayor Choque

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de experimentos de aquisição de dados de baixo custo, para o estudo dos fenômenos de difração e interferência, com utilização de um microcontrolador Arduino, fuso trapezoidal, motor de passos e um sensor LDR (Light Dependent Resistor ou Resistor Dependente de luz). O aparato permite a varredura das intensidades de luz de padrões de difração/interferência obtidos pela passagem de um feixe luminoso através de uma, duas ou mais fendas, podendo também serem utilizados pequenos obstáculos. A leitura é realizada através do sensor de luminosidade LDR, e o movimento do sensor é controlado pelo motor de passos, que faz o conjunto se mover através do fuso, permitindo ao usuário obter um conjunto de pontos com a localização e a respectiva luminosidade para cada um deles. Por meio de uma rotina em linguagem Python, os dados de intensidade luminosa e posição são salvos em um arquivo multiplataforma e são gerados gráficos da intensidade em função da posição, o que permite a análise dos padrões de

difração/interferência obtidos. O experimento foi aplicado no 2º ano do Ensino Médio, como parte de uma sequência didática com o objetivo da melhor inserção de conteúdos de óptica ondulatória e da discussão sobre a natureza da luz sob uma perspectiva histórica e filosófica, tendo em vista a grande importância deste conteúdo, que é pouco abordado neste nível de ensino, mesmo sendo um dos pilares onde se fundou toda a Física Moderna e Contemporânea. A construção da sequência didática foi feita em várias etapas e com a utilização de variadas metodologias, tendo como principal fundamentação teórica a Teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, e como um dos principais objetivos a inserção de tecnologias modernas no ensino de Física.

Palavras-chave: Arduino; Aquisição de dados; Python; Difração; Interferência.

Abstract

TEACHING OF WAVE OPTICS WITH AUTOMATIC DATA ACQUISITION EXPERIMENTS USING ARDUINO MICROCONTROLLER WITH PYTHON

Marcelo dos Santos Rôxo

Supervisors:

Dr. Luís Antônio Cabral

Dr. Nilo Maurício Sotomayor Choque

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

This work presents the development of low cost data acquisition experiments for the study of diffraction and interference phenomena using an Arduino microcontroller, trapezoidal spindle, stepper motor and LDR sensor (Light Dependent Resistor). The apparatus allows scanning of the light intensities of diffraction / interference patterns obtained by the passage of a light beam through one, two or more slits, and small obstacles may also be used. The reading is performed through the LDR light sensor, and the movement of the sensor is controlled by the stepper motor, which causes the assembly to move through the spindle, allowing the user to obtain a set of points with the location and the respective brightness for each one of them. By means of a Python language routine, the luminous intensity and position data are saved in a multiplatform file and the graphs are plotted of the intensity dependent to the position, which allows the analysis of the obtained diffraction / interference patterns. The experiment was applied in the 2nd year of High School, as part of a didactic sequence with the objective of better insertion of wave optics contents and the discussion about the nature of light from a historical and philosophical

perspective, considering the great importance of this content, which is little addressed at this level of education, even being one of the pillars on which all modern and contemporary physics was founded. The construction of the didactic sequence was done in several stages and with the use of various tools, having as main theoretical foundation the Theory of Meaningful Learning of Ausubel, and as one of the main objectives the insertion of modern technologies in the teaching of Physics.

Keywords: Arduino; Data acquisition; Python; Diffraction; Interference.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Experimento de Young	36
Figura 2 – Princípio de Huygens-Fresnel aplicado a uma fenda simples	41
Figura 3 – De (a) até (i), uma sucessão de padrões de difração por fenda única em distâncias decrescentes da fenda; Difração de Fraunhofer (campo distante) na figura (a), indo em direção à difração de Fresnel (campo próximo) nas figuras que seguem	42
Figura 4 – A luz monocromática incide em uma fenda S_0 que se comporta como fonte pontual. A luz difratada por S_0 chega às fendas S_1 e S_2 e é novamente difratada por estas. A sobreposição das ondas luminosas das duas fendas chegam à tela de observação e formam um padrão de interferência com franjas claras e escuras	43
Figura 5 – A interferência das ondas que saem das fendas S_1 e S_2 é causada pela mudança na diferença de fase devido à diferença de caminho $r_2 - r_1$	43
Figura 6 – Padrão de interferência da luz por fenda dupla	48
Figura 7 – Os raios r_1 e r_2 sofrem interferência destrutiva no ponto P_1	49
Figura 8 – A largura a da fenda é dividida em N partes, fazendo $N \rightarrow \infty$, dx passa ser a variação infinitesimal entre dois pontos consecutivos.	51
Figura 9 – Padrão de difração da luz por uma fenda simples	53
Figura 10 – Padrão de difração da luz por dupla-fenda.	54
Figura 11 – Padrão de difração da luz por 3 fendas.	55
Figura 12 – Padrão de difração da luz por 5 fendas.	55
Figura 13 – Protótipo do experimento com utilização do Arduino Uno, Sensor LDR e trilho de impressora com motor de passos.	56
Figura 14 – Aparato experimental utilizado nas medidas.	59
Figura 15 – Demonstração do laser HeNe incidindo sobre a fenda para geração do padrão de difração	60
Figura 16 – Uma parte dos dados obtidos em um dos experimentos realizados	61
Figura 17 – Gráfico de simulação do experimento com fenda simples de largura 0,1 mm.	65
Figura 18 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,1 mm.	66
Figura 19 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,1	66
Figura 20 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,2 mm.	67
Figura 21 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,2	67
Figura 22 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,3 mm.	68
Figura 23 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,3	68
Figura 24 – Gráfico de experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,2 mm entre elas	69

Figura 25 – Padrão de difração gerado em experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,2 mm entre elas	69
Figura 26 – Gráfico de experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,4 mm entre elas.	70
Figura 27 – Padrão de difração gerado em experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,4 mm entre elas	70
Figura 28 – Oficina de gráficos com Python	72
Figura 29 – Gráfico sendo construído em tempo real na execução do experimento . . .	76
Figura 30 – Esquema de ligação do Módulo sensor LDR	87
Figura 31 – Esquema de ligação do motor de passos com o Driver motor ponte H . . .	87
Figura 32 – Diagrama esquemático da difração por uma fenda simples	93

Lista de tabelas

Tabela 1 – Descrição dos materiais utilizados no experimento	59
Tabela 2 – Etapas da sequência didática aplicada	62

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
2	ARDUINO E PYTHON NO ENSINO DE FÍSICA: REVISÃO DA LITERATURA	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1	Tendências e desafios no ensino de Física no século XXI	24
3.1.1	Uso de Recursos tecnológicos e experimentação no Ensino de Física	25
3.2	Teoria da aprendizagem significativa de Ausubel	27
3.3	Breve história da evolução das ideias sobre a natureza da luz	29
3.3.1	Alguns pensadores sobre a luz na antiguidade	29
3.3.2	Século XVII ao século XIX	32
3.4	Interferência e Difração da luz	39
3.4.1	Interferência em Dupla Fenda	42
3.4.2	Difração: Fenda simples	48
3.4.3	Difração: Dupla Fenda	53
3.4.4	Difração: Fendas múltiplas	54
4	MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.1	Aparato experimental	56
4.2	Metodologia de ensino utilizadas na aplicação da sequência didática	61
5	ALGUNS RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS COM O APARATO	64
5.1	Fenda simples	64
5.2	Fenda dupla	69
6	EXPERIÊNCIA DOCENTE COM O USO DO ARDUINO E PYTHON NO ENSINO DE ÓPTICA ONDULATÓRIA	71
6.1	Oficina de gráficos com Python	71
6.2	Breve história da Óptica e Dualidade	72
6.3	Fundamentos teóricos	73
6.4	Atividades Experimentais	74
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
	REFERÊNCIAS	79

	APÊNDICES	84
	APÊNDICE A – PROGRAMAS E CIRCUITOS	85
A.1	Programa Arduino	85
A.2	Modelo de programa em python para geração de gráficos tendo salvo um arquivo txt com os pontos	86
A.3	Esquema de ligação do Módulo sensor LDR e do Motor de passos	87
	APÊNDICE B – ALGUNS SCRIPTS DE PROGRAMAS UTILIZADOS NA OFICINA DE PYTHON	88
B.1	Gráfico elementar	88
B.2	Mudança no estilo de gráfico plotado	88
B.3	Colocando nome no gráfico, nos eixos, e definindo limites	88
B.4	Plotando dois gráficos no mesmo sistema de eixos	89
B.5	Leitura de um arquivo de dados e legenda	90
B.6	Gráfico de funções	90
	APÊNDICE C – ROTEIRO UTILIZADO NA APLICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	92
C.1	Experimento 1: Medindo o comprimento de onda de um laser	92
C.2	Experimento 2: A distribuição de intensidades em padrões de difração em fendas simples e fendas duplas	93
	APÊNDICE D – PRODUTO EDUCACIONAL	96

1 Introdução

Na última metade do século XX a ciência e a tecnologia avançaram de forma ímpar, fazendo com que a atual sociedade seja marcada pelos avanços da microeletrônica, com tecnologias digitais de comunicação e informação. “Estas novas tecnologias permitem-nos acessar não apenas conhecimentos transmitidos por palavras, mas também por imagens, sons, vídeos, dentre outros” (1). No entanto, o ensino de ciências ministrado nas escolas, em sua maior parte, ainda não contempla de forma satisfatória essas novas tecnologias. Ainda se tem um ensino centrado no professor, na aprendizagem mecânica, onde os alunos são treinados para dar respostas certas e substituir dados em equações que muitas vezes não sabem de fato do que se trata. É evidente que as escolas e os professores precisam apropriar-se de novas tecnologias para uma prática condizente com o modelo de sociedade que se evidencia. “Torna-se importante que a escola reveja suas práticas pedagógicas para que o aluno sinta vontade de querer pertencer ao ambiente escolar, (...) aplique e aperfeiçoe seu conhecimento tecnológico em prol da sua construção pessoal”(2).

Além da inserção de tecnologias, uma histórica demanda no ensino de Física, é a inserção de experimentos como prática pedagógica, visto que a Física é essencialmente uma ciência teórica-experimental. Pode-se afirmar que a experimentação é um dos métodos mais fundamentais da Física, pois possibilita a análise do fenômeno real, permite a repetição e mudança das condições do experimento. No entanto, a maioria das escolas não possuem laboratórios. Todavia,

A procura por soluções de baixo custo é uma exigência quando se fala em aquisição de equipamentos e software para as empresas e instituições de ensino, especialmente o ensino público. Essa procura torna-se ainda mais importante quando as soluções disponíveis no mercado são caras e não atendem por completo as necessidades das instituições. (3).

Desta forma, uma área de pesquisa relevante dentro da Física, é a construção de experimentos para aquisição de dados, pois permitem a rápida e simultânea visualização de dados obtidos em experimentos reais, além de gráficos e outros elementos que permitem sua análise. Podendo ser produzido com baixo custo em relação aos equipamentos comerciais, torna-se mais acessível a sua utilização e aplicação. Uma outra vantagem desses experimentos é que se pode observar a influência de outros agentes e fatores geralmente desprezados nos tratamentos teóricos mais básicos e na maioria das simulações computacionais, o que pode levar a um entendimento mais global dos fenômenos e das dificuldades experimentais apresentadas.

Nesses experimentos, os dados podem ser obtidos por sistemas com execução manual ou automatizados, que geralmente utilizam programas específicos para o experimento executado,

aliados a um sistema eletrônico de controle. Neste último caso, enquadra-se a proposta deste trabalho.

No experimento realizado, optou-se pela utilização do microcontrolador Arduino pela sua grande versatilidade e baixo custo. O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar. Placas Arduino são capazes de ler variáveis de entradas - luz em um sensor, o apertar de um botão ou uma mensagem no Twitter - e transformá-la em uma saída - ativando um motor, ligando um LED, publicando algo online. Você pode dizer à sua placa o que fazer enviando um conjunto de instruções para o microcontrolador na placa (4). Assim, “a possibilidade de escrever e ler em portas digitais do Arduino abre uma infinidade de aplicações para a experimentação em física” (5).

“A maior vantagem do Arduino sobre outras plataformas [...] é a facilidade de sua utilização; pessoas que não são da área técnica podem, rapidamente, aprender o básico e criar seus próprios projetos em um intervalo de tempo relativamente curto” (6).

No aparato construído, o programa principal foi desenvolvido no ambiente de desenvolvimento do Arduino, onde são definidas configurações com base nos equipamentos utilizados, faz-se a entrada das variáveis iniciais, o carregamento do programa para a placa Arduino e dá-se o comando para início do experimento. A partir de um programa complementar feito em Python, algumas tarefas complementares são executadas rapidamente. Entre as tarefas executadas, estão a gravação dos dados experimentais em um arquivo multiplataforma e a construção de gráficos da intensidade luminosa em função do deslocamento. Neste caso é permitido observar as intensidades correspondentes aos pontos de franjas claras e franjas escuras, associadas às figuras com padrões de difração (7).

O uso do Arduino e de uma linguagem de alto nível como o Python, garantem a confiabilidade e a qualidade dos resultados obtidos nos experimentos, e proporcionam um padrão de qualidade análogo ou superior aos equipamentos produzidos comercialmente para o mesmo fim. Além disso, os equipamentos de aquisição de dados disponíveis no mercado, são excessivamente caros, inacessíveis à maioria das escolas e até mesmo a algumas universidades. Possuem softwares fechados que não permitem quaisquer mudanças e aperfeiçoamentos, o professor não tem acesso ao código fonte, o que impossibilita alterações para atender outras necessidades mais específicas que possam surgir.

O aparato experimental apresentado neste trabalho, consiste: nos circuitos montados para interligação dos componentes; no programa em Arduino, que contém as configurações e parâmetros experimentais, estabelecendo todos os comandos a serem executados pela placa; Placa Arduino, que faz o controle eletrônico, transformando em dados digitais as medições das variáveis físicas captadas pelos sensores (que as transformam em pulsos elétricos) e fazendo o envio desses dados digitais para o computador; o programa em Python para gravação dos dados e produção de elementos para análise dos mesmos; o motor de passos acoplado a um fuso trapezoidal, muito utilizados em CNC's (Computer Numeric Control ou Controle Numérico

Computadorizado), que permite o movimento do conjunto com o controle do deslocamento provocado; e o sensor LDR (Light Dependent Resistor ou Resistor Dependente de luz), que retorna os dados de intensidade luminosa obtidos.

Com a melhor inserção dos conteúdos de óptica ondulatória no Ensino Médio, tem-se o objetivo de também levar a discussão da natureza dual da luz a esse nível de ensino, de forma a ser uma preparação para tópicos da Física Moderna. Portanto, a ação didática para esse fim deve ir além dos experimentos, sendo mais abrangente e diversificada.

Nesta perspectiva, a sequência didática aplicada foi construída com base na Teoria da Aprendizagem significativa de Ausubel, e buscou atender duas condições estabelecidas para que, segundo Ausubel, haja aprendizagem significativa: a motivação dos alunos para aprender, e a utilização de material potencialmente significativo. Tendo em vista a complexidade dos assuntos abordados, foi planejado uma sequência didática visando o aprendizado de forma progressiva e continuada, com a utilização de variadas ferramentas, como oficina de gráficos em Python, uso da história e filosofia da ciência, uso de vídeo, simulações computacionais e por fim, a realização de experimentos.

No Capítulo 2 é feita uma pequena revisão da literatura sobre a utilização do Arduino e do Python no ensino de Física, visando apresentar alguns trabalhos e o estado que se encontra as pesquisas nesta área, bem como a utilização destas ferramentas no ensino.

No Capítulo 3 são apresentados os principais fundamentos teóricos que norteiam essa pesquisa e a importância da mesma. É feita uma breve discussão sobre os atuais desafios do ensino de Física e o papel da utilização da tecnologia e da experimentação nesse processo. São também realizados uma breve explanação sobre os principais pressupostos da Teoria de aprendizagem significativa de Ausubel, uma breve discussão histórica e filosófica sobre a evolução das ideias sobre a natureza da luz e como isso culmina na ideia de dualidade onda-partícula. Apresentamos também os principais fundamentos teóricos sobre os fenômenos de interferência e difração da luz, mostrando os conceitos e equações para compreensão e aplicação desse conteúdo no Ensino Médio ou mesmo no Ensino Superior.

No Capítulo 4 discute-se os materiais e métodos utilizados neste trabalho. É feita uma descrição de cada equipamento que compõe o experimento, o processo de montagem e funcionamento do mesmo. relata-se também o processo de construção da sequência didática, as etapas aplicadas, bem como os objetivos de cada uma delas.

No Capítulo 5 são mostrados alguns dos resultados obtidos com o experimento, e são discutidos esses resultados à luz dos modelos teóricos apresentados no capítulo 3. São feitas algumas demonstrações de conceitos teóricos discutidos através da comparação de figuras de difração/interferência com a variação de parâmetros como a largura de uma fenda e a distância entre as fendas (no caso de ter mais de uma).

No Capítulo 6 é descrito cada etapa da experiência docente com a aplicação da sequência

didática proposta. São feitas algumas considerações sobre o processo, os desafios e dificuldades encontradas no mesmo, assim como a percepção do professor quanto à satisfação dos alunos sobre os métodos aplicados.

No capítulo 7 são feitas as considerações finais, em que apresentamos as impressões gerais sobre o trabalho desenvolvido, algumas considerações sobre a construção do aparato experimental, os resultados obtidos com o mesmo e as perspectivas que vislumbram-se nesta área. Apresentamos também as impressões que tivemos sobre as metodologias didáticas utilizadas, que devem ser observadas pelos professores que desejarem aplicar este produto ou outros semelhantes.

2 Arduino e Python no ensino de física: Revisão da literatura

Uma área crescente de produtos tecnológicos para o ensino, são os experimentos reais automatizados, com aquisição e análise de dados via software. Eles estão entre os recursos mais avançados para demonstração e estudo de fenômenos físicos, e estão sendo amplamente apontados como opção didática para o ensino, em que, devido ao alto custo dos produtos comerciais, pesquisadores se empenham no desenvolvimento de alternativas de baixo custo. Como afirmam (5), “ao analisar as últimas publicações em revistas de ensino de física nacionais, relacionadas à aquisição de dados via computador, notamos algumas tendências, todas elas buscando desenvolver sistemas de aquisição de dados de baixo custo e totalmente livres”.

Dentre os dispositivos mais utilizados para esse fim está o Arduino, por apresentar-se relativamente fácil de ser adquirido e utilizado, possuir hardware e software livres, e muitas redes de compartilhamento de informações, o que reduz consideravelmente o tempo para execução dos projetos. Desta forma, muitos trabalhos tem sido desenvolvidos para o ensino de Física com a utilização desta ferramenta.

Apresentamos neste capítulo alguns destes trabalhos em que foi utilizada aquisição de dados com o Arduino. As análises dos dados nos trabalhos consultados são realizadas de diversas formas, mas uma característica em comum, é que a maioria dos autores buscam utilizar softwares gratuitos, acessíveis à maioria dos professores da Educação Básica, e ao aplicarem seus produtos no ensino de Física neste nível de ensino, relatam um maior interesse dos estudantes, o que os levam a bons resultados no que se refere ao aprendizado dos mesmos.

Fetzner (8), na dissertação intitulada *Experimentos de baixo custo para o ensino de Física em Nível Médio utilizando a placa Arduino-Uno*, utilizou uma placa Arduino como interface para realização de experimentos de aquisição de dados de baixo custo em cinemática e Dinâmica, onde softwares desenvolvidos em Python foram utilizados para visualização em tempo real de gráficos de posição, velocidade e aceleração em função do tempo; e ao aplicar o produto no ensino de Física na educação básica, observou um maior interesse dos estudantes, e bons resultados no que se refere ao aprendizado dos mesmos.

Dröse Neto (9), na dissertação intitulada *Aprendizagem de conceitos físicos relacionados com circuitos elétricos em regime de corrente alternada com uso da placa Arduino*, desenvolveu quatro módulos didáticos com aquisição automática de dados através do Arduino, para o estudo de circuitos elétricos de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), utilizando resistores, capacitores e indutores. Neste trabalho os dados foram analisados com gráficos produzidos através de software escrito em Python.

Cardoso e outros (10), no artigo *Novas tecnologias no ensino de Física: a construção de um termômetro utilizando microcontroladores*, utilizaram o Arduino para construir um termômetro eletrônico com aquisição automática de dados para fins didáticos, fazendo a integração deste com um software desenvolvido na linguagem Python, pelo qual eram mostradas ao usuário a temperatura marcada e outras informações. Os autores da referência (3) também construíram um termômetro com Arduino, porém utilizaram a própria IDE do Arduino para apresentação dos dados de temperatura.

Silveira e Girardi (11), no artigo *Desenvolvimento de um kit experimental com Arduino para o ensino de Física Moderna no Ensino Médio*, mostram a construção de um aparato experimental de baixo custo para estudo do efeito fotoelétrico. Para isso, utilizamos a plataforma Arduino para o controle e interfaceamento com o computador, e para interface gráfica para computadores e dispositivos móveis foi desenvolvido um aplicativo escrito na linguagem Processing, podendo exibir assim os dados obtidos em tempo real. Mostraram também aplicações do kit no estudo do efeito termiônico e da condutividade elétrica do plasma.

Cavalcante, Tavolaro e Molisani (5), no artigo *Física com Arduino para iniciantes*, mostram diferentes modos de operar com o Arduino para funcionar como uma interface alternativa na aquisição e automação de dados em atividades experimentais de Física, aplicando o mesmo ao estudo da carga e descarga de capacitores. Neste trabalho, através de um programa escrito em Processing, eles mostram como pode ser feita a análise de dados do Arduino e visualização dos gráficos em tempo real utilizando esta linguagem.

Santos (12), na dissertação intitulada *Arduino: Uma ferramenta para aquisição de dados, controle e automação de experimentos de Óptica em laboratório didático de Física no Ensino Médio*, utilizou o Arduino e software escrito em Processing em diversos experimentos de Óptica que trabalharam os conteúdos relacionados à reflexão, refração, absorção da luz e mistura de cores.

Castro (13), na dissertação intitulada *O uso do arduino e do processing no ensino de física*, utilizou o Arduino e programação em Processing nos experimentos de aquisição de dados: Oscilador harmônico amortecido, Estação meteorológica, analogia funcional de um acelerador de partículas.

Rodrigues (14), na dissertação *Arduino como ferramenta mediadora no ensino de Física*, construiu uma estação meteorológica microcontrolada com utilização do Arduino, com aquisição de dados de sensores de temperatura, pressão, umidade, velocidade do ar etc, captavam os dados e com a utilização da própria IDE do Arduino ou com interface com outros softwares, retornavam os dados para os usuários.

Durante a revisão da literatura foram consultados muitos outros trabalhos além dos já citados, dentre eles, (15), (16), (17), (18), os quais apresentam produtos educacionais diversos, tendo em comum a inserção do microcontrolador Arduino como interface para aquisição de

dados aplicados ao Ensino de Física. As publicações mostram a crescente popularização do uso desta ferramenta, e que poderá protagonizar uma nova era no Ensino de ciências.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Tendências e desafios no ensino de Física no século XXI

O ensino da Física foi impulsionado com maior veemência a partir da década de 1960, resultante da influência gerada pela “corrida espacial” no desenvolvimento científico e tecnológico. Tal desenvolvimento desencadeou a geração de novas carreiras técnicas e produziu a necessidade pela busca de conhecimento das ciências físicas que pudesse auxiliar na compreensão da vida e do espaço atual em que vivemos (19).

Ainda de acordo com o autor supracitado, é possível avaliar o desenvolvimento das condições, das práticas e das necessidades do ensino de Física no país através do acúmulo de dados das pesquisas educacionais realizadas nos últimos 40 anos.

Destaca-se nesta avaliação 9 (nove) vertentes, sendo elas:

1. Falta de preparo por parte dos docentes de física, como falhas na exposição dos conceitos, deficiência de conteúdo, ausência de habilidade para o ensino laboratorial.
2. Diminuição no número de bacharéis e licenciados em física, em decorrência do não preenchimento de vagas e a evasão.
3. Ausência de ensino prático na disciplina, disciplinas científicas com pequena carga horária, classes com superlotação, quando presentes os laboratórios se encontram defasados, bibliotecas com pouco acervos científicos, entre outros.
4. Incompatibilidade dos livros de ciências e kits experimentais importados à realidade do ensino nacional. Fato que estimulou a produção nacional de ferramentas educacionais.
5. A ausência de interação entre os profissionais da Física, e seus objetos de estudo comprometem as trocas de experiências didáticas.
6. As universidades falham em não fornecer apoio didático para os professores do Ensino Médio, não havendo assim a extensão do campo científico comum na universidade para as escolas.
7. Não há objetividade nas definições do conteúdo curricular do ensino de Física, prejudicando assim a qualidade da prática de ensino. Isso inclui a metodologia adotada, recursos didáticos e os meios avaliativos.
8. Observa-se que há deficiência no que tange aos conhecimentos do ensino de Física desde o Ensino Médio se estendendo até mesmo ao Ensino Superior, fato que ocorre no treinamento direcionado ao vestibular.
9. As péssimas condições de trabalho do docente também refletem nas dificuldades enfrentadas no ensino de Física. O baixo nível da remuneração, excesso de trabalho e de atribuições, insuficiência de instalações adequadas, e desprestígio político-institucional desestimula os jovens em optarem profissionalmente pelo magistério.

Moreira (20) corrobora com as ideias expostas acima, ao afirmar que além dos problemas referentes à formação dos docentes, condições e carga horária ineficiente, o ensino da Física tem estimulado a aprendizagem de conteúdos desatualizados, pois no ensino básico ainda permeamos pela Física do século XIX. Visto que, o ensino dessa disciplina tem se limitado a centralizar-se no docente, em questões comportamentais, focando apenas no treinamento dos discentes para realização de avaliações, como se o ensino de Física fosse estritamente uma fonte esgotável.

No texto documental referente às Ciências Naturais e suas Tecnologias, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's), abordam a necessidade de haver a rediscussão de como ensinar a Física, possibilitando uma melhor compreensão do mundo e uma formação cidadã mais adequada (21).

Rodrigues e Sobrinho (22) comentam que para que isto ocorra, os PCNs sinalizam os aspectos que podem favorecer o redirecionamento do ensino da Física, enfatizando temas com maior significado para os discentes, que incluem a desenvoltura das competências e habilidades inerentes a representação, comunicação, investigação, compreensão e contextualização socio-cultural. O que sugere que o aluno precisa visualizar a Física como a ciência que proporciona a evolução humana e histórica, influenciando o contexto cultural, social e econômico.

Assim, é preciso uma mudança do currículo da Física na educação básica, de forma a contemplar tópicos da Física Moderna e Contemporânea, juntamente com a inserção de metodologias que contemplem uma maior contextualização com a realidade do educando. A utilização de tecnologias modernas desempenham um papel cada vez maior neste processo de mudança para uma nova escola, e no caso da Física, aliá-la a experimentação é fundamental para que se tenha um melhor desempenho no processo de ensino-aprendizagem.

3.1.1 Uso de Recursos tecnológicos e experimentação no Ensino de Física

As tecnologias têm transformado, inegavelmente, todos os processos humanos. A escola; especialmente no ensino de Física, que colaborou significativamente para os avanços tecnológicos; precisa de uma maior inserção desses recursos no processo de ensino-aprendizagem, visto que a escola deve preparar os jovens para a vida em sociedade. Os parâmetros curriculares complementares (PCN+), corroboram com esta visão,

a Física deve apresentar-se, portanto, como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos (23).

Ainda em 1998, Mercado (24) já chamava atenção para a necessidade de se observar que a sociedade estava entrando em um patamar mais tecnológico e que esse por sua vez precisava

está atrelado aos currículos escolares e à capacidade de manuseá-las. Segundo o autor, não se pode desvincular a tecnologia de uma sociedade do conhecimento e que essa vertente implica na especialização dos saberes; a colaboração transdisciplinar e interdisciplinar; o fácil acesso à informação e a consideração do conhecimento como um valor precioso, de utilidade na vida econômica.

Outro questionamento amplamente apontado, é que o ensino de Física tradicionalmente se baseia em fundamentos estritamente teóricos, fato que é facilmente perceptível ao se analisar os livros didáticos corriqueiramente utilizados nesta ciência. É comum observar nestes materiais a posição unidirecional à conceitos e atividades de fixação. Outra dificuldade, é que os alunos, em sua maioria, parecem não conseguir relacionar os conceitos vistos em sala de aula com os fenômenos naturais vivenciados no seu dia-a-dia. Ou seja, estabelecer vínculo entre a teoria e a prática. Esse conflito acentua o sentimento de aversão que muitos alunos expressam ao estudar a Física. Além disso, ainda existe a dificuldade enfrentada pelos docentes em tornar a disciplina prazerosa e compatível com a realidade dos alunos (25).

Araújo e Abib (26) afirmam que a comunidade escolar considera o uso de atividades experimentais como sendo uma das estratégias mais eficientes de se mitigar as dificuldades de aprendizado e de ensinar de modo significativo e consistente.

Ainda de acordo com os mesmos autores, as atividades experimentais em sala de aula possuem o poder de,

estimular a participação ativa dos estudantes, despertando sua curiosidade e interesse, favorecendo um efetivo envolvimento com sua aprendizagem e também, propicia a construção de um ambiente motivador, agradável, estimulante e rico em situações novas e desafiadoras que, quando bem empregadas, aumentam a probabilidade de que sejam elaborados conhecimentos e sejam desenvolvidas habilidades, atitudes e competências relacionadas ao fazer e entender a Ciência (26).

O real papel do professor nesse tipo de ensino e aprendizagem é atuar como orientador, mediador e assessor das atividades experimentais que inclui: o lançamento ou a emersão do grupo em uma questão-problema; ser motivador e observador das reações dos alunos, orientando quando necessário e salientando aspectos que não tenham sido observados pelo grupo e que sejam importantes para o evolução do problema. Ser capaz de produzir juntamente com os alunos relatório oriundo das discussões em sala de aula sobre os conceitos estudados (27).

Apesar das atividades experimentais no ensino de física e de ciências em geral ser uma prática bem consolidada, e pela grande importância que representa para o processo de ensino e aprendizagem nessas áreas, ainda é possível identificar alguns problemas em sua execução, como o fato de não se conseguir mostrar na prática a relação do que foi ensinado com o cotidiano dos alunos, a inexistência de laboratórios (motivo mais frequente), corpo docente inexperiente e a falta de empenho de muitos gestores escolares na implementação de laboratórios e capacitação dos professores de Física (28), (29).

Essa dissociação entre as práticas laboratoriais e a realidade dos alunos é um problema que costuma se permear desde a educação básica até o Ensino Superior; atingindo diretamente a formação dos novos docentes de ensino de Física, o que implica diretamente na reprodução didática dos mesmos métodos e consequentemente gerando um ciclo vicioso (28).

3.2 Teoria da aprendizagem significativa de Ausubel

A teoria de aprendizagem à qual nos orientamos na construção e aplicação da sequência didática apresentada neste trabalho, foi a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) do psicólogo e médico David P. Ausubel (1918-2008), por ser uma teoria atual e abrangente. Esta teoria estabelece de maneira sistemática a explicação do processo de aprendizagem, indicando caminhos para a educação de forma geral. Ausubel, em 1973, a define em termos gerais afirmando que:

A Aprendizagem Significativa é o processo pelo qual um novo conhecimento se relaciona de maneira não arbitrária e não literal à estrutura cognitiva do estudante, de modo que o conhecimento prévio do educando interage, de forma significativa, com o novo conhecimento que lhe é apresentado, provocando mudanças em sua estrutura cognitiva. (30).

Assim, a teoria de Ausubel possui estreita relação com a psicologia cognitivista, que além do processo de compreensão, armazenamento e transformação do conhecimento, se preocupa com o uso da informação envolvida na cognição. E, além disso, ela aponta os significados pré-existentes no cognitivo dos educandos, como pontos básicos de ancoragem, servindo como ponto de partida para a construção de outros significados, que serão armazenados e organizados pela estrutura cognitiva.

“Ausubel vê o armazenamento de informações no cérebro humano como sendo altamente organizado, formando uma hierarquia conceitual na qual elementos mais específicos de conhecimento são ligados a conceitos mais gerais, mais inclusivos” (31).

A TAS explicita como a aprendizagem ocorre, e explicita quais as condições necessárias para que essa aprendizagem aconteça e seja duradoura. É uma teoria construcionista, pois considera que o conhecimento é construído, num processo de incorporação de novas informações que passam a fazer parte da estrutura mental de quem aprende, formando conhecimentos cada vez mais complexos e diversificados.

Ausubel define o conjunto organizado de informações, conceitos e ideias, presentes na mente do indivíduo, como estrutura cognitiva. Esta estrutura está então, em constante mudança, e cada vez que uma nova informação é adquirida, ela é ampliada e reconfigurada. Aprender para ausubel significa ampliação da estrutura cognitiva, e a nova informação é de alguma forma ligada a ela.

Deste modo, Ausubel define dois tipos de aprendizagem cognitiva; a aprendizagem mecânica e a aprendizagem significativa, sendo esta última, o conceito central da sua teoria. Segundo Moreira (32), a aprendizagem significativa é um processo pelo qual as novas informações aprendidas se conectam de maneira não arbitrária e substantiva a aspectos relevantes da estrutura cognitiva do aprendiz. A nova informação se relaciona, portanto, a conceitos e ideias já existentes, ampliando-as, e encontrando nestas o que Ausubel chamou de ponto de ancoragem, facilitando sua fixação, passando a ter significado na mente do aprendiz e a fazer parte da estrutura cognitiva.

A esses conceitos, ideias e proposições pré-existentes na estrutura cognitiva, em que as novas informações se ancoram, possibilitando então uma aprendizagem significativa, Ausubel chamou de subsunçores. Desta forma, o fator mais importante na aprendizagem, é aquilo que o aprendiz já traz consigo, aquilo que ele adquiriu em toda a sua vivência, os subsunçores que ele possui. Portanto, se uma nova informação não se ancora em partes específicas da estrutura cognitiva, será armazenada de forma arbitrária e literal, não interagindo com essa estrutura, e a aprendizagem será então mecânica, e poderá ser esquecida facilmente. Moreira e Masini (33) defendem ainda que, em Física, a simples memorização de fórmulas pode ser entendida como um exemplo típico de aprendizagem mecânica, como alguns alunos que afirmam ter estudado todo um conteúdo, mas na prova não conseguem resolver problemas nem transferir esse conhecimento.

Porém, Ausubel não estabelece uma relação de oposição entre a aprendizagem significativa e a aprendizagem mecânica. Ele considerava que há um contínuo entre essas duas aprendizagens, e que a aprendizagem mecânica pode ser um caminho para a aprendizagem significativa. Para Ausubel, quando um aprendiz não possui os subsunçores de determinada área, é importante que ele tenha contato com algum material introdutório, mais geral e com maior abstração, antes do material que de fato se quer que ele aprenda. A esses materiais ele denominou de organizadores prévios, e eles servirão de ponte entre o que o aprendiz sabe, e aquilo que ele deverá saber. Nesta perspectiva, a aprendizagem será inicialmente mecânica, e esta constituirá os subsunçores necessários para uma aprendizagem significativa, que deve ser o objetivo final do processo.

Portanto, para que ocorra uma aprendizagem significativa, é necessário que o conteúdo a ser aprendido esteja apresentado de forma lógica e não arbitrária, o aprendiz deve possuir os subsunçores que servirão de ancoradouro e interagirão com os novos conhecimentos, e deve ainda estar disposto a fazer essa relação entre o que já se sabe e as novas informações. O esforço e disposição do estudante para aprender, é para Ausubel, portanto, fator essencial no processo de ensino-aprendizagem, e deve ser buscado pelo professor:

O aprendizado significativo acontece quando uma informação nova é adquirida mediante um esforço deliberado por parte do aprendiz em ligar a informação nova com conceitos ou proposições relevantes preexistentes em sua estrutura cognitiva. (34).

Para fazer uma ponte entre a estrutura cognitiva do aluno com os conceitos que se deseja que ele aprenda, Ausubel defende a inserção de organizadores prévios. Para Moreira e Masini (33),

Os organizadores prévios podem se apresentar sob a forma de textos, filmes, esquemas, desenhos, fotos, perguntas, mapas conceituais, entre outros que são apresentados ao estudante, em primeiro lugar, em nível de maior abrangência permitindo a integração dos novos conceitos aprendidos, tornando mais fácil o relacionamento da nova informação com a estrutura cognitiva já existente.

Ausubel apresenta ainda vários outros conceitos e aborda algumas metodologias de ensino-aprendizagem em sua teoria, os quais foram considerados neste trabalho. Na construção da sequência didática realizada, procurou-se utilizar ferramentas diversas para apresentação do conteúdo, e através de recursos experimentais e tecnologia, demonstrar os fenômenos propostos, e conseguir, principalmente, instigar os alunos a pensarem e refletirem sobre a natureza dual da luz, sabendo sua importância para o desenvolvimento de toda a física contemporânea. Partiu-se de ideias mais gerais e inclusivas, possibilitando aos alunos relacionar conceitos-chave já estudados e progressivamente fazer associações e chegar aos conceitos mais específicos. A sequência foi construída em várias etapas, as quais serão apresentadas no Capítulo 6.

3.3 Breve história da evolução das ideias sobre a natureza da luz

3.3.1 Alguns pensadores sobre a luz na antiguidade

A luz sempre foi para o homem uma das manifestações mais atrativas e intrigantes da natureza; os corpos brilhantes no céu, o nascer e o pôr do sol, os relâmpagos, e questões sobre do que é feita a luz e o que causa a visão, a fizeram um dos objetos de maior interesse desde tempos remotos.

Textos muito antigos já falavam sobre sua natureza e criação. Em muitos destes atribui-se à luz um caráter místico, a maioria relacionado aos deuses. “Para os antigos Egípcios, a luz é Maât, filha de Rá, o Deus Sol” (35). Um dos textos mais famosos e lidos até hoje, está na Bíblia Sagrada, no livro de Gênesis, onde os Hebreus atribuem a criação da luz a Deus, e mostra a percepção da luz como elemento de separação entre o dia e a noite.

No princípio, Deus criou os céus e a terra. E a terra era sem forma e vazia; e havia trevas sobre a face do abismo; e o Espírito de Deus se movia sobre a face das águas. E disse Deus: Haja luz; e houve luz. E viu Deus que era boa a luz; e fez Deus separação entre a luz e as trevas. E Deus chamou à luz Dia; e às trevas chamou Noite. E foi a tarde e a manhã, o dia primeiro. (36)

Porém o estudo da luz de forma mais objetiva, como a maior parte do conhecimento científico ocidental, teve início com os filósofos gregos, por volta do século V a. C, em que

passaram a tentar explicar os fenômenos naturais com base na razão, se desvinculando de explicações pautadas na religião e mitologia. Suas visões eram mecanicistas, e se preocupavam principalmente com os mecanismos da visão. A partir de então, a natureza começou a ser investigada desse novo modo e surgiram as primeiras teorias para explicar os fenômenos, inclusive as teorias acerca da luz (37).

A maioria dos pensadores gregos acreditavam que a luz tinha característica corpuscular. “Demócrito (460-357 a.C.), por exemplo, baseado no seu conceito de atomicidade, acreditava que o feixe luminoso provinha dos objetos e penetrava nos olhos para formar a imagem” (38). Pitágoras de Samos (c.570 - c.495 a.C) também acreditava nessa hipótese, para ele, “são os olhos que recebem os raios luminosos emitidos por objetos luminosos, tais como: astros, chamas, pirilampos, etc., ou resvalados por objetos não-luminosos” (35), tese que também foi defendida por Epicuro de Samos (341-270 a.C). Epicuro acredita que:

Devemos também considerar que é pela entrada de algo vindo dos objetos externos que nós vemos suas formas e pensamos sobre eles. Pois, as coisas externas não poderiam imprimir sobre nós sua própria natureza de cores e formas através do meio de ar que está entre eles e nós, ou através de raios de luz, ou correntes de qualquer tipo indo de nós para eles, tão bem como pela entrada em nossos olhos ou mentes, através dos quais seus tamanhos são conhecidos, de filmes vindos das próprias coisas. (37).

Porém, para Homero, poeta grego que viveu aproximadamente no século IX ou VIII a.C, o famoso criador das obras *Ilíada* e *Odisseia*, a luz provinha dos olhos (35). Na visão de Homero, então, eram os olhos que emanavam partículas que atingiam os objetos para que estes fossem vistos. Esta hipótese, porém, encontrou resistência por ter dificuldades em explicar porque não se consegue enxergar no escuro.

Existia também uma corrente intermediária que admitia a existência de raios emanados dos olhos e raios emanados dos corpos luminosos (38). Platão (428-348 a.C.), por exemplo, acreditava que a visão era resultado de três jatos de partículas: um que partia dos olhos, um outro que provinha do objeto visto e outro que saía das fontes iluminadoras.

Ainda na antiguidade, apesar da maioria acreditar no caráter corpuscular da luz, surgiram outras hipóteses. O filósofo grego Aristóteles (384 - 322 a.C.) deu sua interpretação para a luz baseado nos seus conhecimentos sobre o som. Ele conhecia claramente que o som tinha natureza vibratória, e teorizou que da mesma forma que o som movimentava o ar e isso chegava a alguma parte do ouvido, o objeto luminoso vibrava colocando algum meio misterioso em movimento, a que ele chamou de *diáfano*, e este provocaria o movimento de “humores” que faria parte dos olhos (38). A hipótese de Aristóteles de que a luz era devido a uma ‘atividade’ em um determinado meio, pode ser considerada como a antecessora da teoria ondulatória. Ele também “parece haver sido um dos primeiros filósofos a tentar uma explicação para o arco-íris, ao afirmar que o mesmo era devido a gotículas de água contidas na atmosfera que refletiam a luz do Sol e causavam a variação das cores. Aristóteles também percebeu que a

localização do arco-íris no espaço dependia do ângulo entre a direção dos raios solares incidentes e a dos raios refletidos pelas nuvens até os olhos do observador. A idéia aristotélica sobre o arco-íris prevaleceu até a segunda metade do século XIII, quando então o físico persa Ibn Marud Al-Schirazi a complementou, afirmando que tal fenômeno era devido à dupla refração e reflexão dos raios solares nas tais gotículas de água. Porém, Aristóteles defendia que a luz tinha velocidade infinita (35).

O contrário do que defendia Aristóteles, Empédocles (490 – 430 a. C) foi um dos poucos pensadores da antiguidade a defender a finitude da velocidade da luz. Empédocles acreditava ainda que a luz tinha natureza corpuscular e que a visão era um efeito combinado desses corpúsculos que saíam do olho para o objeto e vice-versa (39). Ele defendia a ideia de “um raio visual que era emitido pelos olhos, uma espécie de fogo interno, que ‘tocava’ os objetos e, ao retornar para a pupila, trazia informações sobre o objeto observado.” (37).

Uma grande contribuição no desenvolvimento da Óptica também foi feito pelo grande matemático Euclides de Alexandria (c. 330-c. 270 a.C.). Ele foi o primeiro (pelo menos em parte) a estabelecer os fundamentos da óptica geométrica, ainda válidos até hoje (40). No tratado denominado Catóptrica, Euclides descreve o comportamento de raios luminosos refletidos por espelhos planos, côncavos e convexos (35). Euclides,

Admitindo trajetória retilínea para o raio luminoso e usando seus Elementos de Geometria, apresenta corretamente a Lei da reflexão da Luz: - O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, lei essa, válida quer para espelhos planos, quer para espelhos esféricos (35).

O fenômeno da refração foi estudado pelo astrônomo grego Cláudio Ptolomeu (85-165), onde em seu livro Ótica, foi descrito a mudança de direção da luz solar e das estrelas quando atravessam a atmosfera terrestre, além de pela primeira vez realizar estudos detalhados sobre a lei da refração, registrando em uma tabela vários dados de experimentos realizados em diferentes dióptros, como o ar-água e o ar-vidro (35).

Dentre as diversas concepções gregas para a luz, os trabalhos sobre a luz e a visão de Aristóteles, Euclides e Ptolomeu foram traduzidos para o árabe e tiveram grande importância na tradição islâmica dos estudos ópticos durante a Idade Média (37).

Assim, na Idade Média as muitas contribuições à Óptica vieram do mundo árabe. Ibn Al-Haytham (965-1040), ou Alhazen (Al-Hazen), que foi um dos maiores cientistas árabes da época, no seu livro “Tesouros da óptica”, combinou os enfoques matemático, físico e médico em uma única teoria. Ele questionou a ideia da luz como algo que saía dos olhos, argumentando que se tínhamos de fechar as pálpebras ou desviar os olhos quando olhávamos para o Sol, provavelmente seria porque algo entrava e não porque algo saía (37). Enfatizou que o raio incidente, o raio refletido e a normal estão no mesmo plano (38). Acreditava que a visão consistia na formação de uma imagem óptica no interior do olho, que funcionava como uma

câmara escura, onde os raios de luz emitidos por cada ponto do corpo atravessariam a pupila e formaria um ponto correspondente à imagem no espelho da câmara (41).

Al-Hazen construiu ainda um sistema de lentes e discutiu propriedades de espelhos esféricos e parabólicos, principalmente a determinação de seus focos, determinação essa que ficou conhecida como “o problema de Al-Hazen” (35). Os trabalhos de Al-Hazen foram traduzidos para o Latin e exerceram grande influência sobre os filósofos ocidentais na Idade Média, levando-os a realizarem experiências com espelhos e lentes. Porém, nesta época prevaleceu na Óptica a tentativa de casar o conhecimento científico com concepções teológicas.

Assim, as maiores contribuições à Óptica viriam nos séculos seguintes, onde surgiria o debate sobre a dualidade onda-partícula da luz e a produção de tecnologias, das quais muitas são utilizadas até hoje.

3.3.2 Século XVII ao século XIX

A maioria dos historiadores da ciência consideram que os debates sobre a natureza e propriedade da luz só passou ao plano científico no século XVII. Como já relatado neste trabalho, já eram bem conhecidos os fenômenos da reflexão e refração da luz nos séculos anteriores, os quais eram descritos utilizando os conceitos de raio luminoso e a concepção da luz como um feixe de partículas. Porém, surgiram novos fenômenos e trabalhos no campo da Óptica que abalariam essas concepções e ofereceria vários elementos que contribuiriam, juntamente com o desenvolvimento em paralelo de outras áreas, na culminância das mais belas e fundamentais teorias da Física: A teoria da Relatividade, e a teoria Quântica.

No século XVII importantes estudos quantitativos sobre as propriedades da luz começaram a serem realizados. Segundo Martins (42):

Galileo Galilei (1564-1642) tentou medir a velocidade da luz e não conseguiu, afirmando apenas que era excessivamente grande. Descartes, estudando eclipses da Lua, concluiu que a velocidade da luz era infinita. A partir daí, argumentou que a luz não podia ser constituída por partículas – nenhuma partícula pode ter velocidade infinita, pois isso significaria ir de um ponto a outro em um tempo nulo, ou seja, a partícula estaria em todos os lugares ao mesmo tempo. Descartes imaginou que a luz poderia ser uma pressão que se propaga do Sol até nós, atravessando a matéria invisível que (segundo ele) preenche o espaço celeste.

René Descartes (1596-1650) tentou criar uma teoria que explicasse todas as coisas do mundo natural. Apesar de considerar erroneamente a velocidade da luz infinita, Descartes deu à Óptica um novo vigor, estabeleceu um conjunto original de problemas e uma nova direção. A publicação de sua lei da refração foi o ponto de partida das investigações de Pierre Fermat (1601-1665), Hooke, Huygens e Newton (37). Para ele, a luz seria uma espécie de pressão propagando-se através do que ele chamou de plenum material. “Descartes acreditava que objetos materiais só podem interagir através do contato direto” (43).

Descartes usou uma analogia mecânica de luz, considerando a luz como corpúsculos para chegar à expressão correta da fórmula da lei da refração. No entanto, Snell tinha experimentalmente encontrado o mesmo resultado cerca de 15 anos antes, e por isso, a lei da refração ficou conhecida como Lei da refração de Snell. No que diz respeito à cor, Descartes sugeriu que poderia ser uma propriedade inerente à própria luz (39).

A lei da refração da luz recebeu ainda uma outra demonstração por intermédio de Fermat. Utilizou para isso seu princípio do tempo mínimo: “A natureza sempre escolhe os menores caminhos”, e enunciou que a luz leva sempre o menor tempo para seguir a sua trajetória. Fermat lançou a hipótese de que as “resistências” dos meios mais densos eram maiores que as dos meios menos densos, ou seja, a velocidade da luz é maior em meios menos densos, contrapondo assim o que dizia Descartes que afirmava exatamente o contrário, isto é, a velocidade da luz é maior nos meios mais densos. Fermat estava correto (35).

Em 1665 a Física começaria a sofrer uma reviravolta. Neste ano foi publicado o livro *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* do físico italiano Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), dois anos depois de sua morte. No seu livro, Grimaldi mostra que a luz sofria outro fenômeno além dos conhecidos à época, o qual o chamou de difração.

Grimaldi demonstrou que se um feixe de luz branca passar através de dois estreitos orifícios, situados um atrás do outro, e em seguida atingir um anteparo branco, haverá neste uma região iluminada além da que deveria existir se a luz se propagasse em linha reta. É como se a luz se "encurvasse" ao passar pelos orifícios, afirmou Grimaldi. Observou ainda que nas bordas dessa região iluminada havia uma ligeira coloração avermelhada e azulada. Fenômenos análogos aos descritos, o italiano também observou na iluminação de objetos opacos ou cobertos de fendas finas (44).

Também no ano de 1665, O físico inglês Robert Hooke (1635-1703) publicou o livro que chamou de *Micrographia*, onde descreveu observações ao microscópio das “cores de lâminas delgadas”, que era a produção de cores quando a luz branca atravessava uma lâmina fina, transparente e de faces paralelas. Ele também relata o aparecimento de anéis coloridos quando uma das faces da lâmina é uma superfície esférica. Sabe-se hoje que se trata do fenômeno de interferência e difração. Os fenômenos descritos por Hooke também foram observados, de forma independente, pelo físico inglês Robert Boyle (1627-1691). Hooke defendeu ainda que a luz seria constituída por pulsos de pequena amplitude, propagando-se em um meio contínuo, e possuiria apenas duas cores básicas, o vermelho e o azul. As demais cores seriam geradas a partir dessas duas durante as refrações (45), (44).

Como pode-se observar, Hooke ainda era fortemente influenciado pelo mecanicismo, e apesar de considerar a hipótese da natureza ondulatória da luz, sua visão não coaduna com a teoria ondulatória da luz como se concebe atualmente. Hooke não apresentou, em sua teoria, a luz como uma onda periódica, mas sim como pulsos que se propagam no éter. Essa mesma análise deve ser aplicada ao trabalho do principal ícone apresentado nos livros didáticos no que

diz respeito ao surgimento da teoria ondulatória da luz, o físico holandês Christiaan Huygens (1629- 1695).

No livro publicado em 1678 intitulado *Tratado sobre a luz*, Huygens reforça a hipótese ondulatória proposta por Hooke, ampliando-a. Utilizando essa hipótese, ele trouxe um novo aspecto, conseguindo explicar a reflexão e a refração da luz:

Sabemos que, por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em toda a volta do lugar onde foi produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte do ar a outra. A propagação desse movimento se faz com igual velocidade para todos os lados e devem se formar como superfícies esféricas que crescem sempre e que chegam a atingir nossas orelhas. [...] Se a luz gasta tempo para essa passagem [de um corpo luminoso até nós] [...] seguir-se-á que esse movimento impresso à matéria é sucessivo e que, consequentemente, ele se espalha, assim como o som, por ondas esféricas (46).

Assim, fazendo analogia com o som, Huygens considerou que a luz era uma onda longitudinal, porém, “Apesar da analogia, Huygens distingue também algumas diferenças entre a luz e o som, concernente aos movimentos que os produzem, à matéria na qual se propagam e à forma como se comunicam” (45).

Para chegar aos resultados conhecidos (por exemplo, as leis da reflexão e da refração), Huygens idealizou um princípio (mais tarde conhecido como princípio de Huygens), segundo o qual cada ponto da frente de onda no hipotético éter e tomado como o centro de um novo distúrbio que se propagava na forma de ondas esféricas; essas ondas secundárias combinavam-se de tal forma que seu envelope determinava a nova frente de onda em um tempo posterior. Com auxílio desse princípio, ele demonstrou as leis da reflexão e da refração da luz, assim como chegou a um resultado polêmico, qual seja, o de que a velocidade da luz na água era menor do que no ar, em contraposição à afirmação de Newton (44).

Portanto, Huygens descreveu a luz como uma perturbação mecânica que se propagava através de forças de contato entre corpúsculos. Outros filósofos naturais de sua época também defendiam a luz como um tipo de onda no éter. No entanto, seria a teoria de que a luz era formada por corpúsculos, defendida por Newton, a que seria a mais aceita e difundida ao longo de todo o século XVIII (37).

O físico e matemático inglês, Sir Isaac Newton (1642-1727), é inegavelmente um dos cientistas mais importantes e conhecidos de toda história. Ele revolucionou a Física ao estabelecer as bases da Mecânica Clássica em seus famosos livros conhecidos como *Princípios*, mas seu trabalho estende-se a vários outros ramos, inclusive a Óptica. Ele estudou os trabalhos de Hooke e Boyle em 1666, e passou a pesquisar o fenômeno das cores exibidas por películas finas, fenômeno que é até hoje conhecido como “anéis de Newton”. Em suas experiências, descobriu que a luz branca ao atravessar um prisma de vidro era dividida nas cores do arco-íris, fenômeno conhecido como dispersão da luz. Utilizando um outro prisma, invertido em relação

ao primeiro, fez também o processo inverso, fazendo com que as cores fossem novamente reunidas, formando assim a luz branca (44).

A teoria da luz de Newton, como também outros trabalhos, foi muito importante durante todo o século XVIII, seu método experimental e sua matemática eram inovadores, e se tornou um modelo a ser seguido. Em 1704, composta de 3 volumes, foi lançada sua obra *Óptics*, que

contém uma ampla discussão de tópicos da óptica, tais como associação entre cor e refrangibilidade; teoria das cores, natureza da luz, explicação para os fenômenos atualmente conhecidos como polarização, interferência e difração. Newton também discutiu questões relativas à mecânica, tais como a existência de um éter universal e ação de forças a distância (47).

Newton não admitia que a luz pudesse ser formada por pressões ou perturbações, para ele, a luz que era formada por corpúsculos, e até o fim de sua vida utilizou essa ideia para embasar suas teorias. “Assim, após a morte de Huygens e com o sucesso da mecânica de Newton, a teoria ondulatória entrou em declínio. Esse panorama, contudo, começaria a ser alterado no início do Século XIX” (45).

Nas duas primeiras décadas do século XIX estava acontecendo uma mudança nas teorias sobre a natureza da luz. Embora, até o fim do século XVIII, quase todos os físicos aceitassem a teoria corpuscular, começaram a surgir no início do século XIX importantes evidências favoráveis à hipótese ondulatória. Os principais responsáveis por essa mudança foram Thomas Young (1773-1829) e Augustin Jean Fresnel (1788-1827) (42).

O físico e médico inglês Thomas Young, realizou experimentos que são considerados um dos principais marcos na Física, pois traria claras evidências de que a luz poderia ter natureza ondulatória, hipótese que ele passou a defender. Young estudava o processo pelo qual a voz humana era emitida, e conhecia muitas propriedades do som, e assim, seus experimentos com a luz seria inspirado por uma analogia com os fenômenos sonoros (37).

Em 1801, 1802 e 1803, Young realizou palestras no Royal Institution, onde lecionou física. Ele teria descrito um aparato experimental que hoje é conhecido como “tanque de ondas”, onde mostrou o padrão de interferência das ondas de água, explicando que duas ondas que se encontravam produziam regiões de destruição dessas ondas e regiões em que eram reforçadas. Young também sabia que isso ocorria com o som (48). Desta forma, ele adicionou à teoria das ondas um novo conceito fundamental, o chamado princípio da interferência, segundo ele: “Quando duas ondas, de diferentes origens, coincidem perfeitamente ou quase, em um ponto, o efeito conjunto delas é uma combinação dos movimentos independentes de cada onda”. Young foi capaz de explicar as franjas coloridas de filmes finos e determinar comprimentos de onda de várias cores usando dados obtidos por Newton. Porém, embora Young, repetidas vezes, sustentasse que suas concepções tiveram origens na pesquisa de Newton, este foi severamente atacado (49).

Assim, Young resolveu testar se o mesmo princípio que ocorria com outras ondas sonoras e ondas na água poderia acontecer com a luz, e, para investigar sua hipótese, fez o seu famoso experimento da dupla fenda, onde mostrou a interferência de ondas luminosas. Uma configuração experimental do experimento de Young é mostrado na Fig. 1,

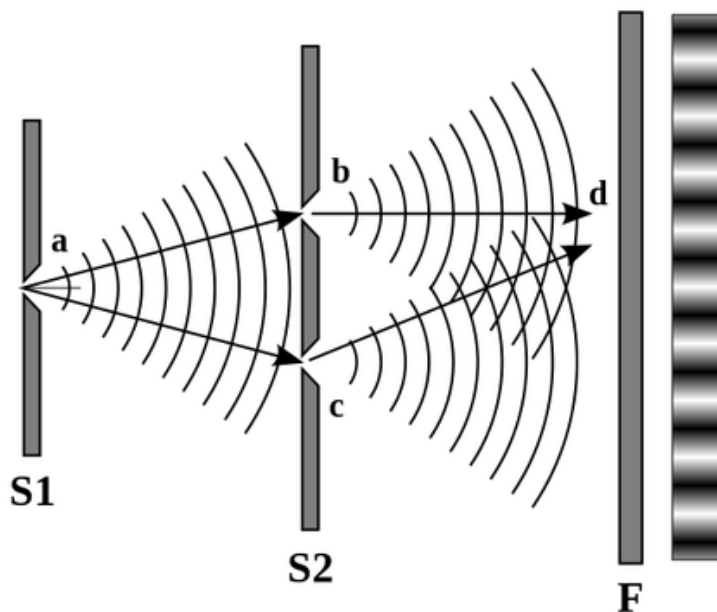


Figura 1 – Experimento de Young

Fonte: (50)

Conforme mostra a figura,

Ele fez com que a luz solar incidisse em um orifício em uma chapa opaca. A luz emergente dispersa-se por difração e incide em dois novos orifícios, ocorrendo nova difração. A superposição entre as ondas provenientes desses orifícios gera um padrão de interferência em um anteparo. A análise dos máximos e mínimos, além de estabelecer uma base material convincente para sustentar a teoria ondulatória, permitiu-lhe medir o comprimento de onda da luz solar, estimada em 570 nm (em unidades atuais), bem próximo do valor atual de 555 nm (45)

Porém, os trabalhos de Young foram inicialmente muito criticados na Inglaterra, e muitos artigos publicados no *Edinburgh Review*, provavelmente escritos por Lord Henry Brougham, que era inimigo pessoal de Young; os considerou “destituídos de qualquer mérito” (51). O trabalho de Young seria de grande importância, no entanto, para confirmação dos trabalhos que viriam posteriormente, que ratificaram e ampliaram os resultados que ele obteve em favor da teoria ondulatória da luz.

Assim, a natureza ondulatória da luz só viria a ser aceita pela maioria da comunidade científica da época com a teoria de um jovem engenheiro, Augustin-Jean Fresnel (1788-1827). Alertado sobre os trabalhos de Young por seu amigo, o físico francês Dominique-François-Jean Arago (1786-1853), em 1815, Fresnel começou uma série de experiências. Engenheiro de

formação, sem nenhuma aparelhagem especial, Fresnel improvisou dois espelhos e dois prismas, os hoje conhecidos como espelho duplo e bi-prisma de Fresnel, e com eles obteve belas figuras de interferência. Em seguida, passou a estudar o fenômeno da difração da luz descoberto por Grimaldi. Os primeiros resultados que Fresnel obteve dos seus estudos sobre a difração, foram publicados em uma revista no ano de 1816, e no mesmo ano, foi então apresentado por seu amigo François Arago à Academia Francesa de Ciências (52).

No seu trabalho, Fresnel

Retomou as concepções ondulatórias de Huygens, e usando o denominado **princípio da interferência**, calculou matematicamente as figuras de difração para os mais diversos obstáculos e aberturas, chegando a uma explicação satisfatória da propagação retilínea da luz. Ele esclareceu, por exemplo, que a difração da luz se torna cada vez menos pronunciada à medida que as dimensões da abertura (diâmetro de um orifício circular, largura de uma fenda retangular, etc.) se tornam progressivamente maiores que o seu comprimento de onda. Para aberturas suficientemente grandes, os efeitos de difração são desprezíveis. ((38), grifo nosso).

Essa combinação do princípio de Huygens com a teoria de Young sobre a interferência, desenvolvida por Fresnel, é atualmente conhecida como princípio de Huygens-Fresnel, um dos princípios mais fundamentais da Óptica Ondulatória, e será retomado na seção 3.4.

Com a retomada das discussões sobre a natureza da luz, em março de 1817, a Academia Francesa de Ciências lançou um concurso, para premiação em 1818, com o tema a difração da luz. O anúncio foi feito por um júri de grandes cientistas: Pierre Simon de Laplace (1749-1827), Jean-Baptiste Biot (1774-1862), Siméon Denis Poisson (1781-1840), Joseph L. Gay-Lussac (1778-1850), e François Arago (53). Estes cientistas esperavam na verdade que a teoria corpuscular de Newton superasse de vez a teoria ondulatória de Huygens, Fresnel era então, por suas ideias “controversas” à concepção dominante, o principal opositor teórico a participar do concurso. Assim,

Em uma das sessões da Academia em que Fresnel apresentou sua teoria, Siméon Poisson, [...], mostrou através de cálculos, que se a teoria fresneliana fosse verdadeira, deveria haver um ponto brilhante no centro da sombra projetada de um pequeno disco circular. Isso era um absurdo, concluiu Poisson. Arago, grande amigo de Fresnel e também presente à mesma, prometeu que na próxima sessão da Academia confirmaria ou não a conclusão a que chegara Poisson. Montando sem demora um dispositivo experimental, Arago conseguiu obter o “ponto brilhante” de Poisson. Aliás, esse “ponto brilhante” havia sido observado pelo astrônomo francês Joseph Nicholas Delisle (1688-1768), no começo do século XVIII, porém, ninguém o considerara. Com esse experimento, Arago rendeu-se à teoria ondulatória, mas Biot ficou com Newton e brigou com seu amigo Arago, e obviamente, Fresnel ganhou o Prêmio da Academia Francesa de Ciências de 1818 (52).

O resultado obtido experimentalmente por Arago, em confirmação à “absurda” previsão teórica de Poisson a partir da teoria apresentada por Fresnel, é também chamada de Spot

(mancha) de Poisson-Arago, e foi o evento que confirmou de vez que a luz apresentava comportamento ondulatório.

No entanto, surge uma questão: Se a luz é uma onda, então em que meio ela se propaga? Pois todas as ondas até então conhecidas se propagavam em algum meio, por exemplo, sabia-se que o som é uma onda e se propaga no ar e que as ondas na água também precisam de água para serem transportadas.

Na teoria ondulatória da luz, é natural pensarmos que a velocidade da luz não deve depender nem do movimento das estrelas nem da cor da luz (assim como a velocidade do som, no ar, não depende nem do movimento da fonte de som, nem da frequência sonora). No entanto, considerando-se a luz como um feixe de partículas [...], não era de modo nenhum evidente que a velocidade da luz não dependa nem da velocidade da fonte nem da cor (42).

Assim, Fresnel admitiu a existência de um éter em repouso que permeava todo o universo, que seria o meio onde as ondas de luz se propagariam. E muitos cientistas passaram a considerar a possibilidade de medir a velocidade da terra em relação ao éter, pois a terra se moveria através deste. Em 1851, Armand-Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) realizou um experimento que comprovou a teoria de arrastamento do éter de Fresnel, e em meados do século XIX, a ideia de que a luz era uma onda que se propagava no éter passou a ser hegemônica em toda comunidade científica.

Em paralelo a tudo isso, se desenvolvia o eletromagnetismo. Em 1865 o mundo conheceria uma teoria convincente sobre a propagação da luz. Esse feito deve-se ao físico britânico James Clerk Maxwell. Ele unificou em um conjunto de equações as teorias da eletricidade e do magnetismo. Essas equações mostravam que um campo magnético variável induz um campo elétrico também variável, e que este tornaria a induzir outro campo magnético variável, e assim sucessivamente. Deste modo, ele concluiu que esses campos se propagariam no espaço por meio de uma onda eletromagnética. Maxwell concluiu também que essas ondas se propagariam no vácuo com uma velocidade fixa, e o mais surpreendente era que ao calcular essa velocidade o resultado coincidia exatamente com a velocidade da luz.

Quando provou teoricamente que poderiam existir ondas eletromagnéticas no espaço vazio, com uma velocidade igual à velocidade da luz, concluiu que a própria luz era um fenômeno eletromagnético e que o mesmo éter que serve para transmitir forças elétricas e magnéticas é também o éter onde se propagam as ondas luminosas (42).

Os resultados obtidos por Maxwell uniu ao eletromagnetismo outro importante ramo da física: a óptica. A teoria eletromagnética seria de fundamental importância na elaboração da relatividade por Einstein, e tempos depois Einstein expressaria a apreciação que tinha pelo trabalho de Maxwell afirmando que “Maxwell deu a contribuição isolada mais importante do século XIX” (54).

Sem considerar a ideia de um éter, o físico alemão Albert Einstein (1879-1955), em 1905, em um dos seus célebres trabalhos publicados naquele ano, resolve um dos grandes problemas da Física à época, explicando o efeito fotoelétrico através da hipótese quântica da luz. Einstein considerou que a luz não é uma onda eletromagnética e sim um pacote de energia (os fótons, ou quanta de luz), dotado de características ondulatórias e corpusculares. Portanto, a partir de então, a luz passou a ser tratada por dois modelos, pois ora se comporta como onda, ora se comporta como partícula, e ficou estabelecido o que hoje se conhece como dualidade onda-partícula para luz. Porém, esse conceito foi estendido também à matéria, com a teoria de Louis de Broglie (1892-1987) e outros, que a matéria também se comporta como partícula e onda.

3.4 Interferência e Difração da luz

A interferência e a difração são fenômenos exclusivamente ondulatórios; sejam ondas sonoras, ondas eletromagnéticas ou até mesmo ondas de matéria; e como relatado na seção anterior, são esses fenômenos que denunciam a natureza ondulatória da luz. Os autores do livro (55) mostram que a interferência é responsável por incontáveis fenômenos e aplicações ópticas, como a variação de cores das asas de uma borboleta *Morpho*, que pode ser vista com vários tons de azul dependendo do ângulo de observação, e o uso de tintas com efeitos semelhantes em cédulas de alguns países para evitar falsificações.

Hecht (49), em breves palavras, define a **interferência óptica** como a interação de duas ou mais ondas luminosas produzindo uma irradiação resultante que não corresponde à soma das irradiações componentes. Desta forma, a onda resultante em um dado ponto P pode ter amplitude que varia de zero (interferência totalmente destrutiva) à soma das amplitudes de todas as ondas componentes (interferência construtiva). Se a amplitude da onda resultante for intermediária diz-se que a interferência foi parcialmente destrutiva.

A onda resultante de uma interferência depende da **diferença de fase** das ondas envolvidas. Duas ondas luminosas de mesma amplitude e mesmo comprimento de onda que se encontram em um dado ponto P, com a mesma fase, terão naquele ponto uma interferência construtiva, se porém, tiverem fases opostas, terão uma interferência totalmente destrutiva.

Na Fig. 1, onde é mostrado o experimento de Young, há a formação de um padrão com franjas claras e franjas escuras, a esse padrão chamamos de **figura de interferência** ou mesmo **figura de difração**. Para que uma figura de interferência apareça, é preciso que a diferença de fase entre as ondas que chegam a um ponto P qualquer não varie com o tempo. Isso acontece no caso do experimento de Young, pois os raios que passam pelas fendas fazem parte da mesma onda, advindas da primeira fenda. Quando a diferença de fase permanece constante em todos os pontos do espaço, dizemos que os raios que saem das duas fendas e chegam ao anteparo são totalmente **coerentes**. Se as ondas viessem, no entanto, de fontes diferentes,

como dois filamentos de lâmpadas incandescentes, mesmo que passando por um filtro para se tornarem o mais monocromática possível, elas se comportariam como fontes incoerentes, e não formariam figura de interferência. Isso acontece devido a luz de uma fonte usual ser produzida por um grande número de átomos independentes e aleatórios. Porém, os lasers são fontes de luz altamente coerentes, pois seus átomos emitem luz de forma sincronizada, são quase perfeitamente monocromáticos e são emitidos em feixes finos (55), (56).

A diferença de fase de duas ondas coerentes pode mudar por variados motivos. Uma das maneiras pelas quais isso ocorre, é quando essas ondas percorrerem caminhos ópticos diferentes, por exemplo, quando atravessam materiais com diferentes índices de refração. Essa diferença de fase também pode mudar quando uma ou ambas sofrem reflexões. E ainda, a diferença de fase pode mudar quando as ondas percorrem distâncias diferentes. Neste último caso, como se verá na seção 3.4.1, enquadra-se a formação da figura de interferência no experimento de Young, onde a localização dos pontos de máximos e mínimos, dependem da diferença de caminho percorrido por cada onda. Mas antes, é importante falar um pouco sobre a difração.

Hecht (49) descreve a difração como uma característica geral dos fenômenos ondulatórios que ocorrem sempre que uma parte da frente de onda, é de alguma maneira obstruída. As frentes de onda ao encontrar o obstáculo sofrem mudanças de amplitude ou fase, e ao se propagarem para além do obstáculo (seja ele transparente ou opaco) sofrem interferência, causando a distribuição específica de densidade de energia conhecida como padrão ou figura de difração. A difração sempre ocorre, porém, nem sempre pode ser notada. As situações em que o efeito difrativo pode ser desprezado estão no domínio do que se denomina Óptica Geométrica. Dentro desse domínio está o princípio da propagação retilínea da luz, onde há a formação de sombras dos objetos, e acontece quando o comprimento de onda da luz é muito menor que as dimensões do obstáculo.

No entanto, ainda segundo o mesmo autor, não há distinção física significativa entre interferência e difração. Tornou-se habitual falar de interferência ao considerar a superposição de apenas algumas ondas e difração ao tratar de um grande número de ondas. Mesmo assim, uma se refere à interferência de feixe múltiplo em um contexto e difração por uma rede em outra.

Convém mencionar que a difração é um fenômeno complexo, e seu tratamento completo é feito pela mais completa teoria da luz, a Eletrodinâmica Quântica. Mas, para as experiências que vamos tratar a seguir, a teoria eletromagnética clássica é mais que o suficiente, e extremamente mais simples.

Para entender como a difração ocorre, vamos recorrer ao **Princípio de Huygens-Fresnel**, que diz: Cada ponto não obstruído de uma frente de onda, em um dado instante, se comporta como uma fonte de ondas esféricas secundárias (com a mesma frequência da onda primária). A amplitude do campo óptico em qualquer ponto após passar o obstáculo, é a superposição de todas estas ondas secundárias (considerando suas amplitudes e fases relativas).

A Fig. 2 mostra um exemplo de como esse princípio é aplicado para o entendimento da figura de difração no caso da difração por uma fenda simples. Convém notar que esse princípio nos leva à conclusão de que a luz sofre difração e isso ocorre devido à interferência.

Contudo, convém aqui mencionar que, para o caso de aberturas muito menores que o comprimento de onda ou para pontos de observação próximos à abertura, os efeitos de borda se tornam importantes e o princípio de Huygens-Fresnel não se aplica.

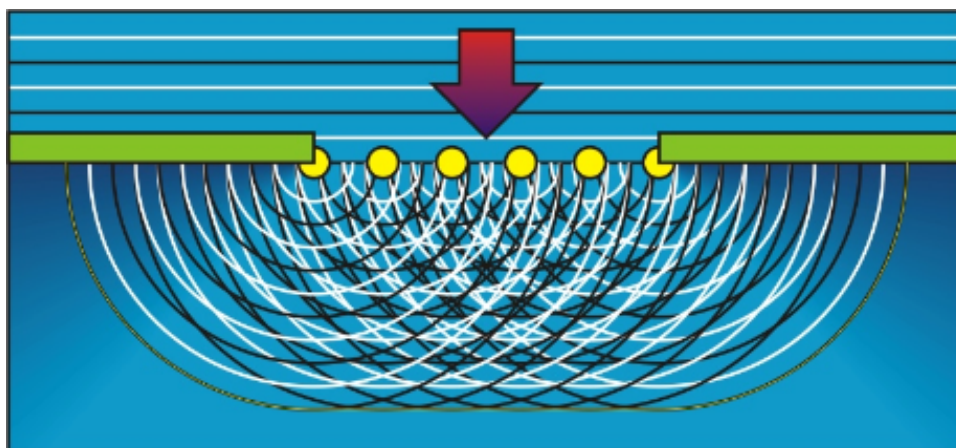


Figura 2 – Princípio de Huygens-Fresnel aplicado a uma fenda simples

Fonte: (57)

Neste trabalho será considerado apenas a **Difração de Fraunhofer** ou Difração de campo distante, que estabelece a condição de que tanto a fonte como a tela de observação estejam muito distantes da fenda (ou das fendas). Se, no entanto, a tela de observação estiver próxima à fenda, teremos a **Difração de Fresnel** ou Difração de campo próximo, e o tratamento matemático necessário será muitas vezes mais complicado. A Fig. 3 estabelece uma sucessão de imagens de difração por uma fenda simples observadas a distâncias decrescentes da fenda. Ela mostra que ao se aproximar a tela de observação da fenda, há uma deformação da figura de difração, passando do limite da difração de Fraunhofer para a difração de Fresnel. Não pretende-se aqui, no entanto, entrar nas questões mais fundamentais do por que isto ocorre.

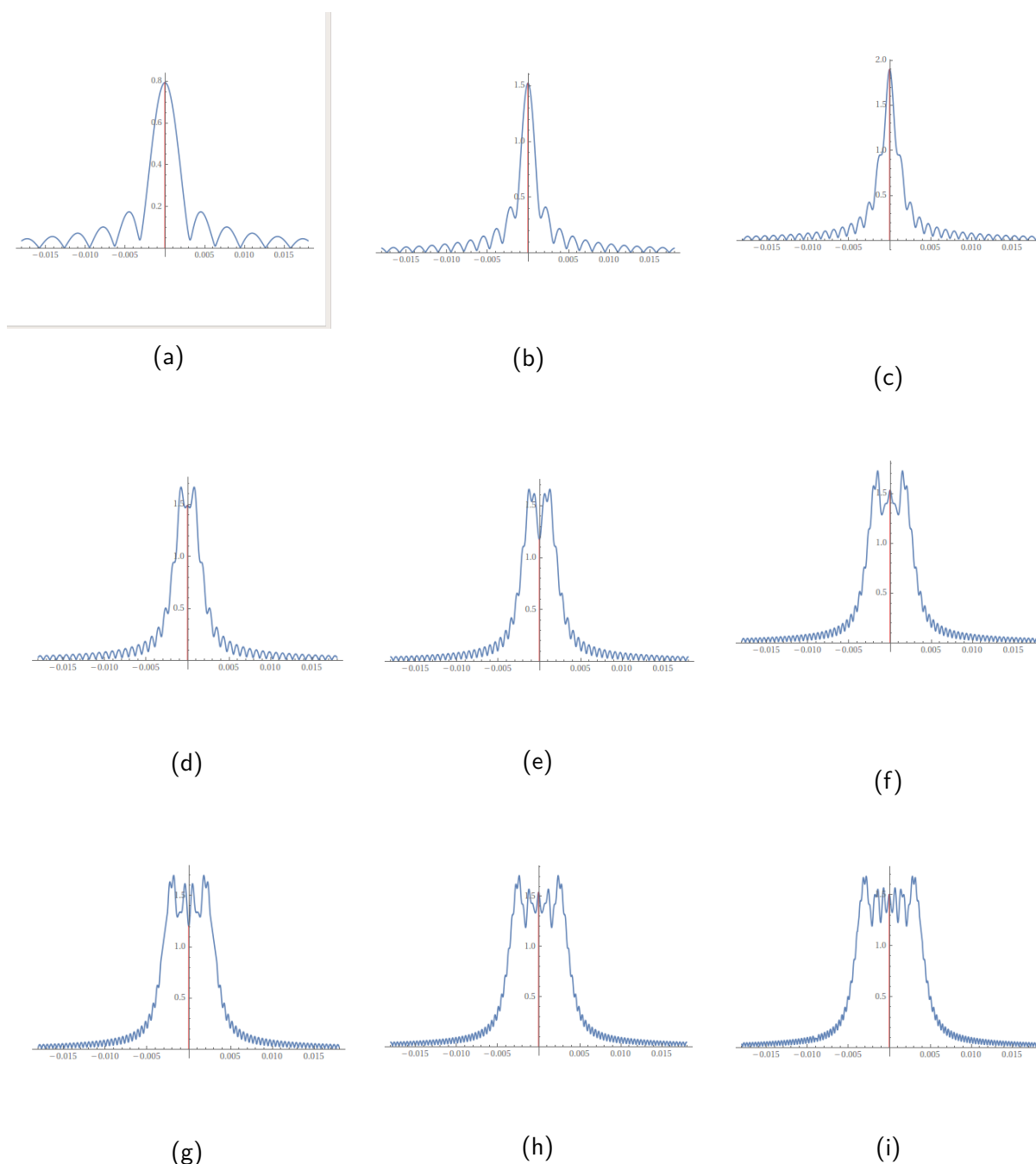


Figura 3 – De (a) até (i), uma sucessão de padrões de difração por fenda única em distâncias decrescentes da fenda; Difração de Fraunhofer (campo distante) na figura (a), indo em direção à difração de Fresnel (campo próximo) nas figuras que seguem

Fonte: Os autores

3.4.1 Interferência em Dupla Fenda

Vamos deduzir aqui as equações para determinação da posição das franjas claras e das franjas escuras no experimento da dupla fenda de Young. Vamos também deduzir a equação de distribuição de intensidades através do aparato. Trataremos da interferência luminosa, neste caso, como descrevem (55), considerando as fendas muito mais estreitas que o comprimento

de onda da luz, ou seja, fazendo a largura a das fendas ser muito menor que o comprimento de onda da luz λ ($a \ll \lambda$). Assim, as fendas S_1 e S_2 se comportam como fontes puntuais de luz, e o máximo central da figura de difração de cada fenda cobrem toda a tela de observação (Quanto mais estreita a fenda, mais largo é o máximo central), e a onda luminosa que sai de cada uma das fendas, sofre interferência uma com a outra formando um padrão com franjas claras praticamente de mesma intensidade. A Fig. 4 mostra uma representação desse experimento.

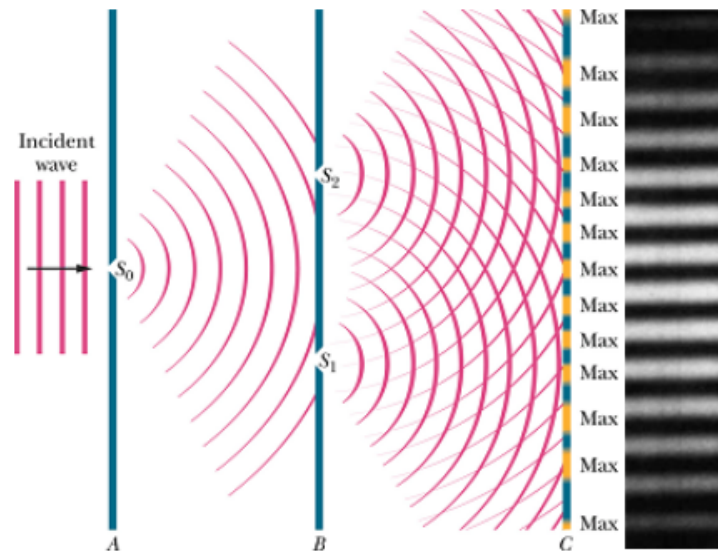


Figura 4 – A luz monocromática incide em uma fenda S_0 que se comporta como fonte puntual. A luz difratada por S_0 chega às fendas S_1 e S_2 e é novamente difratada por estas. A sobreposição das ondas luminosas das duas fendas chegam à tela de observação e formam um padrão de interferência com franjas claras e escuras

Fonte: (58)

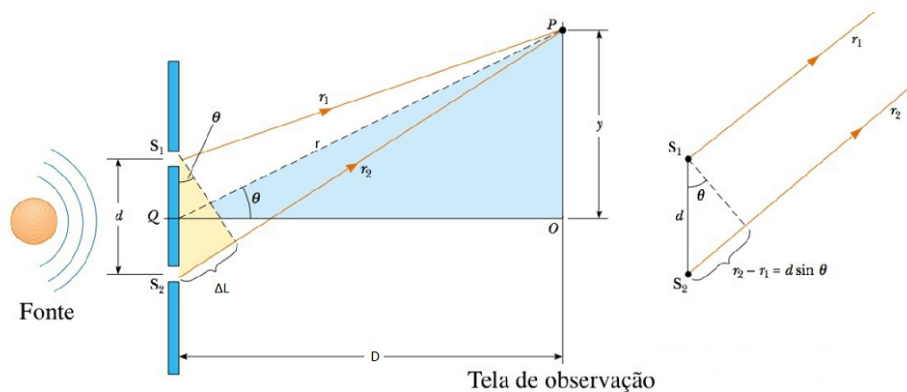


Figura 5 – A interferência das ondas que saem das fendas S_1 e S_2 é causada pela mudança na diferença de fase devido à diferença de caminho $r_2 - r_1$.

Fonte: (59)

Como mostra a Fig. 5, para determinar a localização das franjas claras e escuras, relembremos que a interferência de duas ondas coerentes depende da diferença de fase entre

elas, e que esta diferença de fase pode mudar se as ondas percorrerem distâncias diferentes. Assim, considerando um ponto P qualquer sobre a tela de observação, traçamos um raio r_1 saindo de uma das fendas e r_2 saindo da outra fenda. θ é o ângulo entre o eixo central (que liga o ponto médio das fendas à tela de observação ortogonalmente), e a linha que liga esse ponto médio até o ponto P . Como estamos utilizando a condição de Fraunhofer, a distância D entre as fendas e a tela de observação é muito maior que o comprimento de onda da luz λ e que a distância d entre as fendas, portanto, r_1 e r_2 podem ser considerados praticamente paralelos.

A diferença de caminho (neste caso, causados pela diferença nas distâncias percorridas) ΔL é dada por:

$$\Delta L = d \sin \theta \quad (3.1)$$

Para que se tenha uma franja clara, ΔL deve ser igual a 0 ou igual a um número inteiro de comprimentos de onda, que pode ser expresso como:

$$\Delta L = d \sin \theta = (\text{número inteiro})(\lambda)$$

Ou ainda,

$$\boxed{d \sin \theta = m\lambda}, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots (\text{frangas claras}) \quad (3.2)$$

Para que se tenha uma franja escura, ΔL deve ser um múltiplo ímpar da metade de um comprimento de onda, assim:

$$\Delta L = d \sin \theta = (\text{número ímpar})\left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

Portanto, pode-se dizer que ΔL deve ser um número inteiro de comprimentos de onda mais a metade de um comprimento de onda, assim

$$d \sin \theta = m\lambda + \frac{\lambda}{2}$$

Isso pode ser melhor escrito na forma:

$$\boxed{d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda}, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots (\text{mínimos}) \quad (3.3)$$

Note que para $m = 0$ na equação 3.2, teremos uma franja clara em $\theta = 0$, que é o máximo central e de maior intensidade. Fazendo $m = 1$ na mesma equação, encontra-se a localização θ da próxima franja clara, para $m = 2$ a seguinte e assim sucessivamente. Podemos

ainda encontrar a distância y acima (ou abaixo) do eixo central, de uma franja clara m qualquer. Na Fig. 5, observe que:

$$y_m = D \tan \theta \quad (3.4)$$

Como estamos considerando a tela de observação muito distante, o ângulo θ é muito pequeno, então pode-se utilizar a aproximação:

$$\tan \theta = \sin \theta \approx \theta$$

Assim, da Eq. 3.4 pode ser reescrita como:

$$y_m = D \sin \theta$$

Porém, da equação 3.2:

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d}$$

Finalmente,

$$\boxed{y_m = D \cdot \frac{m\lambda}{d}} \quad (3.5)$$

Que é a distância de qualquer uma das franjas claras ao eixo central. Note que a distância entre duas franjas claras consecutivas, pode ser dada por:

$$\Delta y = y_{m+1} - y_m \quad (3.6)$$

Vamos agora deduzir, para este caso, as equações de distribuição de intensidades luminosas ao longo da tela de observação. Para isso, recorremos à teoria eletromagnética, onde encontramos que uma onda eletromagnética plana pode ser escrita em termos de seu campo elétrico, que na forma complexa pode ser definido como:

$$E(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)} \quad (3.7)$$

$$E(x, t) = Ae^{ikx} \cdot e^{-i\omega t}$$

Fazendo

$$v(x) = Ae^{ikx}, \quad (3.8)$$

Podemos escrever o campo elétrico como:

$$E(x, t) = v(x)e^{-i\omega t} \quad (3.9)$$

Sabemos que a intensidade da onda é constante no tempo no ponto P , e é igual a $\langle E^2 \rangle$, então

$$I(x) = [v(x)]^2 = A^2 \quad (3.10)$$

O campo total E_{total} no ponto P é dado pela soma dos campos associados a cada onda:

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_1 + E_2 = Ae^{i(kr_1 - \omega t)} + Ae^{i(kr_2 - \omega t)} \\ &= Ae^{-i\omega t} (e^{ikr_1} + e^{ikr_2}) \end{aligned}$$

Considerando a equação 3.8 em duas dimensões, temos:

$$V(x) = A(e^{ikr_1} + e^{ikr_2})$$

Logo,

$$\boxed{E_t = V(x)e^{-i\omega t}} \quad (3.11)$$

Como estamos considerando $D \gg d$

$$d \sin \theta = r_1 - r_2$$

Assim, podemos fazer:

$$r_1 + \frac{d}{2} \sin \theta = r$$

E escrever r_1 e r_2 da seguinte forma:

$$\boxed{r_1 = r - \frac{d}{2} \sin \theta} \quad (3.12)$$

$$\boxed{r_2 = r + \frac{d}{2} \sin \theta} \quad (3.13)$$

Assim,

$$\begin{aligned} V(x) &= A \left[e^{ik(r - \frac{d}{2} \sin \theta)} - e^{ik(r + \frac{d}{2} \sin \theta)} \right] \\ &= Ae^{ikr} \left[e^{-\frac{i\varphi}{2}} + e^{\frac{i\varphi}{2}} \right], \end{aligned} \quad (3.14)$$

Onde

$$\varphi = kd \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta.$$

Lembrando que,

$$e^{\pm i\frac{\varphi}{2}} = \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \pm i \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right),$$

Então

$$V(x) = Ae^{ikr} \cdot 2 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

$$V(x) = 2Ae^{ikr} \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (3.15)$$

Como

$$I = [V(x)]^2 = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

Vamos chamar de I_0 a intensidade relacionada a apenas uma das fendas, assim:

$$I_0 = [v(x)]^2 = A^2 \quad (3.16)$$

Então, a intensidade no ponto P fica, finalmente:

$$\boxed{I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (\text{Interferência fenda dupla}) \quad (3.17)$$

Sendo

$$\boxed{\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta} \quad (3.18)$$

O padrão de interferência formado neste caso, está mostrado na Fig. 6

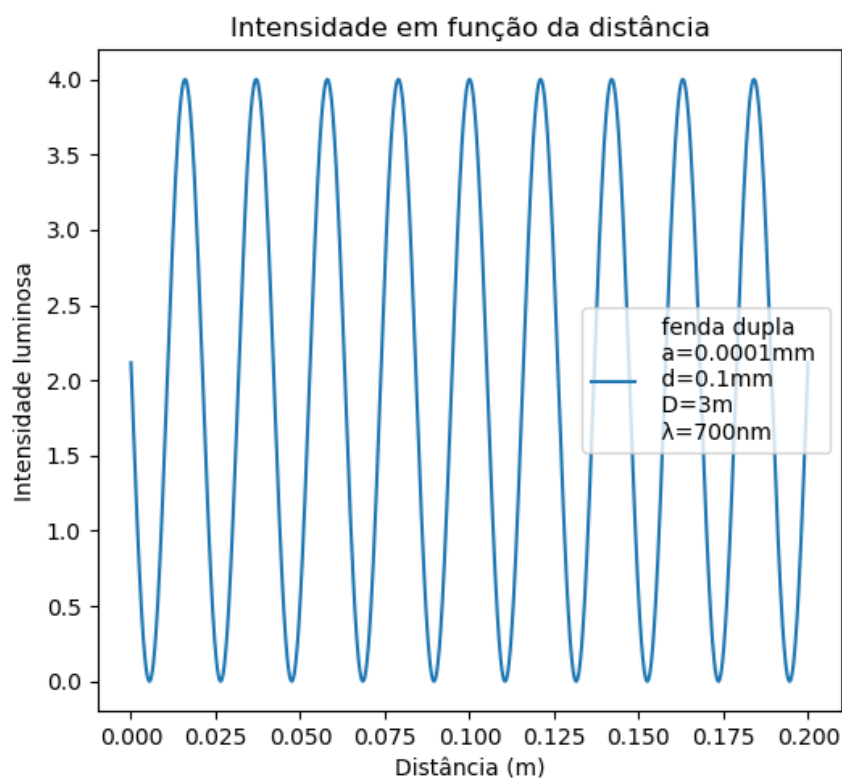


Figura 6 – Padrão de interferência da luz por fenda dupla
Fonte: Os autores

3.4.2 Difração: Fenda simples

Vamos discutir agora o fenômeno de difração da luz quando esta passa por uma fenda simples (ou fenda única) de largura a qualquer. Como já foi mencionado, esse fenômeno é mais complexo que o simples alargamento das frentes de ondas, dado pelo princípio de Huygens, pois também forma uma figura de interferência (ou figura de difração) ao ser interceptada por uma tela de observação. Assim como foi feito no caso da fenda dupla da seção 3.4.1, vamos discutir a posição das franjas e a distribuição de intensidades ao longo de uma tela de observação. A Fig. 7 a seguir mostra um esquema da fenda simples sendo atingida por uma onda plana.

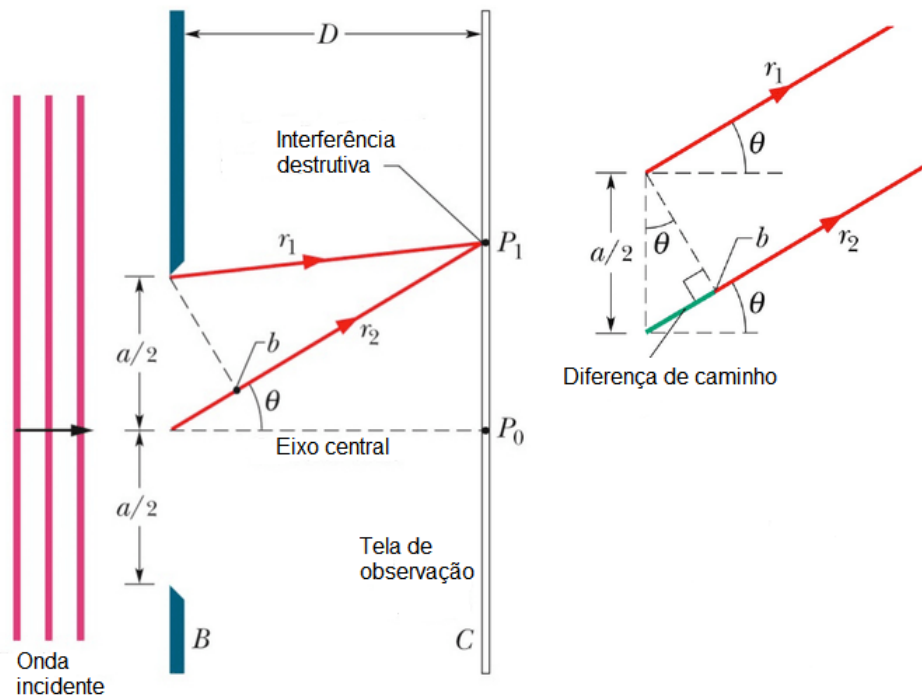


Figura 7 – Os raios r_1 e r_2 sofrem interferência destrutiva no ponto P_1 .

Fonte: (58)

Neste caso, de forma geral as dificuldades matemáticas são maiores que no caso da dupla fenda da seção anterior. Vamos encontrar a equação para posição das franjas escuras (interferência totalmente destrutiva), porém, sobre as franjas claras, apenas afirmaremos que estão a meio caminho entre duas franjas escuras consecutivas. Para encontrar a primeira franja escura, Dividimos primeiramente a fenda em duas partes e traçando dois raios r_1 e r_2 como na Fig. 7, a diferença de caminho entre eles é dado por:

$$r_1 - r_2 = \frac{a}{2} \sin \theta \quad (3.19)$$

A interferência será destrutiva quando a diferença de caminho ΔL for um número inteiro de $\frac{\lambda}{2}$, então:

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

$$\boxed{a \sin \theta = m\lambda} \quad m = 1, 2, 3, \dots (\text{franjas escuras}) \quad (3.20)$$

A equação 3.20 mostra que quanto menor for a largura a da fenda, mais distante do eixo central será a primeira franja escura, portanto, maior será extensão do máximo central. Isso indica que o efeito da difração se torna mais acentuado quanto menor for a fenda. No limite em que a fenda se torna muito grande em relação ao comprimento de onda da luz, quase nenhuma difração será percebida e entramos no limite da óptica geométrica.

Vamos agora determinar a distribuição de intensidade luminosa para fenda simples. Para isso, vamos aplicar o princípio de Huygens-Fresnel fazendo mentalmente a divisão da fenda em N partes igualmente espaçadas, e fazendo cada ponto dessa divisão se comportar como uma fonte de luz. Vamos colocar também o eixo central dividindo a fenda ao meio, e estabelecer a coordenada x na direção do comprimento da fenda. Os valores de x variam então de $-a/2$ até $a/2$, como mostra a Fig. 8.

Vimos no caso da fenda dupla, que podemos escrever a amplitude do campo elétrico associado a duas ondas eletromagnéticas planas que se encontram em um ponto P como:

$$v(x) = A(e^{-i\vec{k}\cdot\vec{x}_1} + e^{-i\vec{k}\cdot\vec{x}_2}) \quad (3.21)$$

Generalizando para N ondas planas, a amplitude total $V(x)$ será então a soma de todas as amplitudes associadas a cada uma das N ondas:

$$V(x) = A \sum_{j=1}^N e^{-i\vec{k}\cdot\vec{x}_j} \quad (3.22)$$

Notemos que quando $\theta = 0$, temos:

$$\vec{k} \cdot \vec{x}_j = kx_j \sin(0) = 0$$

E a amplitude é máxima, dada por:

$$V(0) = A \sum_{j=1}^N e^0 = NA \quad (3.23)$$

Vamos definir uma distribuição de amplitudes $V(\theta)$ relativas à amplitude máxima. Assim, pegando uma variação $\Delta X = \frac{a}{N}$, e a tornando tão pequena quanto se queira, como mostra a Fig. 8, a variação se torna diferencial, e o somatório da Eq. 3.22 vira uma integral. Assim, a fração:

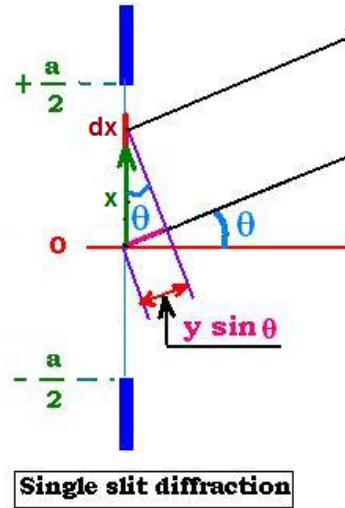


Figura 8 – A largura a da fenda é dividida em N partes, fazendo $N \rightarrow \infty$, dx passa ser a variação infinitesimal entre dois pontos consecutivos.

Fonte: (60)

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{1}{NA} A \sum e^{-i\vec{k} \cdot \vec{x}_j} \quad \text{onde, } \frac{1}{N} = \frac{\Delta X}{a}$$

Vira a integral:

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{1}{a} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{-i\vec{k} \cdot \vec{x}} dx \quad (3.24)$$

Que pode ser resolvida fazendo uma substituição simples,

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{1}{a} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{-ikx \sin \theta} dx \quad (3.25)$$

$$u = -ikx \sin \theta$$

$$\frac{du}{dx} = -ik \sin \theta$$

$$dx = \frac{du}{-ik \sin \theta}$$

$$\frac{1}{a} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{-ikx \sin \theta} dx = \frac{1}{a} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{e^u}{-ik \sin \theta} du$$

$$= \frac{1}{a} \left[\frac{e^{-ikx \sin \theta}}{-ik \sin \theta} \right]_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}}$$

$$= \frac{1}{a} \left[\frac{e^{-ik \frac{a}{2} \sin \theta} - e^{ik \frac{a}{2} \sin \theta}}{-ik \sin \theta} \right] \quad (3.26)$$

Lembrando que,

$$e^{-ik\frac{a}{2}\sin\theta} = \cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) - i\sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right), \quad (3.27)$$

E que,

$$e^{ik\frac{a}{2}\sin\theta} = \cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) + i\sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) \quad (3.28)$$

Teremos:

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{-2i\sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right)}{-2ik\frac{a}{2}\sin\theta} = \frac{\sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right)}{k\frac{a}{2}\sin\theta} \quad (3.29)$$

Fazendo $\alpha = ka\sin\theta$,

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{\alpha}{2}}$$

No entanto, como já vimos: $I = \langle E^2 \rangle = |V|^2$, Portanto:

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \frac{V(\theta)^2}{V(0)^2}$$

$$\boxed{\frac{I(\theta)}{I(0)} = \left[\frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{\alpha}{2}} \right]^2} \quad (\text{Difração - fenda simples}) \quad (3.30)$$

Notemos que os mínimos ocorrem quando $\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 0$, ou seja, quando $\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ é $\pi, 2\pi, 3\pi, \dots$

$$\frac{\alpha}{2} = m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$$\frac{ka\sin\theta}{2} = m\pi$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{a\sin\theta}{2} = m\pi$$

$$\boxed{a\sin\theta = m\lambda}, \quad (3.31)$$

que é a equação 3.20 encontrada anteriormente.

O padrão de difração formada neste caso, é mostrado na Fig. 9.

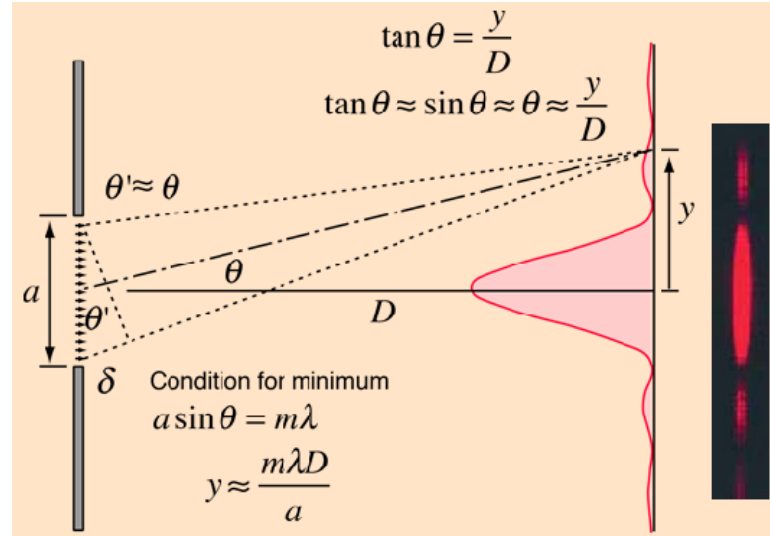


Figura 9 – Padrão de difração da luz por uma fenda simples
Fonte: (61)

3.4.3 Difração: Dupla Fenda

Na seção 3.4.1, vimos o caso da interferência sofrida pela luz ao passar por uma dupla fenda, porém, na ocasião foi considerado que a largura a das fendas era muito pequena, o que resultou num padrão com franjas claras de praticamente mesma intensidade. O que acontece, porém, se as fendas tiverem larguras a qualquer? Ou seja, não necessariamente pequena? Isso é o que acontece na maioria dos casos práticos, pois geralmente as fendas não possuem largura desprezível.

Assim, no caso de duas fendas de largura a , separadas por uma distância d , acontece a sobreposição do efeito da interferência das duas fendas com o efeito da difração individual de cada uma delas. Como mostra Hecht (49), isto resulta numa distribuição de intensidades que é um sistema de interferência de dupla fenda modulada por um padrão de difração de fenda única, onde aparece o termo de interferência e o termo de difração. Essa distribuição é dada por:

$$I(\theta) = \left(4I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \right) \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{\alpha}{2}} \right)^2 \quad (\text{Difração – Dupla fenda}) \quad (3.32)$$

onde,

$$\varphi = kd \sin \theta \quad e \quad \alpha = ka \sin \theta$$

O padrão de difração formado neste caso está ilustrada na Fig. 10

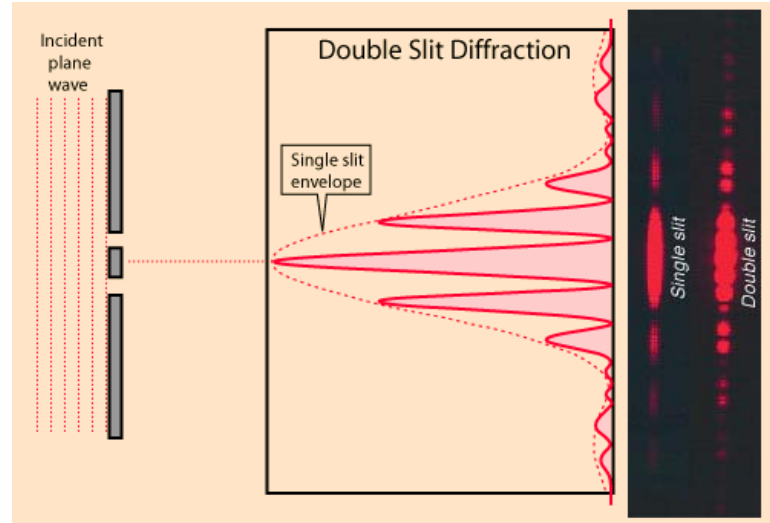


Figura 10 – Padrão de difração da luz por dupla-fenda.

Fonte: (61)

3.4.4 Difração: Fendas múltiplas

O mesmo raciocínio empregado no caso da dupla fenda pode ser estendido para encontrar a distribuição de intensidades para o caso de N fendas de mesma largura e igualmente espaçadas. Na verdade, a equação apresentada no caso da dupla fenda, é um caso particular da equação mais geral de distribuição de intensidades para N fendas idênticas. Teremos então um padrão de interferência modulado pelo padrão difrativo. A distribuição de intensidades é dada por:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin N \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \right)^2 \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{\alpha}{2}} \right)^2 \quad (\text{Difração} - N \text{ Fendas}) \quad (3.33)$$

Lembrando que estamos desde o início desta seção tratando I_0 como a intensidade de luz emitida por uma única fenda na direção $\theta = 0$. A intensidade total $I(0) = N^2 I_0$.

As Figuras abaixo mostram os gráficos de intensidades para os casos de 3 e 5 fendas.

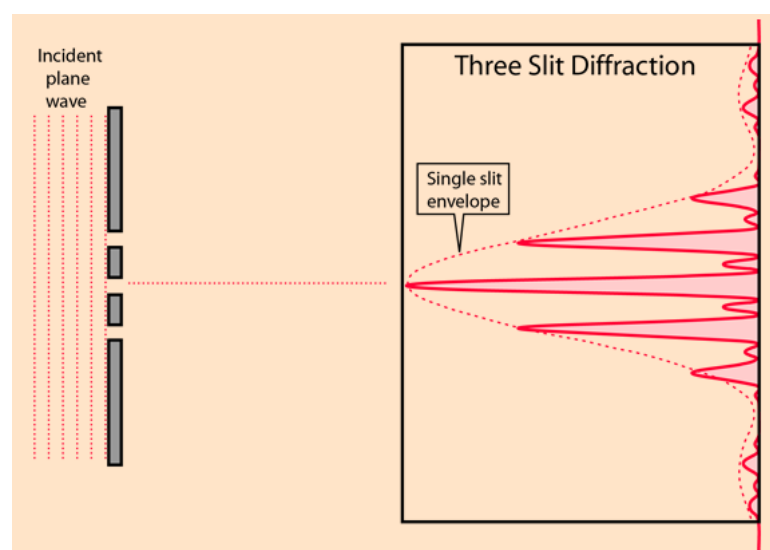


Figura 11 – Padrão de difração da luz por 3 fendas.
Fonte: (61)

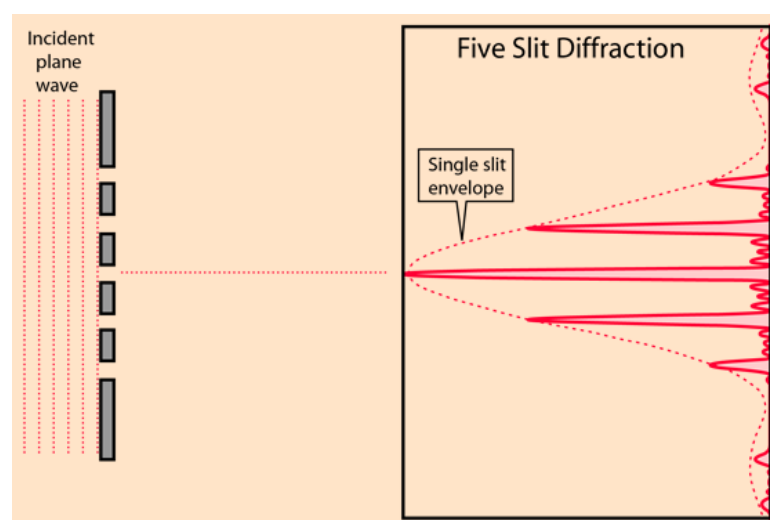


Figura 12 – Padrão de difração da luz por 5 fendas.
Fonte: (61)

4 Materiais e métodos

4.1 Aparato experimental

Foi realizado um amplo estudo bibliográfico sobre o uso do Arduino na aquisição de dados em experimentos de física, afim de produzir um produto educacional inovador com o uso dessa tecnologia. Foram estudados a programação e montagem de circuitos com o mesmo, e especialmente sobre os principais elementos do circuito que compõem o aparato experimental, quais sejam: Sensor de luminosidade LDR e motor de passos. Assim, primeiramente foi montado um protótipo do equipamento, com o uso de uma sucata de uma impressora a jato de tinta, visto que estas impressoras possuem um motor que faz movimentar um carrinho com os cartuchos, e pôde-se, portanto, fazer o primeiro protótipo, apresentado na Fig. 13.

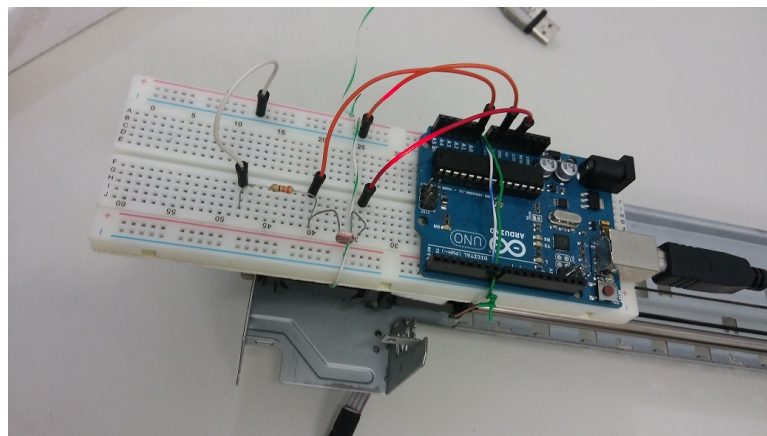
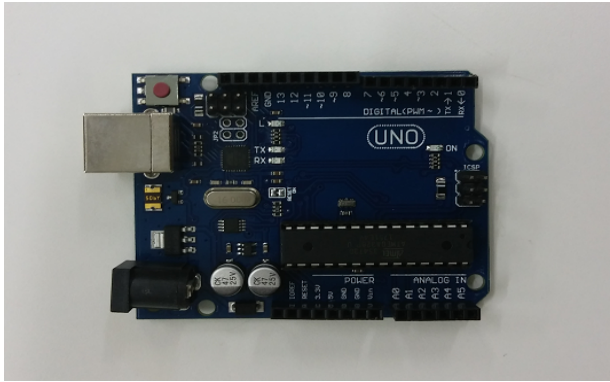
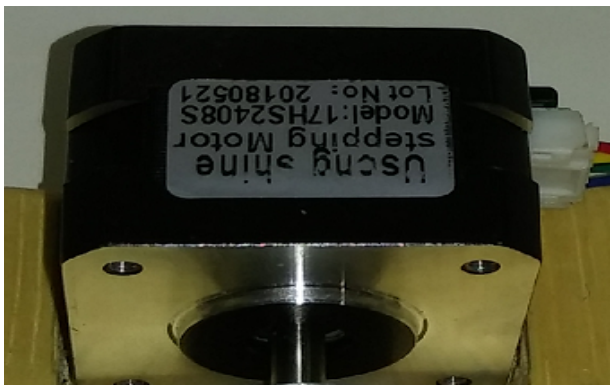
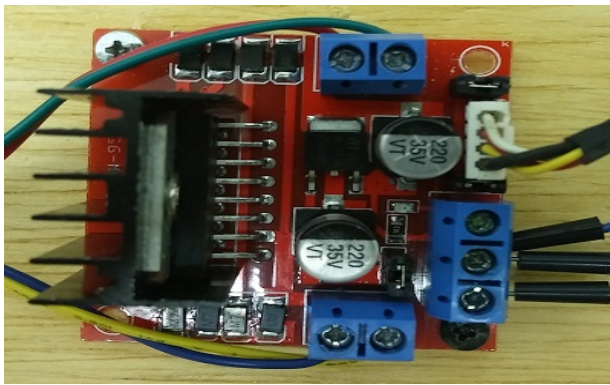


Figura 13 – Protótipo do experimento com utilização do Arduino Uno, Sensor LDR e trilho de impressora com motor de passos.

Fonte: Os autores

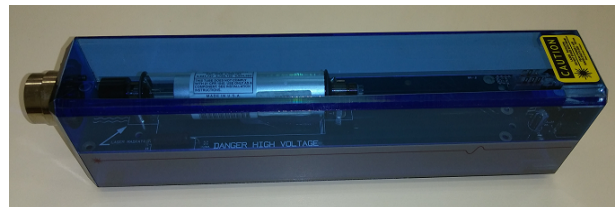
O protótipo funcionou perfeitamente, porém, para ter maior precisão nas medidas de posição, optou-se pela utilização de um fuso de rosca trapezoidal, pois esses permitem movimento linear totalmente controlado, e são amplamente utilizados em máquinas que exigem grande precisão de posicionamento, como CNC's (Computer Numeric Control ou Controle Numérico Computadorizado) e outras. Os materiais utilizados no experimento estão listados na Tab. 1.

Descrição do item	Imagem
Arduino Uno: É um microcontrolador que, através do programa gravado em sua memória, faz todo o controle do experimento. Recebe o sinal do sensor, converte e envia os dados para a porta serial, que podem ser visualizados no monitor serial da própria IDE do Arduino, ou acessados por outros programas capazes de estabelecer comunicação serial.	
Módulo sensor LDR (Light Dependent Resistor): É um resistor variável em que sua resistência depende da intensidade de luz que incide sobre ele. Sua resistência diminui quanto maior for a intensidade luminosa. No Arduino, os valores de luminosidade captados pelo sensor é convertido em números que variam de 0 (maior intensidade) a 1023 (menor intensidade).	
Motor de passos (modelo 17HS2408-S): É um motor elétrico que tem sua rotação controlada, ou seja, é possível controlar sua velocidade angular e o deslocamento angular realizado como múltiplo do deslocamento unitário (1 passo). Neste modelo, cada passo tem $1,8^\circ$, precisando assim de 200 passos para uma rotação completa. Para seu funcionamento é necessário um driver para ligação.	
Driver Motor Ponte H L298n: É um Driver para controle de cargas indutivas como relés, motores DC e motores de passo. É baseado em um chip do tipo L298n, e faz a interface entre a placa Arduino e o motor de passo, controlando sua velocidade e rotação.	

Fuso de rosca trapezoidal: É uma barra reta formada por roscas e passos contínuos com um ângulo de 30° . Esse dispositivo é usado na execução de quase todos os processos e aplicações industriais que exigem um movimento linear (na vertical ou horizontal) e de posicionamento (62). O fuso utilizado tem comprimento de 60 cm, é do tipo TR8, e provoca um deslocamento linear de 8mm a cada rotação completa.



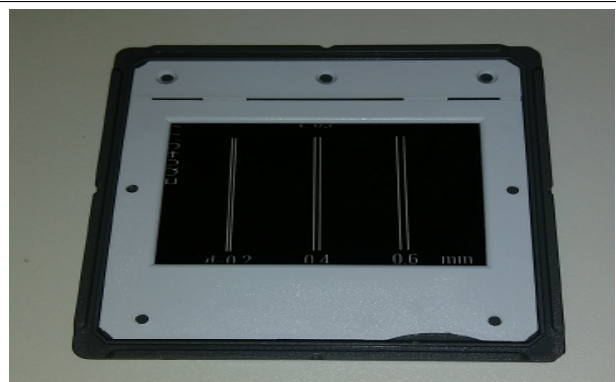
Laser: Para os experimentos podem ser utilizados lasers comuns, como os laser de diodo obtidos facilmente em lojas de eletrônica, brinquedos, ou mesmo livrarias, a um custo baixíssimo. Porém, os laser de diodo possuem menor qualidade que os lasers a gás, pois estes apresentam maior coerência. Por isso utilizamos neste projeto um laser de gás Hélio e Neônio (HeNe) da marca Cidepe (disponibilizados pela universidade), de comprimento de onda 600-700nm, apresentado na figura ao lado.



Fenda Simples: Placa com 3 fendas simples da marca Cidepe, com larguras de 0,1mm, 0,2mm e 0,3mm, utilizadas nos experimento de fendas simples deste trabalho. O usuário pode também construir suas próprias fendas. Em (63) é apresentado um método de impressão em folito (filme fotográfico) para confecção de fendas diversas.



Fendas Duplas: Placa com 3 fendas duplas da marca Cidepe. Todas as fendas tem largura de 0,2mm, porém, a distância entre as fendas são de 0,2mm, 0,4mm e 0,6mm.



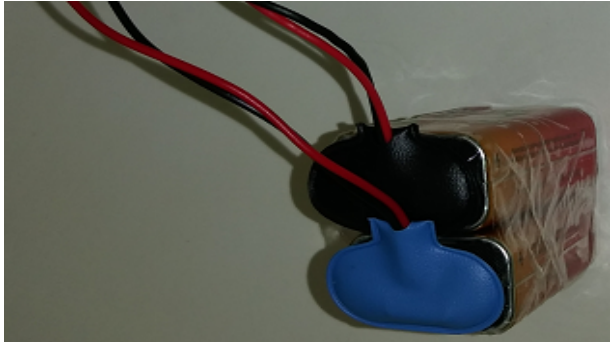
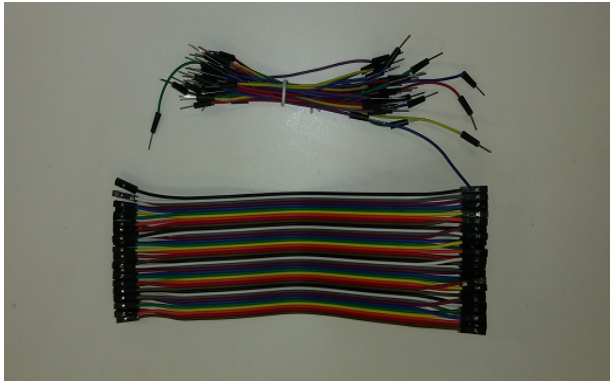
Baterias: Devido a alta potência do motor de passos, a alimentação deste deve ser feita por uma fonte externa. Nos experimentos deste trabalho, foram utilizados 2 baterias de 9V ligadas em paralelo. É importante salientar que: o usuário deve ler as especificações do motor e do driver que estiver utilizando, para que possa fornecer a tensão elétrica adequada; e quanto maior o número de baterias em paralelo o usuário utilizar, o motor terá melhor funcionamento, pois disporá de mais potência. Assim, recomenda-se a utilização de no mínimo 2 baterias.	
Conexões Elétricas: Foram utilizadas conexões elétricas do tipo macho e do tipo fêmea (figuras ao lado) para conexão dos elementos. Deve-se procurar conexões compatíveis com os bornes da placa Arduino e protoboard, encontradas facilmente em lojas do ramo.	

Tabela 1 – Descrição dos materiais utilizados no experimento

A montagem do aparato foi realizado sobre uma tábua, e consistiu em fixar o motor de passos no fuso de rosca trapezoidal, para que assim, pudesse movimentar a protoboard com o sensor LDR, e fazer a varredura das intensidades de luz nos padrões de difração gerados. O fuso utilizado faz o conjunto percorrer a distância de 8mm a cada rotação do motor, assim, com o controle do motor de passos via Arduino, foi determinado a distância entre cada medida feita pelo sensor LDR, gerando um conjunto de pontos de distância x intensidade ao longo dos padrões de difração gerados. O aparato completo é mostrado na Fig. 14

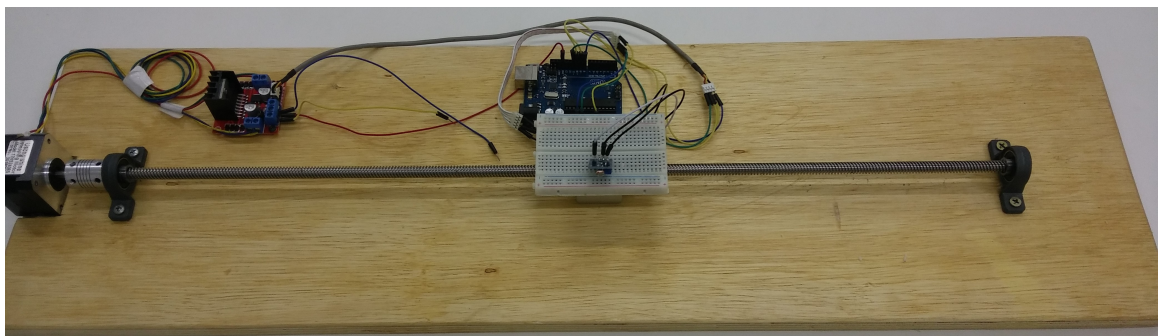


Figura 14 – Aparato experimental utilizado nas medidas.
Fonte: Os autores

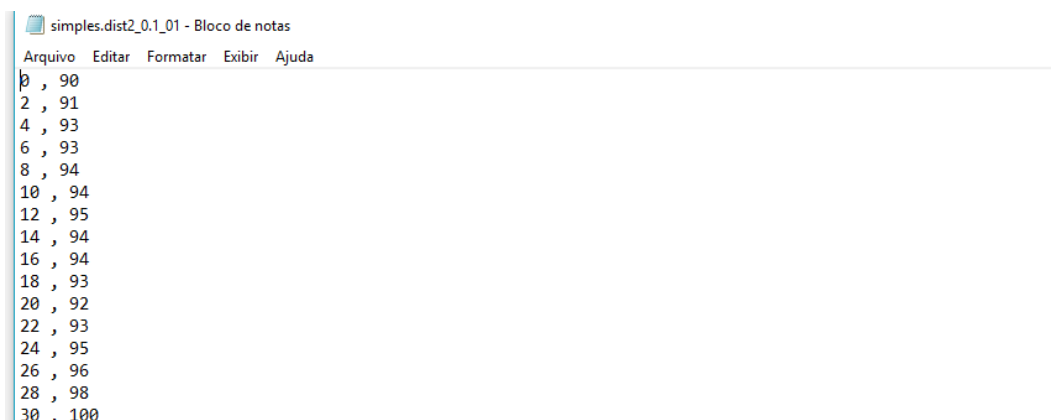
Para gerar as figuras de difração a serem medidas, pode ser utilizado um laser diodo comum juntamente com objetos como fio de cabelo, grafite, e fendas de variados tipos. Durante a pesquisa foram utilizados e testados diferentes lasers e objetos para formação das figuras de difração, porém, nos resultados experimentais que serão apresentados neste trabalho, foi utilizado um laser HeNe vermelho, marca Cidepe, pois os lasers a gás apresentam maior coerência que os lasers a diodo, e assim, apresentam padrões de difração mais nítidos que os lasers comuns. Foram utilizados também um conjunto de 3 fendas simples com diferentes larguras, e outro com 3 fendas duplas (com fendas de mesma largura e diferentes distâncias entre elas). Desta forma, foram realizadas vários testes e medidas, todas obedecendo as condições da difração de Fraunhofer, para que os resultados pudessem ser analisados segundo as equações apresentadas no capítulo anterior. Para formação dos padrões, o laser deve ser projetado sobre a (s) fenda (s), conforme mostrado na Fig. 15, ajustando a posição de maneira que em uma tela de observação, seja formado um padrão nítido de difração.



Figura 15 – Demonstração do laser HeNe incidindo sobre a fenda para geração do padrão de difração

Fonte: Os autores

Foi feito o programa na IDE do Arduino para controle de todo o experimento. Mas, primeiramente, realizou-se um teste para verificar a precisão dos deslocamentos que o motor de passos através do fuso de rosca trapezoidal imprime no conjunto protoboard-sensor LDR. No fuso utilizado, a cada volta completa do motor (que neste caso equivale a 200 passos), há um deslocamento de 8mm no conjunto, portanto, para uma medição de intensidades de 4 em 4 milímetros, por exemplo, a medição das intensidades pelo sensor LDR deve ser feita a cada 1/2 revolução. Para uma medição de 2 em 2 milímetros o programa deve ser ajustado para medição das intensidades a cada 1/4 de revolução. Os dados de posição versus luminosidade podem ser visualizados em tempo real no monitor serial do próprio Arduino, ou ainda, em qualquer programa capaz de estabelecer comunicação serial com o mesmo. Um exemplo de dados de distância (em mm) x luminosidade obtidos estão mostrados na Fig. 16. Os códigos dos programas utilizados e os circuitos para ligação dos componentes estão apresentados no Apêndice A.



0	, 90
2	, 91
4	, 93
6	, 93
8	, 94
10	, 94
12	, 95
14	, 94
16	, 94
18	, 93
20	, 92
22	, 93
24	, 95
26	, 96
28	, 98
30	, 100

Figura 16 – Uma parte dos dados obtidos em um dos experimentos realizados
Fonte: Os autores

Para fazer análise dos dados, foi utilizado uma rotina feita em Python, desta forma, os dados são gravados, e é gerado o gráfico da curva experimental com os pontos obtidos. Assim, permitem a visualização simultânea (ou posterior com a utilização dos dados gravados) dos resultados do experimento.

Foi construído ainda outro programa em Python para simulação teórica dos resultados, de acordo com as características dos equipamentos utilizados no aparato e as configurações do experimento, tais como; distâncias envolvidas, largura da(s) fenda (s), distância entre as fendas (quando foi caso). Desta forma, pôde-se atestar a qualidade das medidas realizadas, e o quanto as mesmas estão próximas dos modelos teóricos que embasam este trabalho.

4.2 Metodologia de ensino utilizadas na aplicação da sequência didática

Para que os alunos pudessem ter uma maior quantidade de conhecimentos prévios, optou-se por inverter a sequência dos conteúdos de óptica (que no currículo da escola seria primeiro) com os conteúdos de oscilações e ondulatória, pois era preferível que os alunos já soubessem os conceitos e características dos fenômenos tipicamente ondulatórios, para que pudessem fazer associações e melhor compreender o conteúdo de óptica na perspectiva que seria ministrado. A sequência didática aplicada foi dividida em várias etapas, as quais estão na Tab. 2.

Etapas da sequência didática	Descrição	Nº de horas-aula
Oficina de gráficos em Python	Foi realizado um minicurso totalmente prático onde os alunos puderam fazer a plotagem de vários tipos de gráficos em Python (alguns dos scripts utilizados estão disponíveis no apêndice B), mais especificamente, com as bibliotecas Matplotlib e Numpy. O objetivo da oficina foi mostrar o uso de programação para realização de atividades rotineiras dos alunos em várias matérias e para que eles posteriormente de fato entendessem todos os processos por trás do experimento que seria apresentado.	3
Aula sobre a evolução das ideias sobre a natureza da luz e dualidade	Com o objetivo de utilizar como organizador prévio e fazer com que os conteúdos de interferência e difração fossem mais significativos para os alunos, nesta aula foi apresentada a importância histórica dos fenômenos abordados, e como estão relacionados ao processo da evolução das ideias sobre a natureza da luz, começando com as concepções dos povos antigos e chegando à noção moderna de dualidade onda-partícula da luz com a explicação do efeito fotoelétrico por Einstein.	2
Aula sobre os fundamentos teóricos	Nesta aula, foram utilizadas ferramentas diversas para apresentação de uma fundamentação teórica consistente: discussão de um vídeo sobre experimentos de ondas (passado para casa na aula anterior); Apresentação da simulação computacional "interferência de ondas" disponível na plataforma Phet da Universidade do Colorado (64); encerrando com uma atividade sobre os conceitos abordados.	3
Aula experimental	Nesta aula foram feitos dois experimentos: A determinação do comprimento de onda de um laser aplicando princípios da difração da luz em fenda simples, e o experimento da distribuição das intensidades luminosas em padrões de difração de fendas simples e fendas duplas.	2

Tabela 2 – Etapas da sequência didática aplicada

A descrição detalhada da aplicação da sequência está no Capítulo 6.

5 Alguns resultados experimentais obtidos com o aparato

5.1 Fenda simples

Nestes experimentos, foram realizadas medidas da intensidade em função da posição de padrões de difração obtidos ao passar o feixe de laser por três fendas simples, de larguras: 0,1 mm, 0,2 mm e 0,3mm. Em todos estes experimentos a distância do laser até a fenda foi de 3 metros, e a distância da fenda até o sensor LDR foi de 3,5 metros.

Ao fazer o experimento, o sensor varreu os padrões com medidas da luminosidade a cada 2 mm, os dados são gravados em arquivo do tipo CSV, e o gráfico da distância x intensidade é construído com os mesmos utilizando o Python. Os padrões de difração produzidos e seus respectivos gráficos, obtidos nos experimentos com as fendas simples, estão ilustrados nas Fig. 18 a Fig. 23. Observe que com o alargamento da fenda, há o estreitamento da largura dos padrões de difração gerados, bem como o aumento no número de franjas claras.

Foi feito também um programa em Python para simulações de padrões de difração de N-fendas quaisquer, utilizando as equações de distribuição de intensidades da difração de Fraunhofer, e assim, fazer as previsões dos resultados esperados em cada experimento. Apresentamos na Fig. 17 o gráfico referente à simulação do resultado para o experimento com a fenda simples de 0,1mm, utilizando o comprimento de onda do laser, as mesmas distâncias envolvidas, e a mesma intensidade máxima I_0 obtida no experimento. As análises dos dados com os tratamentos teóricos e experimentais estão sendo aprimorados para publicação de artigo.

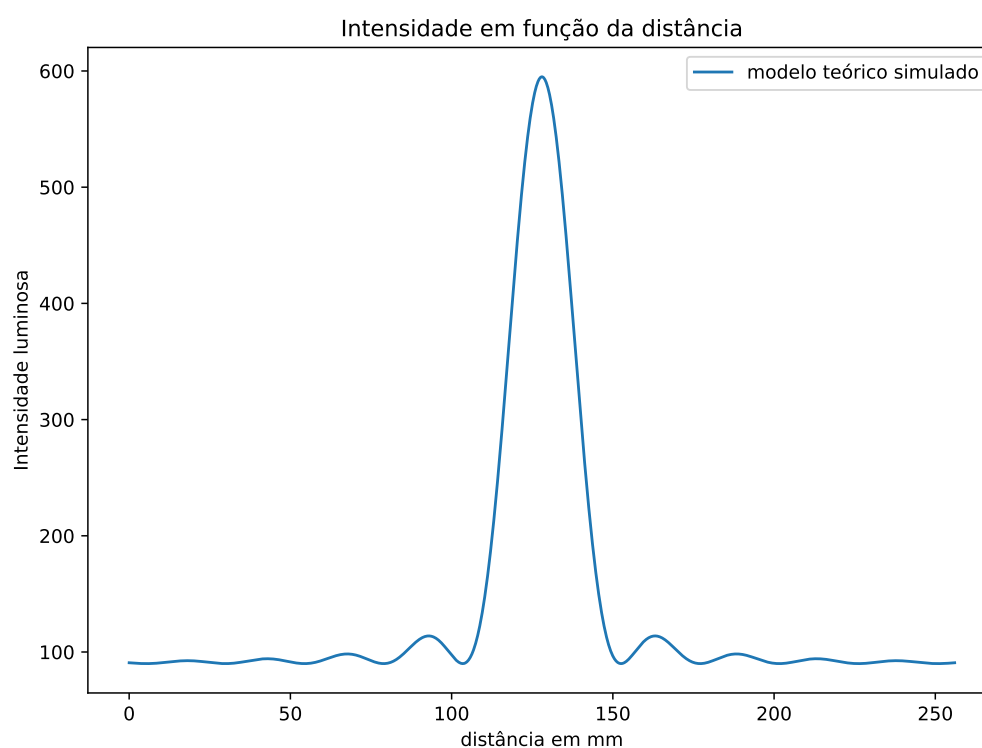


Figura 17 – Gráfico de simulação do experimento com fenda simples de largura 0,1 mm.
Fonte: Os autores

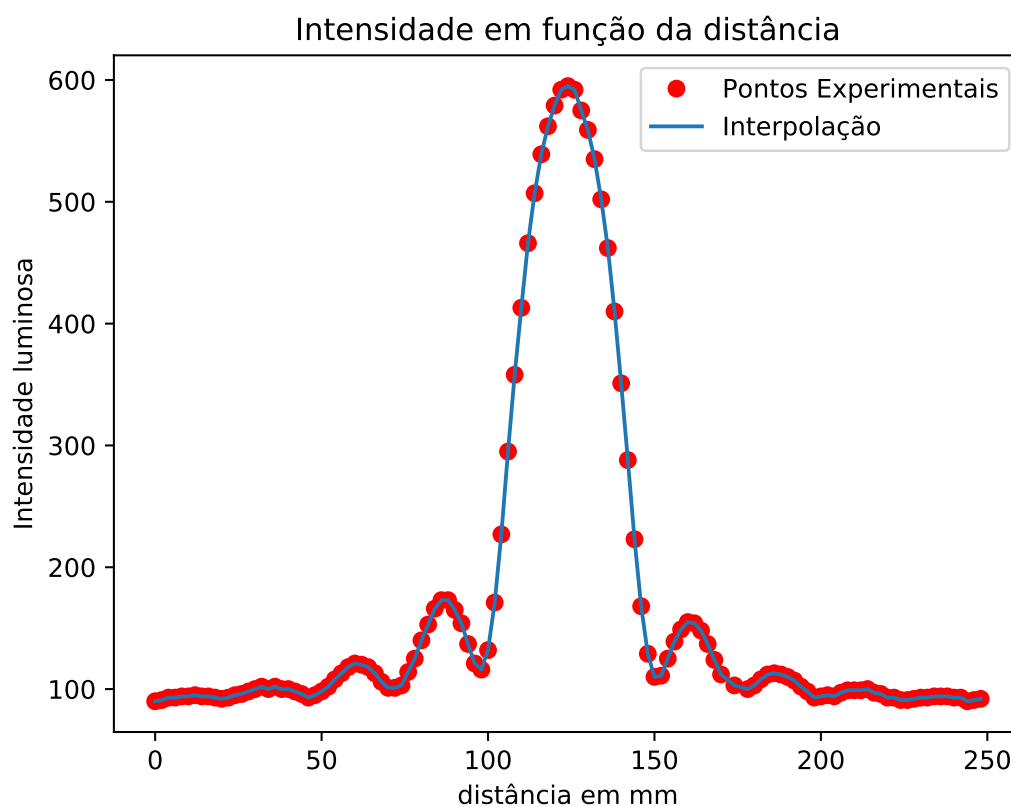


Figura 18 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,1 mm.
Fonte: Os autores



Figura 19 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,1
Fonte: Os autores

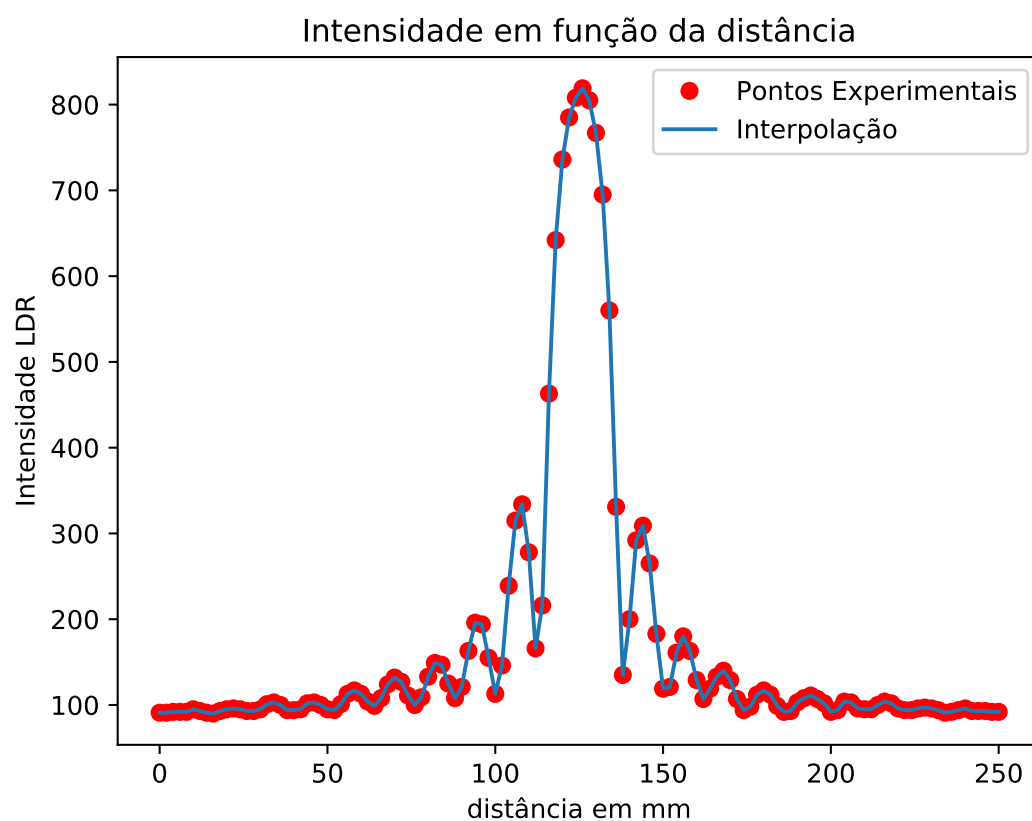


Figura 20 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,2 mm.
Fonte: Os autores



Figura 21 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,2
Fonte: Os autores

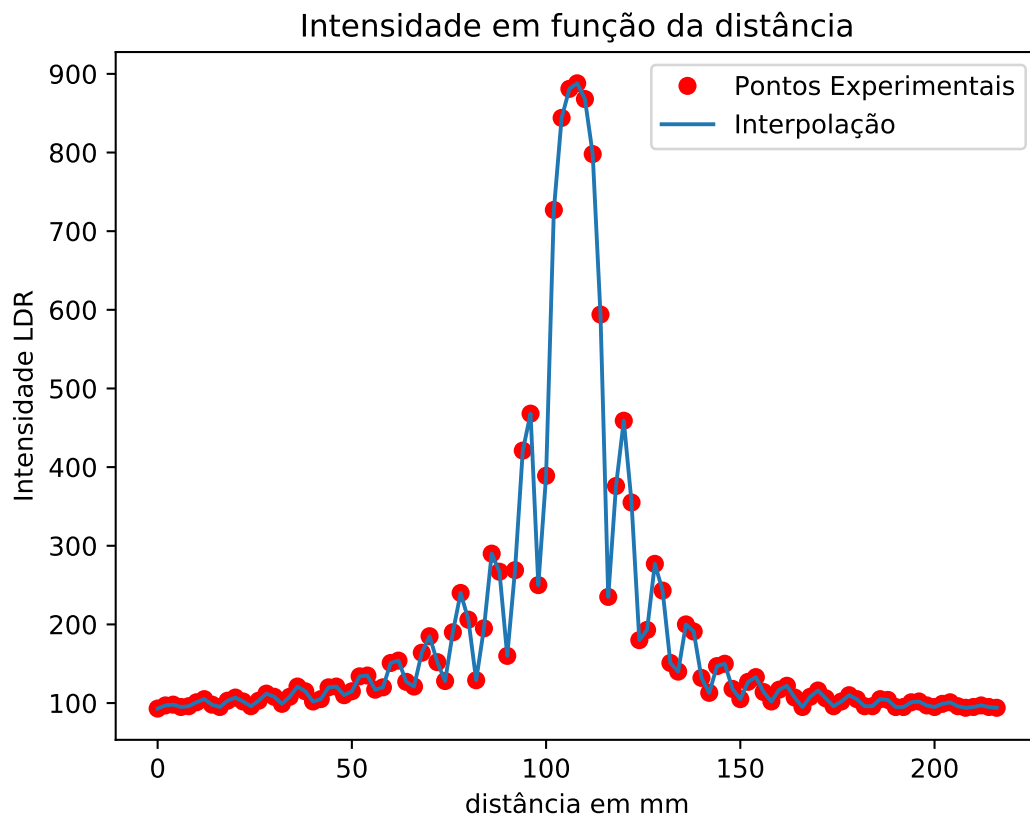


Figura 22 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,3 mm.
Fonte: Os autores



Figura 23 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,3
Fonte: Os autores

Os padrões de difração produzidos e seus respectivos gráficos estão de acordos com os encontrados na literatura (49), (55), (56), (7), como mostrado no referencial teórico, principalmente no que diz respeito à posição dos pontos de máximo e mínima intensidade. No entanto, observa-se nos gráficos que, mesmo obedecendo as condições da difração de Fraunhofer (caso em que as franjas escuras tem intensidade igual a zero), há uma pequena elevação do gráfico nos pontos de mínima intensidade (franjas escuras), isso acontece devido ao sensor LDR ter uma largura de 5mm, o que ocasiona uma pequena sobreposição de luminosidade das franjas vizinhas à medida que as franjas se tornam mais próximas.

5.2 Fenda dupla

Nestes experimentos, foram realizadas medidas da intensidade em função da posição de padrões de difração obtidos com dois pares de fendas duplas. Em todas elas a largura a das fendas é 0,2 mm, e a distância d entre as fendas são de 0,2 e 0,4mm. A distância do laser até a fenda foi de 3 metros, e a distância da fenda até o sensor LDR foi de 3,5 metros. Os gráficos mostrados correspondem aos padrões de difração produzidos, e estão de acordo aos encontrados na literatura (49), (55), (56), (7), principalmente sobre as posições dos pontos de máxima e mínima intensidade. Porém, há uma elevação do gráfico nos pontos de mínima intensidade (franjas escuras), devido as franjas claras estarem mais próximas entre si.

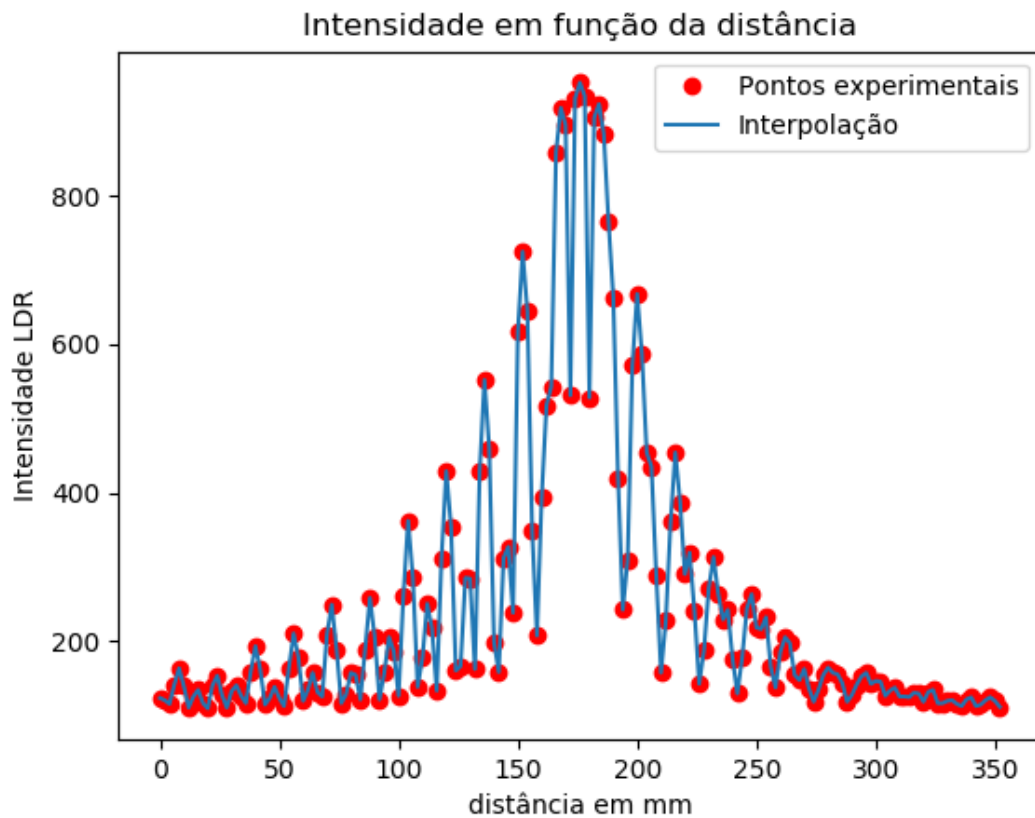


Figura 24 – Gráfico de experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,2 mm entre elas

Fonte: Os autores



Figura 25 – Padrão de difração gerado em experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,2 mm entre elas

Fonte: Os autores

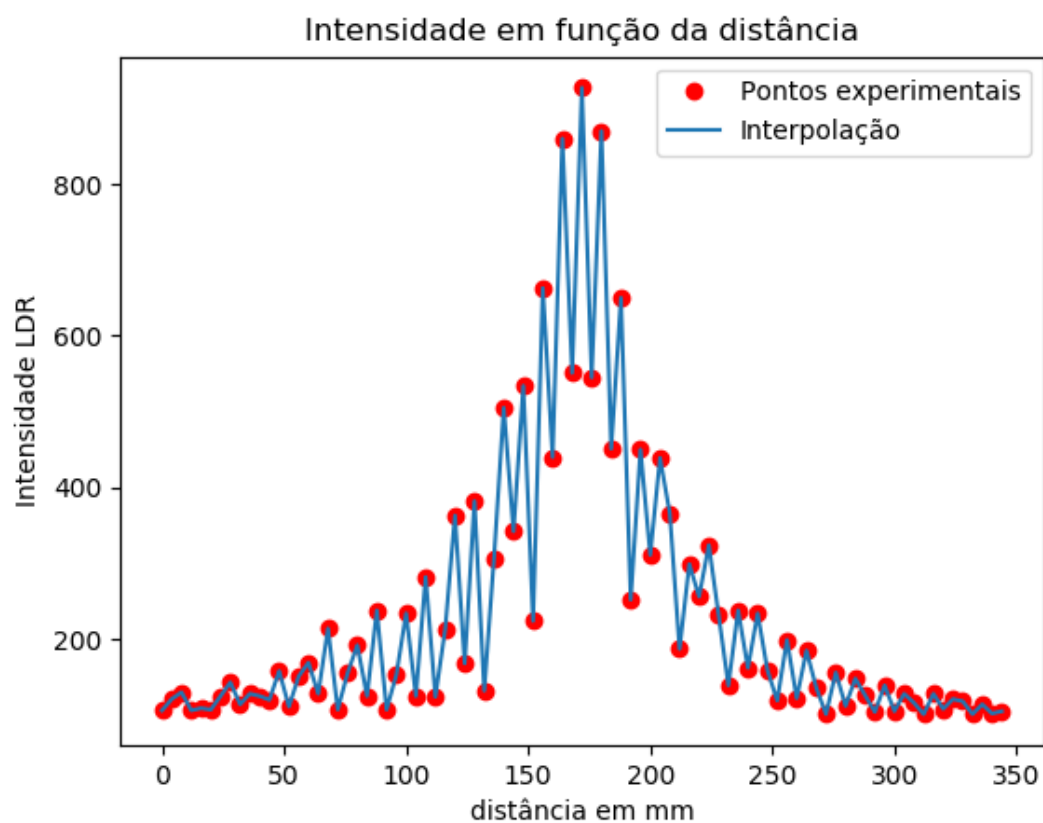


Figura 26 – Gráfico de experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,4 mm entre elas.

Fonte: Os autores



Figura 27 – Padrão de difração gerado em experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,4 mm entre elas

Fonte: Os autores

6 Experiência docente com o uso do Arduino e Python no Ensino de Óptica Ondulatória

A aplicação do produto educacional apresentado neste trabalho foi realizada com alunos do 2º Ano do Ensino Médio do Colégio Adventista de Araguaína, em uma turma de 29 alunos. Por questões curriculares e didáticas, o projeto foi aplicado no final do ano letivo, no mês de novembro de 2018, sendo os últimos conteúdos ministrados no ano para aquela turma (a única do 2º ano na escola).

No total, foram utilizadas 10 horas-aulas de 50 minutos para aplicação do projeto, das quais, 4 delas, realizadas no turno vespertino, fora do horário usual daquela turma (que funciona no turno matutino). As aulas foram distribuídas em 4 etapas, de acordo com a Tab. 2 apresentada no Capítulo 4.

Como já mencionado, o material produzido tem como destino principal os professores de Física, então não houve a preocupação da produção dos kit's experimentais pelos alunos, ou que eles aprendessem a manusear todos equipamentos e softwares utilizados nos experimentos, pois isso exigiria muito tempo e poderia encarecer bastante o projeto. O foco do trabalho foi então apresentar a Física sob uma perspectiva diferente, com experimentos que permitissem a visualização real do fenômeno estudado e inserir tecnologias modernas no processo de ensino-aprendizagem. E além disso, abordar um conteúdo pouco explorado no Ensino Médio, permitindo aos alunos ter uma introdução à Física Moderna, e fazendo-os compreender o surgimento da ideia de dualidade onda-partícula e sua importância no desenvolvimento da Física.

Apresentamos a seguir cada etapa realizada da sequência didática que foi executada com os alunos.

6.1 Oficina de gráficos com Python

Um dos objetivos da aplicação do trabalho era que os alunos tivessem conhecimento e entendessem todo o processo envolvido por trás do equipamento desenvolvido. O principal elemento de análise dos resultados experimentais apresentados são os gráficos, visto que estes permitem visualizar com maior facilidade os padrões de difração obtidos. A oficina foi realizada pelo professor Luis Antônio Cabral e pelo mestrando Marcelo Rôxo, autores deste trabalho, no Laboratório de informática (Labin) da Universidade Federal do Tocantins (UFT), com um aluno por computador, e teve duração de 3 horas-aula. Na ocasião foi apresentado a linguagem de programação Python como uma ferramenta essencial para inúmeras utilidades, inclusive na

pesquisa e ensino-aprendizagem de Física. Tendo sido feito uma pequena explanação sobre os aspectos gerais da formação de gráficos, os alunos receberam alguns scripts para que pudessem digitar e plotar alguns gráficos simples, incluindo progressivamente mais elementos aos gráficos a fim de perceberem o que cada comando estava acrescentando aos mesmos. Assim, os alunos plotaram gráficos com dados escritos direto no script do programa, como também fazendo a leitura de dados de um arquivo de texto. Fizeram também gráficos de funções, e viram como estes e tudo que foi aplicado pode estar associado ao estudo de fenômenos reais. Alguns dos scripts utilizados na oficina estão disponíveis no Apêndice B.

A oficina foi muito proveitosa, e a maior parte dos alunos conseguiram fazer todas as atividades propostas. A Fig. 28 mostra um dos momentos desta atividade.



Figura 28 – Oficina de gráficos com Python

Fonte: Os autores

6.2 Breve história da Óptica e Dualidade

Outro momento da aplicação ocorreu com uma aula sobre a história da óptica e a construção do conceito de dualidade onda-partícula da luz. A aula foi baseada no texto do referencial teórico apresentado no Capítulo 3 deste trabalho e foi ministrada em 2 tempos de 50 minutos com a apresentação de slides.

Assim, foi apresentado uma linha do tempo com os principais marcos históricos da Óptica, os pensadores mais notáveis e suas diferentes concepções sobre a natureza da luz, começando pelos antigos gregos, passando pela Idade Média e chegando na Idade Moderna, onde as descobertas dos fenômenos de difração e interferência abriram a discussão que culminou na concepção ondulatória da luz, visto que esses fenômenos não podiam de forma alguma ser explicados com a concepção corpuscular newtoniana.

A aula finalizou com o relato da explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico em 1905 (que lhe rendeu o Prêmio Nobel em 1921), onde ele apresentou a luz novamente como um feixe de partículas (os fótons), o que fez a comunidade científica aceitar que a luz, ora se comporta como onda, ora se comporta como partícula, e assim, estabelecendo a concepção de dualidade onda-partícula para a luz.

Desta forma, procurou-se enfatizar a descoberta e discussões em torno dos fenômenos da difração e interferência luminosa como um dos marcos históricos fundamentais para todo o desenvolvimento da Física Moderna e Contemporânea, utilizando-os como organizadores prévios para preparar os alunos para melhor receber o conteúdo específicos e mais densos que seriam apresentados na aula seguinte.

Pode-se afirmar que a aula sobre a história da Óptica e dualidade foi uma aula muito produtiva, visto que os alunos se envolveram mais que o comum nas discussões e levantaram alguns questionamentos pertinentes, por exemplo: “Como a luz é estudada na prática se ela pode ser onda ou partícula?”, “Onde a difração e interferência são aplicados no cotidiano?”. Assim, pôde-se acrescentar algumas informações importantes, que foi bastante satisfatória.

6.3 Fundamentos teóricos

Nesta parte, realizada com um total de 3 horas-aula, foram passados aos alunos os conceitos fundamentais da óptica ondulatória, pois antes das atividades experimentais, era necessário ampliar os conhecimentos prévios que os alunos tinham sobre os fenômenos de difração e interferência, e torná-los mais gerais e abrangentes. Assim, na aula anterior à aplicação dessa última parte, foi explicado aos alunos que nos próximos dois encontros seria feita a finalização do projeto, e foi avisado também sobre o envio do vídeo Experimentos de ondas (65) para que eles vissem em casa, pois abriríamos a aula discutindo-o.

O vídeo enviado aos alunos apresenta vários fenômenos ondulatórios realizados numa cuba de ondas, onde os alunos puderam relembrar, além de outros fenômenos, a interferência e difração de ondas na água. A aula foi iniciada com perguntas sobre o que eles tinham visto no vídeo (a maioria dos alunos afirmaram que tinham visto o vídeo), instigando-os a lembrarem o que sabiam sobre as ondas, e aproveitando os "ganchos" que eles davam para esclarecer conceitos e mostrar exemplos. Nesta parte, as palavras mais importantes que os alunos diziam eram anotadas no quadro, prática comum no início das aulas de Física. Relembremos que as ondas transportam energia, não transportam matéria, que podem ser mecânicas, eletromagnéticas, gravitacionais. Relembremos também a fisiologia de uma onda e os fenômenos que a elas estão relacionados.

Em seguida, revisitamos (já tinha sido mostrado) a simulação de Física "Interferência de Ondas", disponível na Plataforma de Simulações Interativas para Ciência e Matemática, da Universidade do Colorado, Phet (64). Essa excelente simulação, tem foco principalmente

nos aspectos qualitativos dos fenômenos, e pode ser feito tanto de ondas mecânicas como de ondas eletromagnéticas, sendo possível simular como se dá a interferência entre duas ondas que se encontram e a difração de uma onda ao passar por uma ou duas fendas. Permite ainda alterar distâncias envolvidas, a frequência da onda (no caso da luz visível isso também implica em alterar a cor), intensidade da fonte e outros. Utilizando esta ferramenta pudemos fechar todos os conceitos e associações que pretendíamos, fazendo o link entre os diferentes tipos de ondas e mostrando a interferência e a difração como fenômenos intrinsecamente ligados a todo e qualquer tipo de onda.

Foram também mostrados uma previsão teórica dos resultados experimentais, bem como alguns padrões de difração e seus respectivos gráficos produzidos com o equipamento construído (os quais foram mostrados no Capítulo 5), de forma a preparar os alunos para as atividades experimentais que faríamos no próximo encontro.

Novamente os alunos tiveram grande aceitação com o método proposto, pois nas palavras de alguns, as simulações, o vídeo e apresentação de resultados de medições reais, os ajudaram a visualizar e compreender como de fato os fenômenos aconteciam.

6.4 Atividades Experimentais

A aula experimental foi a última parte da aplicação deste projeto, e a parte mais inovadora do mesmo, pois permitiu aos alunos ter um contato real com os fenômenos estudados, fazer aplicação do fenômeno da difração para calcular o comprimento de onda do laser e ver em tempo real as variações de luminosidade na varredura de variados padrões de difração/interferência.

Inicialmente foi feito uma breve explanação sobre a placa Arduino, e sua grande versatilidade, que lhe permite ser aplicado a infinitas possibilidades de projetos. Foi realizado uma explicação sobre o equipamento que seria utilizado, mostrando o código de programa Arduino para que eles entendessem a lógica de programação envolvida no processo. Mostramos também o Script do programa em Python que através da biblioteca Pyserial, "capturaria" os dados do Arduino e produziria os gráficos para melhor observar os resultados do experimento. Foi entregue um pequeno roteiro experimental com os procedimentos e medidas que deveriam ser realizados nos experimentos, o mesmo se encontra no Apêndice C.

O primeiro experimento realizado foi a determinação do comprimento de onda do laser que estava sendo utilizado. Para isso, fizemos o laser passar pela fenda simples de 0,1 mm, em seguida foi medido com uma trena as distâncias entre o laser e a fenda (tínhamos colocado exatamente a 2 m para facilitar as contas, e o espaço que tínhamos também não permitia maiores distâncias), e entre o centro da franja luminosa central até a primeira franja escura (que mediu 1,2 cm). Assim, foi utilizada a equação 3.20, que permite a determinação da posição dos pontos de mínima intensidade no caso da difração por uma fenda simples. Com as

distâncias medidas foi feito no quadro com os alunos o cálculo do seno do ângulo θ da equação mencionada acima (que deu aproximadamente 0,006), e multiplicando esse valor pela largura a da fenda, chegamos ao resultado de aproximadamente $600nm$ para o comprimento de onda do laser. O resultado é plausível, pois está no limite da faixa de valores descrito pelo fabricante, que é de 600 a 700 nm.

Em seguida, foi feito o segundo experimento, cujo objetivo foi determinar os padrões de difração de fraunhofer através de medições automáticas das intensidades luminosas das figuras de difração/interferência de uma fenda simples e de uma dupla fenda, e visualização em tempo real dos dados e gráficos produzidos através do programa feito em Python. Assim, novamente foi feito passar o laser, primeiramente, pela fenda simples de largura 0,1 mm, e posteriormente por um par de fendas idênticas de largura 0,2 mm e distância entre as fendas também de 0,2 mm. Com a ajuda de alguns objetos, conseguiu-se alinhar os padrões formados com a altura do sensor LDR (que como já mencionado, faz a detecção da luminosidade), tendo cuidado para que todos os pontos do padrão incidissem sobre o sensor quando este estivesse em movimento. A Fig. 29 mostra o momento de uma das medições com o gráfico de distância x intensidade sendo construído em tempo real.

Os gráficos produzidos reproduziram bem os fenômenos estudados, e estão de acordo com o esperado. No entanto, não era possível obter a mesma qualidade dos gráficos apresentados no capítulo anterior, visto que aqueles, foram produzidos em um laboratório totalmente escuro, as distâncias envolvidas eram maiores e em condições que permitiam maior número de repetições para que pudéssemos obter os melhores resultados, isso foi mencionado aos alunos.

Contudo, os discentes ficaram maravilhados com o equipamento utilizado, sobretudo a placa Arduino, e como era possível controlar os equipamentos com pequenos scripts de programas. Assim, os resultados da aplicação de todo o projeto pode ser considerado muito positivo, e pode-se afirmar que o equipamento construído, aliado a outras ferramentas, como descrito na sequência didática aqui apresentada, pode contribuir para o ensino-aprendizagem de óptica ondulatória.



Figura 29 – Gráfico sendo construído em tempo real na execução do experimento
Fonte: Os autores

7 Considerações Finais

O principal objetivo deste trabalho foi a produção de um produto educacional inovador, que oferecesse uma alternativa para a melhor inserção e exploração dos conteúdos de óptica ondulatória no ensino Médio (podendo também ser utilizado no Ensino Superior), visto que esses são porta de entrada para a Física Moderna. Assim, foi apresentado um sistema de aquisição automática de dados para atividades experimentais, que pelos resultados produzidos, se mostrou de alta qualidade; com a utilização da placa de prototipagem Arduino-UNO, e a utilização de softwares completamente livres.

Além do manual de montagem do equipamento e a disponibilização dos scripts dos softwares utilizados, foi apresentado uma alternativa de sequência didática para aplicação do produto, construída em várias etapas e com a utilização de variadas ferramentas; como o uso da história e filosofia da ciência, apresentação de vídeo, simulação computacional e atividades experimentais. Os planejamentos das atividades apresentadas nortearam-se pela Teoria da aprendizagem Significativa de Ausubel, buscando despertar no aluno o interesse e o esforço para aprendizagem significativa, visando inserir os conteúdos em uma perspectiva que tenta contemplar os anseios dos alunos por um ensino mais condizente com a realidade tecnológica que vivem, permitindo aos mesmos perceberem a utilização de computadores, sensores, motor, para realização de tarefas que antes não se via na escola (como a utilização de programação para construção de gráficos), passando a mensagem que o estudo de ciências pode ser mesclado com a utilização de tecnologias modernas.

Buscou-se passar os conteúdos de forma progressiva e participativa, com ampla liberdade para discussões, e fazendo a ligação com os conteúdos já estudados, aproveitando assim, o conhecimento prévio dos alunos para construção de novos conceitos e a diferenciação progressiva dos mesmos, permitindo-os, no caso, obter um conhecimento mais abrangente sobre as ondas, sobretudo acerca dos fenômenos de difração e interferência. A aceitação dos alunos no método utilizado, seus relatos de melhor compreensão do conteúdo em relação a uma aula apenas com a utilização da lousa, indicam que os experimentos de aquisição de dados, mesclados com outras metodologias mais interativas, podem contribuir para melhores resultados no que se refere ao aprendizado de Física, e permitem uma melhor contextualização do assunto abordado.

Sobre a execução dos experimentos, pode-se afirmar que o Arduino, juntamente com o motor de passos e o sensor LDR, foi uma opção viável e de boa qualidade para aquisição de dados de fenômenos de difração e interferência. O aparato construído, mostra-se uma ferramenta com enorme potencial para aplicação na experimentação em Física, oferecendo muitas possibilidades para esse fim.

Uma comparação dos resultados obtidos no experimento construído com outros produtos

comerciais, mostram que os dados e gráficos obtidos com o Arduino e Python possuem qualidade análogo ou superior a esses produtos. E diferente dos Kits comercializados no mercado, o Arduino possui hardware e software totalmente livres, pode ser utilizado com um grande número de sensores e permite sua adaptação para finalidades diversas e o seu aprimoramento constante, o que fez crescer significativamente o número de trabalhos com essa ferramenta nos últimos anos. Assim, os autores tem perspectivas de melhorias e novos trabalhos na mesma área.

Na execução dos experimentos, pode-se também concluir que são vários os fatores que podem influenciar nos resultados. Um fator que pode ser melhorado e possibilitará medidas mais precisas neste tipo de experimento, são as dimensões do sensor utilizado. O sensor LDR tem 5mm de largura, e portanto, a medida que as franjas tornam-se mais próximas (como em experimentos de muitas fendas, por exemplos), percebe-se em alguma medida a sobreposição de pontos de intensidades diferentes, o que impossibilita uma boa análise.

Por fim, espera-se que este trabalho contribua para as discussões acerca da inserção de tecnologias no ensino de Física, e que seja mais uma opção para montagem de laboratórios didáticos com qualidade e de baixo custo. Acreditamos que o incentivo à instrumentação científica deve ser sempre buscado, e a produção de equipamentos desta natureza seja cada vez mais viável.

Referências

- 1 SOUSA, D. L. d. S.; CARVALHO, D. C.; MARQUES, E. S. A. O uso de recursos tecnológicos em sala de aula: relato envolvendo experiências do pibid do curso de pedagogia da ufpi. *Fórum Internacional de Pedagogia*, v. 4, 2012. Citado na página 17.
- 2 GOMES, L. M. J. B. Ensinando as leis de newton por meio de recursos midiáticos e de recursos experimentais. *Revista Amazônica de Ensino de Ciências*, v. 1984, p. 7505, 2017. Citado na página 17.
- 3 PINTO, C. S.; DEGASPERI, F. T. Desenvolvimento de uma interface para aquisição de dados experimentais utilizando o microcontrolador arduino uno. *Workshop de pós-graduação e pesquisa do Paulo Souza*, v. 10, p. 313–322, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 22.
- 4 WHAT IS ARDUINO?. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 14 nov. 2018. Citado na página 18.
- 5 CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com arduino para iniciantes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 33, n. 4, p. 4503–4503, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 18, 21 e 22.
- 6 MCROBERTS, M. *Arduino básico*. [S.l.]: Novatec Editora, 2ªed, 2015. Citado na página 18.
- 7 TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros: Eletricidade e magnetismo, óptica*. vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 18, 68 e 69.
- 8 FETZNER, G. *Experimentos de baixo custo para o ensino de física em nível médio usando a placa Arduino-UNO*. 206 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Citado na página 21.
- 9 DRÖSE, B. *Aprendizagem de conceitos físicos relacionados com circuitos elétricos em regime de corrente alternada com uso da placa Arduino*. 158 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Citado na página 21.
- 10 CARDOSO, H. C. et al. Novas tecnologias no ensino de física: a construção de um termômetro utilizando microcontroladores. *Seminário de Pesquisa, Extensão e Inovação do IFSC*, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), v. 4, 2014. Citado na página 22.
- 11 SILVEIRA, S.; GIRARDI, M. Desenvolvimento de um kit experimental com arduino para o ensino de física moderna no ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 39, n. 4, 2017. Citado na página 22.
- 12 SANTOS, E. M. F. *Arduino: uma ferramenta para aquisição de dados, controle e automação de experimentos de óptica em laboratório didático de física no ensino médio*. 192 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Citado na página 22.

- 13 CASTRO, L. H. M. *O uso do Arduino e do Processing no ensino de Física*. 165 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Citado na página 22.
- 14 RODRIGUES, R. F. *Arduino como uma ferramenta mediadora no ensino de física*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Citado na página 22.
- 15 VAZZI, M. R. G. *O Arduíno e a Aprendizagem de Física: um kit robótico para abordar conceitos e princípios do Movimento Uniforme*. 150 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Araraquara, 2017. Citado na página 22.
- 16 RUBIM, J. R. *Microcontrolador Arduino no ensino de física: proposta e aplicação de uma situação de aprendizagem sobre o tema luz e cor*. 150 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014. Citado na página 22.
- 17 CARVALHO, R. V. *Produto educacional: O emprego de um sensor ultrassônico para medidas posição versus tempo de um sistema massa-mola*. 77 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Mato Grosso, Barra do Garças, 2017. Citado na página 22.
- 18 MARTINAZZO, C. A. et al. *Arduino: Uma tecnologia no ensino de física*. 2014. 10 p. Citado na página 22.
- 19 COSTA, L. G.; BARROS, M. A. O ensino da física no brasil: problemas e desafios. *Congresso Nacional de Educação*, v. 12, 2015. Citado na página 24.
- 20 MOREIRA, M. A. Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea. *Conferência proferida na XI Conferência Interamericana sobre Enseñanza de la Física, Guayaquil, Equador*, p. 12, 2013. Citado na página 25.
- 21 BRASIL. Parâmetros curriculares nacionais: Ensino médio. *Brasília: Ministério da Educação*, p. 538–545, 1999. Citado na página 25.
- 22 RODRIGUES, C. A. F.; SOBRINHO, J. A. C. M. O ensino de física na escola média: tendências contemporâneas. *III Encontro de pesquisa em educação da UFPI. Teresina: EDUFPI*, p. 12, 2004. Citado na página 25.
- 23 BRASIL. Pcn+ ensino médio: Orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais. *Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC, SEMTEC*, 2002. Citado na página 25.
- 24 MERCADO, L. P. L. Formação docente e novas tecnologias. *IV Congresso RIBIE, Brasília*, 1998. Citado na página 25.
- 25 O ensino da Física pela experimentação. Citado na página 26.
- 26 ARAÚJO, M. S. T.; ABIB, M. L. V. S. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. *Revista Brasileira de Ensino de Física, SciELO Brasil*, v. 25, n. 2, p. 176–194, 2003. Citado na página 26.
- 27 BATISTA, M. C.; FUSINATO, P. A.; BLINI, R. B. Reflexões sobre a importância da experimentação no ensino de física. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, Universidade Estadual de Maringá, v. 31, n. 1, p. 43–49, 2009. Citado na página 26.

- 28 MATEUS, A. E.; SANTOS, M. G.; ATAIDE, A. R. P. As atividades experimentais na formação do professor: a visão dos estudantes de licenciatura em física. *II Congresso Nacional de Educação-CONEDU*, p. 12, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- 29 RODRIGUES, J. J. V. Experimentação no ensino e aprendizagem de física. *Revista Educação pública*, p. 5, 2018. Citado na página 26.
- 30 SILVA, S. C. R.; SCHIRLO, A. C. Teoria da aprendizagem significativa de ausubel: Reflexões para o ensino de física ante a nova realidade social. *Imagens da Educação*, v. 4, n. 1, p. 36–42, 2014. Citado na página 27.
- 31 MOREIRA, M. A. A teoria de aprendizagem de david ausubel como sistema de referência para a organização de conteúdo de física. *Revista Brasileira de Física*, v. 9, n. 1, p. 275–292, 1979. Citado na página 27.
- 32 MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. [S.l.]: Editora pedagógica e universitária São Paulo, 1999. v. 2. Citado na página 28.
- 33 MOREIRA, M. A. *A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula*. [S.l.]: Editora Universidade de Brasília, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- 34 PSICOLOGIA educacional: uma visão cognitiva. [S.l.]: holt, rinehart e Winston New York, 1968. Citado na página 28.
- 35 BASSALO, J. M. F. A crônica da ótica clássica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 3, n. 3, p. 138–159, 1986. Citado 5 vezes nas páginas 29, 30, 31, 32 e 33.
- 36 BÍBLIA, S. Antigo testamento. *Gênesis*, v. 1, n. 3, 1995. Citado na página 29.
- 37 FORATO, T. C. d. M. *A natureza da ciência como saber escolar: um estudo de caso a partir da história da luz. vol. 2*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 30, 31, 32, 34 e 35.
- 38 ROCHA, J. F. *Origens e evolução das idéias da física*. [S.l.]: SciELO-EDUFBA, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 37.
- 39 VOHNSEN, B. A short history of optics. *Physica Scripta*, IOP Publishing, v. 2004, n. 109, p. 75, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.
- 40 BEECH, M. *The physics of invisibility: a story of light and deception*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. Citado na página 31.
- 41 SILVA, B. V. C. *Controvérsias sobre a natureza da luz: uma aplicação didática*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Citado na página 32.
- 42 MARTINS, R. A. *Teoria da relatividade especial*. [S.l.]: GHTC, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 32, 35 e 38.
- 43 GLEISER, M. *A dança do universo: dos mitos de criação ao big-bang*. [S.l.]: Companhia das Letras, 2006. Citado na página 32.

- 44 BASSALO, J. M. F. A crônica da ótica clássica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 4, n. 3, p. 140–150, 1987. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.
- 45 SILVA, F. W. O. C. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 29, n. 1, p. 149–159, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 33, 34, 35 e 36.
- 46 KRAPAS, S.; QUEIROZ, G. R. P. C.; UZÊDA, D. O tratado sobre a luz de huygens: comentários. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 28, n. 1, p. 123–151, 2011. Citado na página 34.
- 47 SILVA, C. C.; MOURA, B. A. A natureza da ciência por meio do estudo de episódios históricos: o caso da popularização da óptica newtoniana. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, p. 1602, 2008. Citado na página 35.
- 48 SILVA, B. V. C. Young fez realmente o experimento da fenda dupla? *Latin-American Journal of Physics Education*, Instituto Politécnico Nacional, v. 3, n. 2, p. 16, 2009. Citado na página 35.
- 49 HECHT, E. *Optics*. 5. ed. [S.l.]: Pearson, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 35, 39, 40, 53, 68 e 69.
- 50 FÍSICA MODERNA: INTERFERÊNCIA E DIFRAÇÃO DA LUZ. Disponível em: <<https://alemdainercia.wordpress.com/2016/02/16/fisica-moderna-interferencia-e-difracao-de-luz/>>. Acesso em: 10 out. 2018. Citado na página 36.
- 51 BASSALO, J. M. F. A crônica da ótica clássica (parte iii: 1981-1905). *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 6, n. 1, p. 37–58, 1989. Citado na página 36.
- 52 BASSALO, J. M. F. Fresnel: O formulador matemático da teoria ondulatória da luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 5, n. 2, p. 79–87, 1988. Citado na página 37.
- 53 LINHAS de fluxo de energia e o ponto de Poisson - Arago. *American Journal of Physics*, v. 78, n. 6. Citado na página 37.
- 54 BRENNAN, R. P. *Gigantes da Física: uma história da Física Moderna através de oito biografias*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2003. Citado na página 38.
- 55 HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física*, v. 4 *Optica e Física Moderna*. Rio de Janeiro: Editora SA, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 39, 40, 42, 68 e 69.
- 56 NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica*, v. 4 *Optica e Física Moderna*. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 40, 68 e 69.
- 57 HUYGENS'S PRINCIPLE. Disponível em: <<http://www.ipodphysics.com/huygen-principle.php>>. Acesso em: 10 out. 2018. Citado na página 41.
- 58 KAPOOR, R. *INTERFERENCE*. Disponível em: <<http://www.rakeshkapoor.us/ClassNotes/classnotes.php?notes=Interference&index=2>>. Acesso em: 10 mar. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 49.

- 59 SERWAY, R. A. *Física 3: Eletricidade, Magnetismo e Ótica*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. Citado na página 43.
- 60 DAVIS, C. L. *Single Slit Diffraction*. Disponível em: <http://www.physics.louisville.edu/cldavis/phys299/notes/lo_ssdiffraction.html>. Acesso em: 30 nov. 2018. Citado na página 51.
- 61 HYPERPHYSICS. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>>. Acesso em: 10 mar. 2019. Citado 3 vezes nas páginas 53, 54 e 55.
- 62 FUSO DE ROSCA TRAPEZOIDAL. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC043/Prof.Walter_Kapp/Pr%E1tica%20de%20projeto/cat%E1logos/fusos/fuso-de-rosca-trapezoidal-004.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018. Citado na página 58.
- 63 GOMES, P. M. *Experimentos de Óptica – Com ênfase na Física Contemporânea e Ondulatória*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2018. Citado na página 58.
- 64 INTERFERÊNCIA DE ONDAS. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-interference>. Acesso em: 20 nov. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 73.
- 65 EXPERIMENTOS DE ONDAS. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=I2JfCTFwfTc>>. Acesso em: 20 nov. 2018. Citado na página 73.
- 66 CONTROLE DE MOTOR DE PASSOS COM A PONTE H L298N. Disponível em: <<https://www.arduinoecia.com.br/2014/08/ponte-h-l298n-motor-de-passo.html>>. Acesso em: 02 fev. 2018. Citado na página 87.
- 67 MACIEL, A. *Difração da luz: fenda simples*. Disponível em: <<https://alexandremaciel.wordpress.com/ensino/protocolos-das-praticas-experimentais/oti02-difracao-da-luz-fenda-simples/>>. Acesso em: 20 nov. 2018. Citado na página 93.

Apêndices

APÊNDICE A – Programas e Circuitos

A.1 Programa Arduino

//PROGRAMA ARDUINO PARA MEDIDAS DE INTENSIDADE LUMINOSA EM
FUNÇÃO DA DISTÂNCIA EM PADRÕES DE DIFRAÇÃO/INTERFERÊNCIA

//=====

#include <Stepper.h> //chama a biblioteca Stepper

const int stepsPerRevolution = 200; //ajusta o número de passos por revolução, de acordo
com o motor utilizado

Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8, 9, 10, 11); // inicializa a biblioteca Stepper nos
pinos de 8 a 11

//=====

void setup() // Inicia aqui a parte de configuração que será executado uma única vez

{

myStepper.setSpeed(10); //define a velocidade do motor em 10 rpm:

Serial.begin(9600); // inicializa a porta serial

} //Finaliza a parte de configuração

//=====

void loop() // coloque aqui seu código principal, esta parte irá rodar repetidamente

{

delay(20000); //faz o programa dar uma pausa de 20.000 ms

myStepper.setSpeed(10);

int i=0; // esta variável i marcará a distância percorrida

while (i<300) //Determina o número de medidas a serem executadas

{

int sensorLDR = analogRead(A0); // ler os dados de entrada do sensor LDR na porta A0

int luminosidade = 1023-sensorLDR;

Serial.print(i); // imprime o valor de i na serial

Serial.print (" , "); // imprime a virgula que separa a variável na impressão dos dados

```

Serial.println(luminosidade); // imprime o valor da luminosidade
myStepper.step(stepsPerRevolution*0.25); //faz o motor girar 1/4 de revolução, o conjunto
anda portanto 2mm
i=i+2; //o valor de i receberá o incremento de 2 mm para proxima medida.
}

// Essa parte faz o motor girar em sentido contrário e voltar automaticamente a posição inicial
para novas medidas

delay (10000);
myStepper.setSpeed(30); // define nova velocidade de 30 rpm para o motor
myStepper.step(-stepsPerRevolution*31); // O motor gira no sentido contrário fazendo o
conjunto voltar a posição inicial
delay(20000); //espera de 20000 ms

} //end loop
//=====

```

A.2 Modelo de programa em python para geração de gráficos tendo salvo um arquivo txt com os pontos

```

#Programa para gerar os gráficos dos padrões de interferência/difração obtidos#

import matplotlib.pyplot as plt #importa a biblioteca matplotlib
import numpy as np #importa a biblioteca numpy

x, y = np.loadtxt('nomedoarquivo.txt', delimiter= ',', unpack=True) #define (x, y) como os
pontos contidos no arquivo

plt.plot(x,y,'ro', label='Pontos Experimentais') #plota os pontos experimentais
plt.plot(x,y, label='Modelo Teórico Aproximado') #plota a curva que liga os pontos

plt.xlabel('distância em mm') #nomeia o eixo x
plt.ylabel('Intensidade luminosa') #nomeia o eixo y
plt.title('Intensidade em função da distância') #nomeia o gráfico

plt.legend() #para que apareça as legendas definidas nas plotagens

```

plt.show() #para que o programa mostre o gráfico

A.3 Esquema de ligação do Módulo sensor LDR e do Motor de passos

A ligação do módulo sensor LDR é simples e é feita com a conexão do mesmo diretamente na placa Arduino (com a utilização da protoboard). Com o sensor acoplado à protoboard, faça as ligações apresentadas na Fig. 30.

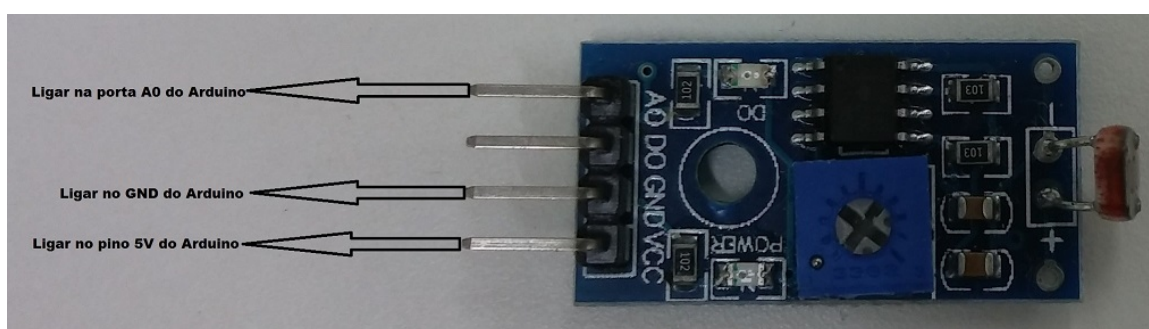


Figura 30 – Esquema de ligação do Módulo sensor LDR

A ligação do motor de passos é feita com o auxílio do Driver motor ponte H, e sua alimentação não pode ser feita diretamente pela placa Arduino, pois esta não consegue fornecer a potência que o motor precisa. Assim, para alimentação do conjunto, são utilizadas baterias ou mesmo fontes de alimentação. O esquema de ligação está disposto na Fig. 31. Veja que os bornes IN1, IN2, IN3 e IN4 do Driver ponte H estão conectados nas entradas digitais 8, 9, 10 e 11 da placa Arduino, respectivamente.

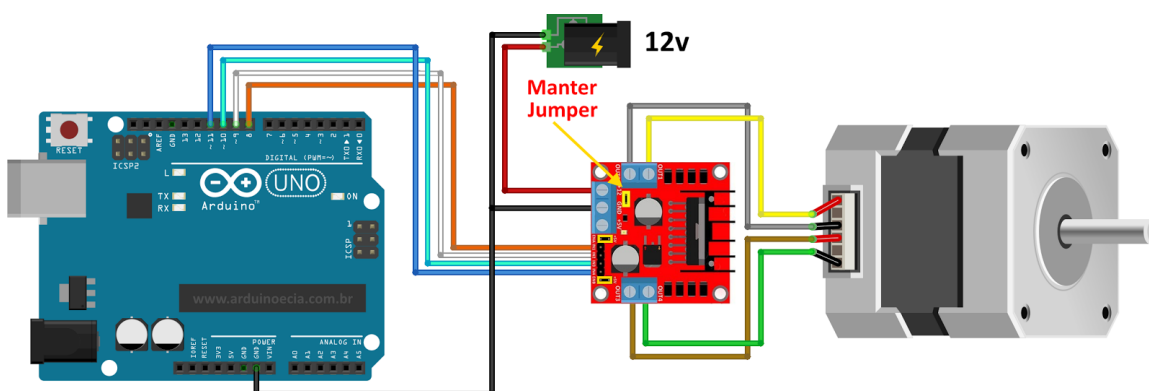


Figura 31 – Esquema de ligação do motor de passos com o Driver motor ponte H
Fonte:(66)

APÊNDICE B – Alguns Scripts de programas utilizados na oficina de Python

B.1 Gráfico elementar

```
#Gráfico elementar#  
  
import numpy as np #Importa a biblioteca numpy  
import matplotlib.pyplot as plt #Importa a biblioteca matplotlib  
  
x = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] #Define os valores de x  
y = [1, 4, 9, 16, 25, 36, 49] #Define os valores de y  
  
plt.plot(x, y) #plota o gráfico com os pontos (x, y)  
  
plt.show() #para o programa mostrar o gráfico
```

B.2 Mudança no estilo de gráfico plotado

```
#Mudança no estilo de gráfico plotado#  
  
import numpy as np #Importa a biblioteca numpy  
import matplotlib.pyplot as plt #Importa a biblioteca matplotlib  
  
x = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] #Define os valores de x  
y = [1, 4, 9, 16, 25, 36, 49] #Define os valores de y  
  
plt.plot(x, y, 'ro') #plota o gráfico com os pontos (x, y) no padrão 'ro'  
plt.show() #para mostrar o gráfico
```

B.3 Colocando nome no gráfico, nos eixos, e definindo limites

```
#Colocando nome no gráfico,nos eixos, e definindo limites#  
  
import numpy as np #Importa a biblioteca numpy
```

```
import matplotlib.pyplot as plt #Importa a biblioteca matplotlib

x = [1, 2, 3, 4, 5] #Define os valores de x
y = [1, 4, 9, 16, 25] #Define os valores de y

plt.plot (x, y, 'ro') #plota o gráfico com os pontos (x, y) no padrão 'ro'

plt.title('gráfico de y vs. x') #define o título do gráfico
plt.xlabel ('x axis') #define o nome do eixo x
plt.ylabel ('y axis') #define o nome do eixo y

plt.xlim (0.0, 7.0) #define o intervalo de valores para o eixo x
plt.ylim (0.0, 30.0) #define o intervalo de valores para o eixo y

plt.show() #pede para o programa mostrar o gráfico
```

B.4 Plotando dois gráficos no mesmo sistema de eixos

```
#plotando dois gráficos no mesmo sistema de eixos#

import numpy as np #Importa a biblioteca numpy
import matplotlib.pyplot as plt #Importa a biblioteca matplotlib

x1 = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] #Define os valores de x1
y1 = [1, 4, 9, 16, 25, 36, 49] #Define os valores de y1

x2 = [1, 2, 4, 6, 8, 10, 12] #Define os valores de x2
y2 = [2, 4, 8, 12, 16, 20, 24] #Define os valores de y2

plt.plot (x1, y1, 'r') #plota o gráfico com os pontos (x1, y1) no padrão 'r'
plt.plot (x2, y2, 'g') #plota o gráfico com os pontos (x2, y2) no padrão 'g'

plt.title('gráficos de y vs. x') #define o título do gráfico
plt.xlabel ('x axis') #define o nome do eixo x
plt.ylabel ('y axis') #define o nome do eixo y

plt.xlim (0.0, 9.0) #define o intervalo de valores para o eixo x
plt.ylim (0.0, 30.0) #define o intervalo de valores para o eixo y
```

```
plt.show() #pede para o programa mostrar o gráfico
```

B.5 Leitura de um arquivo de dados e legenda

```
#Leitura de um arquivo de dados e legenda#

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

x, y = np.loadtxt('dados.txt', delimiter=',', unpack=True) #define os pontos (x, y) como
sendo os pontos contidos no arquivo 'dados.txt'

plt.plot(x,y, label='grafico de experimento') #plota o gráfico com os pontos (x, y) defi-
nidos anteriormente, com a legenda 'grafico de experimento'

plt.xlabel('eixo x')
plt.ylabel('eixo y')
plt.title('grafico de x vs y')

plt.legend() #comando necessário para que a legenda apareça no gráfico
plt.show()
```

B.6 Gráfico de funções

```
#grafico de funções#

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

x = np.linspace(0.0, 5.0, 1000) #Define 1000 valores de x no intervalo de 0 a 5
y = 1 + np.sin(2 * np.pi * x) #Define a função y(x)

plt.plot(x, y) #plota o gráfico com os pontos (x, y(x))

plt.title('gráficos de y vs. x')
plt.xlabel('x axis')
plt.ylabel('y axis')
```

`plt.show()`

APÊNDICE C – Roteiro utilizado na aplicação dos experimentos

ROTEIRO EXPERIMENTAL

C.1 Experimento 1: Medindo o comprimento de onda de um laser

OBJETIVOS

- Observar o padrão de difração de um laser ao passar por uma fenda simples;
- Utilizar o fenômeno da difração por uma fenda para calcular o comprimento de onda de um laser.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Um laser;
- Uma fenda simples de largura conhecida;
- Um anteparo de cor clara (de preferência branco);
- Uma trena.

PROCEDIMENTOS

- Fixe bem o laser apontando-o para a fenda simples;
- Fixe a fenda simples a uma distância de 10cm a 100cm do laser, tomando cuidado para que ela fique em uma posição perpendicular ao mesmo;
- Coloque o anteparo a uma distância de 2 a 3m da fenda, para que o laser tendo passado pela fenda, incida sobre ele;
- Ligue o laser e faça passar o feixe luminoso pela fenda simples;
- Descreva o que você consegue observar no anteparo;

F

- Sabendo que a posição das franjas escuras para difração da luz por uma fenda simples é dada pela equação [C.1](#),

$$a \sin \theta = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots (\text{franjas escuras}) \quad (\text{C.1})$$

Onde,

a é a largura da fenda;

θ é o ângulo entre a linha que liga a fenda ao centro da franja central e a linha que liga a fenda às franjas escuras;

m é a numeração da franja escura que se está analisando, ou seja, para $m = 1$ tem-se a primeira franja escura, para $m = 2$ tem-se a segunda franja escura, e assim sucessivamente;

λ é o comprimento de onda do laser utilizado;

- Faça o cálculo do comprimento de onda do laser que você está utilizando para pelo menos a primeira e a segunda franja escura ($m = 1$ e $m = 2$). (Dica: para calcular o seno do ângulo θ , utilize a trena para medir as distâncias necessárias). Veja a Fig. 32

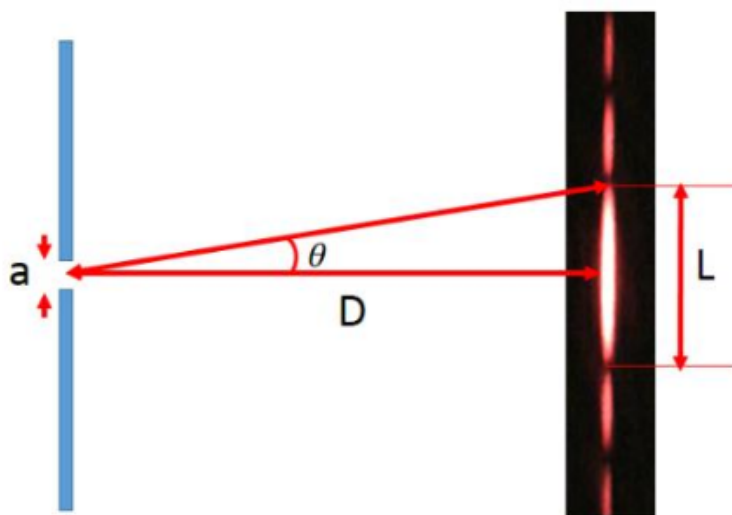


Figura 32 – Diagrama esquemático da difração por uma fenda simples

Fonte: (67)

C.2 Experimento 2: A distribuição de intensidades em padrões de difração em fendas simples e fendas duplas

OBJETIVOS

- Reconhecer as distribuições de intensidades de padrões de difração de fendas simples e fendas duplas;
- Entender alguns parâmetros que influenciam nestas distribuições.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Um laser;
- Uma grade com 3 fendas simples com larguras de: 0,1mm, 0,2mm e 0,3mm;
- Uma grade com 3 fendas duplas com larguras das fendas 0,2mm e distâncias entre as fendas de: 0,2mm, 0,4mm e 0,6mm;
- Um anteparo de cor clara (de preferência branco);
- Um equipamento para medições de intensidade luminosa composto por: Placa Arduino, motor de passos, sensor LDR, fuso de rosca trapezoidal, protoboard.
- Um computador.

PROCEDIMENTOS

- Fixe bem o laser apontando-o para a grade com as fendas;
- Fixe a grade com as fenda simples a uma distância de 10cm a 100cm do laser, tomando cuidado para que ela fique em uma posição perpendicular ao mesmo;
- Coloque o equipamento para medições de intensidade luminosa a uma distância de 2 a 3m da fenda;
- Ligue o laser e faça passar o feixe luminoso pela fenda simples de 0,1mm, utilize o anteparo para verificar se o padrão de difração formada está nítido e simétrico;
- Ajuste a altura do equipamento de forma que o sensor LDR ao percorrer o padrão de difração formado, passe por todas as franjas do mesmo;
- Verifique se o conjunto com o sensor LDR está no início do fuso, e o sensor no início do padrão difrativo a ser medido; - Ligue a placa Arduino do equipamento ao computador;
- Execute o programa Python para visualização dos dados e gráficos de posição x intensidade obtidos no experimento;
- Repita as medições para as outras fendas simples e para as fendas duplas.
- Diante dos gráficos obtidos, o que você pode afirmar sobre as intensidades na difração da luz por uma fenda simples? Em que a largura da fenda influenciou os resultados?

- Sobre as intensidade na difração da luz por fendas duplas, quais as diferenças e semelhanças em relação aos resultados obtidos nas fendas simples? Em que a distância entre as fendas influenciou os resultados?

- Observando as diferenças entre os resultados obtidos com as fendas simples e com as fendas duplas, o que você poderia afirmar sobre a difração com 3 ou mais fendas?

APÊNDICE D – PRODUTO EDUCACIONAL



MANUAL DE MONTAGEM E UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA EXPERIMENTOS DE DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA COM O MICROCONTROLADOR ARDUINO E PYTHON

Marcelo dos Santos Rôxo

Produto Educacional apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadores:

Dr. Luís Antônio Cabral

Dr. Nilo M. Sotomayor Choque (coorientador)

Araguaína, TO

Abril de 2019

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela dádiva da vida, pela saúde e condição para concluir mais esta importante etapa.

À toda minha família, pelas palavras de motivação e esperança, que fizeram sempre toda diferença neste e em todos os desafios que a vida nos impõe. Em especial, à minha querida filha Lara Sophia Rôxo, que nasceu durante toda essa "confusão" e correria.

Ao professor Luís Antônio Cabral, orientador e grande mestre, pelos valiosos conselhos, direcionamentos, explicações, instigações e incentivo.

À todos os professores do colegiado de Física da Universidade Federal do Tocantins - Campus Araguaína, pelos ensinamentos, dedicação e disposição que imprimem neste curso. Em especial ao professor Nilo Maurício Sotomayor Choque, nosso coorientador, pelas valiosas ideias e dicas que contribuiu para o aperfeiçoamento do trabalho.

À estrutura do MNPEF-SBF que nos permitiu ter esta oportunidade.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“Ninguém comete erro maior do que não
fazer nada porque só pode fazer um pouco.”*
Edmund Burke

Lista de ilustrações

Figura 1 – Características das placas Arduino Uno, Duemilanove e Mega	11
Figura 2 – Página Inicial do Arduino	12
Figura 3 – Esta página permite a escolha do sistema operacional de acordo com o computador a ser utilizado	12
Figura 4 – Escolha se quer apenas baixar o instalador ou contribuir com o projeto . . .	13
Figura 5 – Tela inicial da IDE do Arduino	14
Figura 6 – Botões verificar e carregar	15
Figura 7 – Página Inicial do Python	17
Figura 8 – Clique em executar para começar a instalação	17
Figura 9 – Tela para escolha do tipo de instalação que o usuário deseja realizar . . .	18
Figura 10 – Como abrir o prompt de comando	19
Figura 11 – Instalação da biblioteca Numpy	19
Figura 12 – Instalação da biblioteca Matplotlib	20
Figura 13 – Como abrir o IDLE	20
Figura 14 – Princípio de Huygens-Fresnel aplicado a uma fenda simples	23
Figura 15 – De (a) até (i), uma sucessão de padrões de difração por fenda única em distâncias decrescentes da fenda; Difração de Fraunhofer (campo distante) na figura (a), indo em direção à difração de Fresnel (campo próximo) nas figuras que seguem	24
Figura 16 – A luz monocromática incide em uma fenda S_0 que se comporta como fonte pontual. A luz difratada por S_0 chega às fendas S_1 e S_2 e é novamente difratada por estas. A sobreposição das ondas luminosas das duas fendas chegam à tela de observação e formam um padrão de interferência com franjas claras e escuras	25
Figura 17 – A interferência das ondas que saem das fendas S_1 e S_2 é causada pela mudança na diferença de fase devido à diferença de caminho $r_2 - r_1$	25
Figura 18 – Padrão de interferência da luz por fenda dupla	30
Figura 19 – Os raios r_1 e r_2 sofrem interferência destrutiva no ponto P_1	31
Figura 20 – A largura a da fenda é dividida em N partes, fazendo $N \rightarrow \infty$, dx passa ser a variação infinitesimal entre dois pontos consecutivos.	33
Figura 21 – Padrão de difração da luz por uma fenda simples	35
Figura 22 – Padrão de difração da luz por dupla-fenda, com difentes larguras a da fenda e distância d entre elas sendo mantida constante. Note que a medida que a largura da fenda diminui, a largura do “envelope” dos maximos centrais aumenta, e esses ficam em maior quantidade.	36
Figura 23 – Padrão de difração da luz por 3 fendas.	37

Figura 24 – Padrão de difração da luz por 5 fendas.	37
Figura 25 – Protótipo do experimento com utilização do Arduino Uno, Sensor LDR e trilho de impressora com motor de passos.	38
Figura 26 – Aparato experimental utilizado nas medidas.	41
Figura 27 – Demonstração do laser HeNe incidindo sobre a fenda para geração do padrão de difração	42
Figura 28 – Uma parte dos dados obtidos em um dos experimentos realizados	43
Figura 29 – Gráfico de simulação do experimento com fenda simples de largura 0,1 mm.	45
Figura 30 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,1 mm.	46
Figura 31 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,1	46
Figura 32 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,2 mm.	47
Figura 33 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,2	47
Figura 34 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,3 mm.	48
Figura 35 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,3	48
Figura 36 – Gráfico de experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,2 mm entre elas	49
Figura 37 – Padrão de difração gerado em experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,2 mm entre elas	49
Figura 38 – Gráfico de experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,4 mm entre elas.	50
Figura 39 – Padrão de difração gerado em experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,4 mm entre elas	50
Figura 40 – Esquema de ligação do Módulo sensor LDR	58
Figura 41 – Esquema de ligação do motor de passos com o Driver motor ponte H	58
Figura 42 – Diagrama esquemático da difração por uma fenda simples	60

Sumário

	Apresentação	8
1	A PLATAFORMA DE PROTOTIPAGEM ARDUINO	10
1.1	Estrutura do Arduino	10
1.2	Como instalar o ambiente de desenvolvimento (IDE) do Arduino	11
2	A LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON	16
2.1	Como instalar o Python no seu computador	16
2.1.1	Instalando as bibliotecas necessárias com o Pip	18
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
3.1	Interferência e Difração da luz	21
3.1.1	Interferência em Dupla Fenda	24
3.1.2	Difração: Fenda simples	30
3.1.3	Difração: Dupla Fenda	35
3.1.4	Difração: Fendas múltiplas	36
4	MATERIAIS E MONTAGEM DO EQUIPAMENTO	38
5	ALGUNS RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS COM O APARATO	44
5.1	Fenda simples	44
5.2	Fenda dupla	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICES	55
	APÊNDICE A – PROGRAMAS E CIRCUITOS	56
A.1	Programa Arduino	56
A.2	Modelo de programa em python para geração de gráficos tendo salvo um arquivo txt com os pontos	57
A.3	Esquema de ligação do Módulo sensor LDR e do Motor de passos	58

**APÊNDICE B – MODELO DE ROTEIRO EXPERIMENTAL PARA
UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO NO ENSINO**

	MÉDIO	59
B.1	Experimento 1: Medindo o comprimento de onda de um laser . . .	59
B.2	Experimento 2: A distribuição de intensidades em padrões de difração em fendas simples e fendas duplas	60

Apresentação

Prezado professor,

Este manual tem o intuito de guiá-lo na confecção e utilização de um aparato experimental construído para experimentos de aquisição de dados para o ensino de óptica ondulatória no Ensino Médio ou no Ensino Superior.

O aparato que apresentaremos permite a varredura das intensidades de luz de padrões de difração/interferência obtidos pela passagem de um feixe luminoso através de uma, duas ou mais fendas, podendo também serem utilizados pequenos obstáculos, como um fio de cabelo. A leitura é realizada através de um sensor de luminosidade LDR (Light Dependent Resistor ou Resistor Dependente de luz), e o movimento do sensor é controlado por um motor de passos, que faz o conjunto se mover através de um fuso trapezoidal, o que permite o usuário obter um conjunto de pontos com a localização e a respectiva luminosidade para cada um deles. Os dados produzidos são analisados através de uma rotina em linguagem Python, onde são gerados gráficos da intensidade em função da posição para visualização dos padrões obtidos.

O aparato experimental consiste: nos circuitos montados para interligação dos componentes; no programa em Arduino, que estabelece as configurações dos elementos utilizados, parâmetros experimentais e todos os comandos a serem executados pela placa; Placa Arduino, que faz o controle eletrônico, transformando em dados digitais as medições da variável física captada pelo sensor (que as transformam em pulsos elétricos), e o envio desses dados para o computador; O programa em Python para produção de elementos para análise dos dados; O motor de passos acoplado a um fuso de rosca trapezoidal, para permitir o movimento do conjunto com o controle do deslocamento provocado; e o sensor LDR, que retorna os dados de intensidade luminosa obtidos.

A utilização do Arduino e de uma linguagem de alto nível como o Python, garantem a confiabilidade e a qualidade dos resultados obtidos nos experimentos, e proporcionam um padrão de qualidade análogo ou superior aos equipamentos produzidos comercialmente para o mesmo fim. Além disso, os equipamentos de aquisição de dados disponíveis no mercado, são excessivamente caros, inacessíveis à maioria das escolas e até mesmo a algumas universidades. Possuem softwares fechados que não permitem qualquer mudanças ou aperfeiçoamentos, o professor não tem, portanto, acesso ao código fonte, o que impossibilita alterações para atender outras necessidades mais específicas que possam surgir.

No capítulo 1 deste manual apresentaremos brevemente a plataforma Arduino e como

instalar o ambiente de desenvolvimento do Arduino (IDE) no seu computador. No capítulo 2 faremos uma breve explicação sobre a linguagem Python, como instalá-lo no computador, e incorporá-lo com as bibliotecas necessárias. No Capítulo 3 são apresentados os fundamentos teóricos necessários sobre os fenômenos de interferência e difração da luz, com os conceitos e equações necessários para compreensão e aplicação do experimento no Ensino Médio ou no Ensino Superior (o conteúdo passado aos alunos deve ser adaptado de acordo com o nível de ensino, série e turma). No Capítulo 4 apresentamos os materiais, a montagem, circuitos e softwares utilizados. No Capítulo 5 são mostrados alguns dos resultados obtidos com o equipamento, e são feitas algumas considerações sobre esses resultados, considerando sempre os modelos teóricos apresentados no Capítulo 3. Em seguida, apresentamos as referências utilizadas no trabalho e os apêndices.

1 A plataforma de prototipagem Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar. Placas Arduino são capazes de ler variáveis de entrada - luz em um sensor, o apertar de um botão ou uma mensagem no Twitter - e transformá-la em uma saída - ativando um motor, ligando um LED, publicando algo online. Você pode dizer à sua placa o que fazer enviando um conjunto de instruções para o microcontrolador na placa [1]. Assim, “a possibilidade de escrever e ler em portas digitais do Arduino abre uma infinidade de aplicações para a experimentação em física” [2], engenharia e qualquer área que se queira.

O projeto foi criado em 2005 no Interaction Design Institute Ivrea situado na cidade de Ivrea, Itália. O grupo de pesquisadores responsáveis pela plataforma foram Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis. Os estudantes do instituto inicialmente utilizaram sistemas de prototipagem com altos custos. Como alternativa, surgiu o Arduino, nome oriundo de um bar em Ivrea, onde alguns dos fundadores do projeto costumam se encontrar [3].

A intenção do projeto era a criação de um dispositivo com custo acessível e fácil manuseio, possível de ser utilizado por estudantes e projetistas amadores. No projeto, foi adotado o conceito de hardware livre, o que significa que qualquer um pode montar, modificar, melhorar e personalizar o Arduino, partindo do mesmo hardware básico [4].

1.1 Estrutura do Arduino

O uso do Arduino é praticamente infinito. A plataforma pode ser utilizada na automação de uma residência, carro, escritório, um novo brinquedo, um novo equipamento ou no melhoramento de algum equipamento já existente. Todas essas possibilidades são possíveis pelos inúmeros sensores e componentes que podem ser utilizados nos mais diversos projetos. Em sua maioria, o material a ser utilizado está disponível em módulos, que se resumem em pequenas placas que possui os sensores e outros componentes auxiliares, como: resistores, capacitores e leds [4].

Além destes, existem também os chamados Shields, que são placas acopladas a placa original e que agregam diversas funcionalidades. Existem diversos tipos de Shields, com diversas funções, seja de entrada, saída, ou ambas. Com esse tipo de placa é possível realizar a comunicação entre o Arduino e uma rede de internet, ou transmitir dados via Bluetooth, Wi-Fi ou Zigbee. Outro tipo de Shield, são os de circuitos integrados, que podem controlar motores independentemente de complicações eletrônicas, além dos que possuem leitor de cartão SD, acelerômetro, GPS e diversos outros sensores que são possíveis de gerar dados importantes

para o software no microcontrolador [5].

São comercializados vários tipos de placas Arduino. As mais utilizadas são a Uno, Duemilanove e Mega. No quadro abaixo estão reunidas as principais características de cada uma delas.

Placa	Uno	Duemilanove	Mega
Microcontrolador	ATmega328	ATmega168	ATmega1280
Tensão de funcionamento	5V	5V	5V
Tensão de entrada	6-20V	6-20V	6-20V
E/S Digitais	14	14	54
Entradas analógicas	6	6	16
Flash Memory	32k	16k	128k
Clock	16Hz	16Hz	16Hz

Figura 1 – Características das placas Arduino Uno, Duemilanove e Mega

Fonte: [6]

O tipo de placa a ser utilizado dependerá do projeto a ser desenvolvido e a quantidade de portas necessárias. Existem placas mais comuns, como é o caso do Arduino Uno (a mais utilizada), que possui 14 portas digitais e 6 analógicas, e placas com maior poder de processamento, que é caso do Arduino Mega, que possui 54 portas digitais. A placa Mega é recomendada para uso em projetos mais elaborados por ser mais robusta, ter uma memória maior e mais opções de portas de entrada e saída. Já as placas Uno e Duemilanove possuem custos mais baixos e oferecem recursos suficientes para desenvolver a maioria dos projetos [6].

1.2 Como instalar o ambiente de desenvolvimento (IDE) do Arduino

A IDE do Arduino é onde o usuário faz a escrita dos programas com as instruções a serem executadas pela placa. Também pela IDE: os programas são gravados na memória do Arduino, são definidas configurações como a porta e o tipo de placa que estão sendo utilizadas e é possível ver dados ou gráficos de medidas que estão sendo realizadas.

Recomenda-se a instalação da IDE do Arduino sempre utilizando o site oficial da plataforma (<https://www.arduino.cc/>). A instalação é simples e está disponível para os principais sistemas operacionais. Porém, vamos mostrar a instalação para Windows, por ser o sistema operacional mais utilizado e disponível nas residências e nas escolas. Para isso, entre na página oficial do Arduino, clique na aba *software* e dentro desta na aba *download*, como mostrado na Fig. 2.

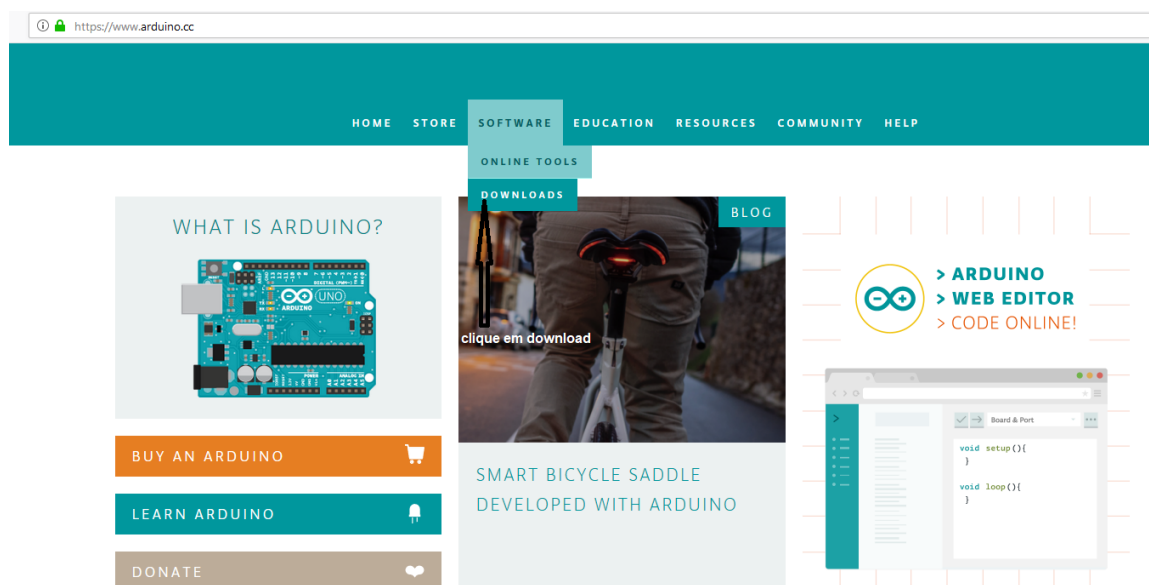


Figura 2 – Página Inicial do Arduino

Em seguida, clique em *Windows installer*, como mostra a Fig. 3.



Figura 3 – Esta página permite a escolha do sistema operacional de acordo com o computador a ser utilizado

Depois clique em *Just download* para apenas baixar o instalador ou clique em *contribute & download* se você deseja contribuir com o projeto, além de baixar o programa, como mostra a Fig. 4.

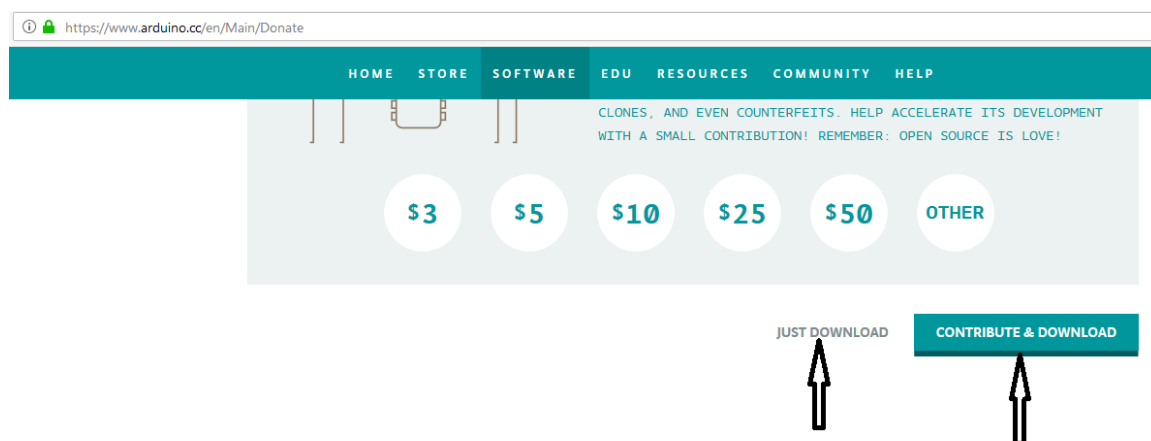


Figura 4 – Escolha se quer apenas baixar o instalador ou contribuir com o projeto

Depois de baixar o instalador, abra o mesmo para começar a instalação. Faça todas as confirmações que o instalador pedir (ele vai sugerir a instalação mais completa) e a IDE estará pronta para uso, com um atalho à mesma na sua área de trabalho, que é mostrada na Fig. 5.

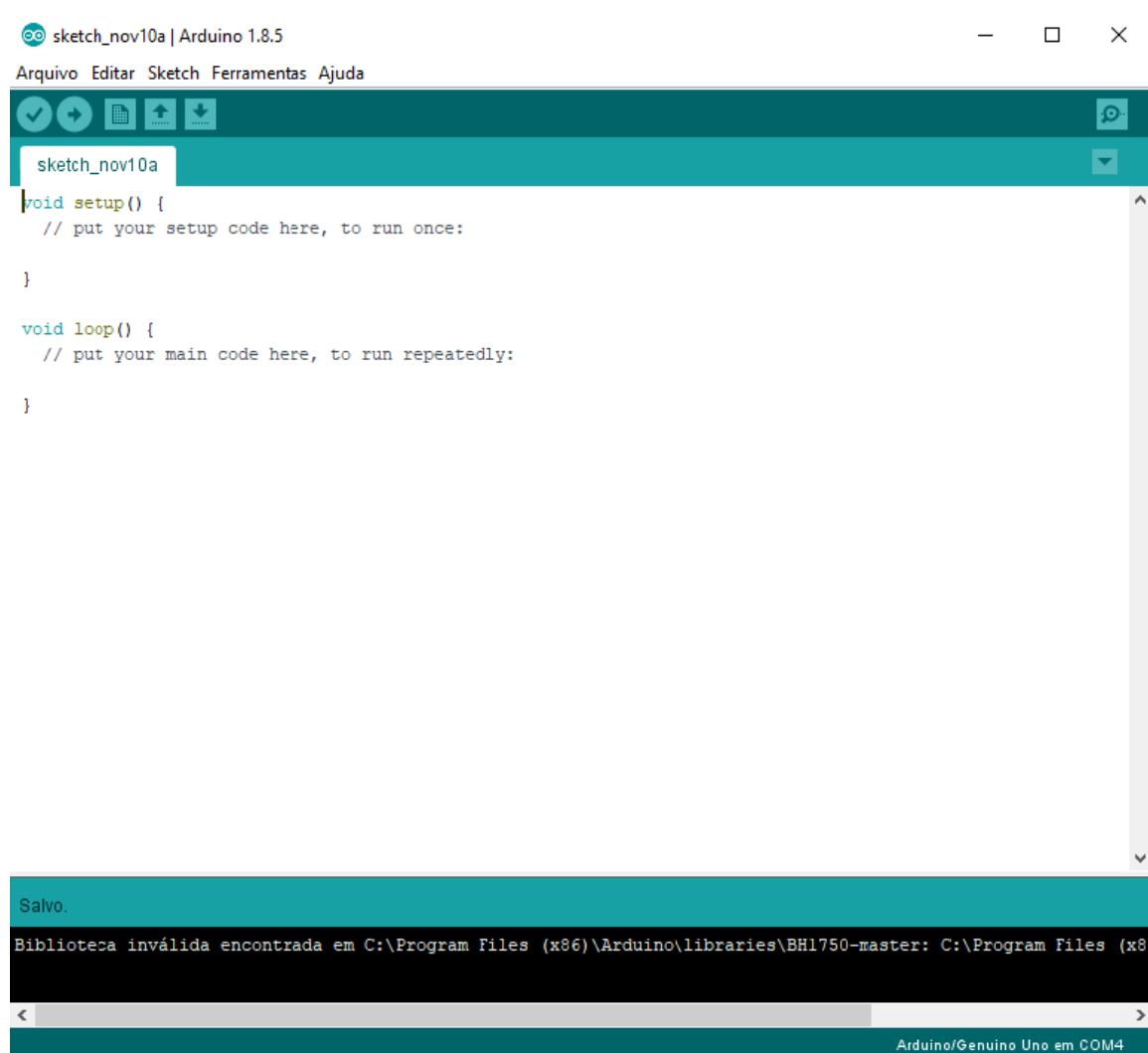


Figura 5 – Tela inicial da IDE do Arduino

Para utilizar o programa disponibilizado neste trabalho, basta copiar o script, colar na IDE e carregar para sua placa. Porém, ao conectar a placa no computador, primeiramente verifique: No menu ferramentas, na aba placa, se a placa selecionada na IDE está de acordo com a que você está utilizando (Arduino Uno, por exemplo); e no mesmo menu, na aba porta, verifique se a porta USB selecionada é a porta em que está conectada a placa Arduino. Tendo feita as verificações, o carregamento do programa é feito clicando nos botões *verificar* e *carregar*, respectivamente. Os mesmos são mostrados na Fig. 6.

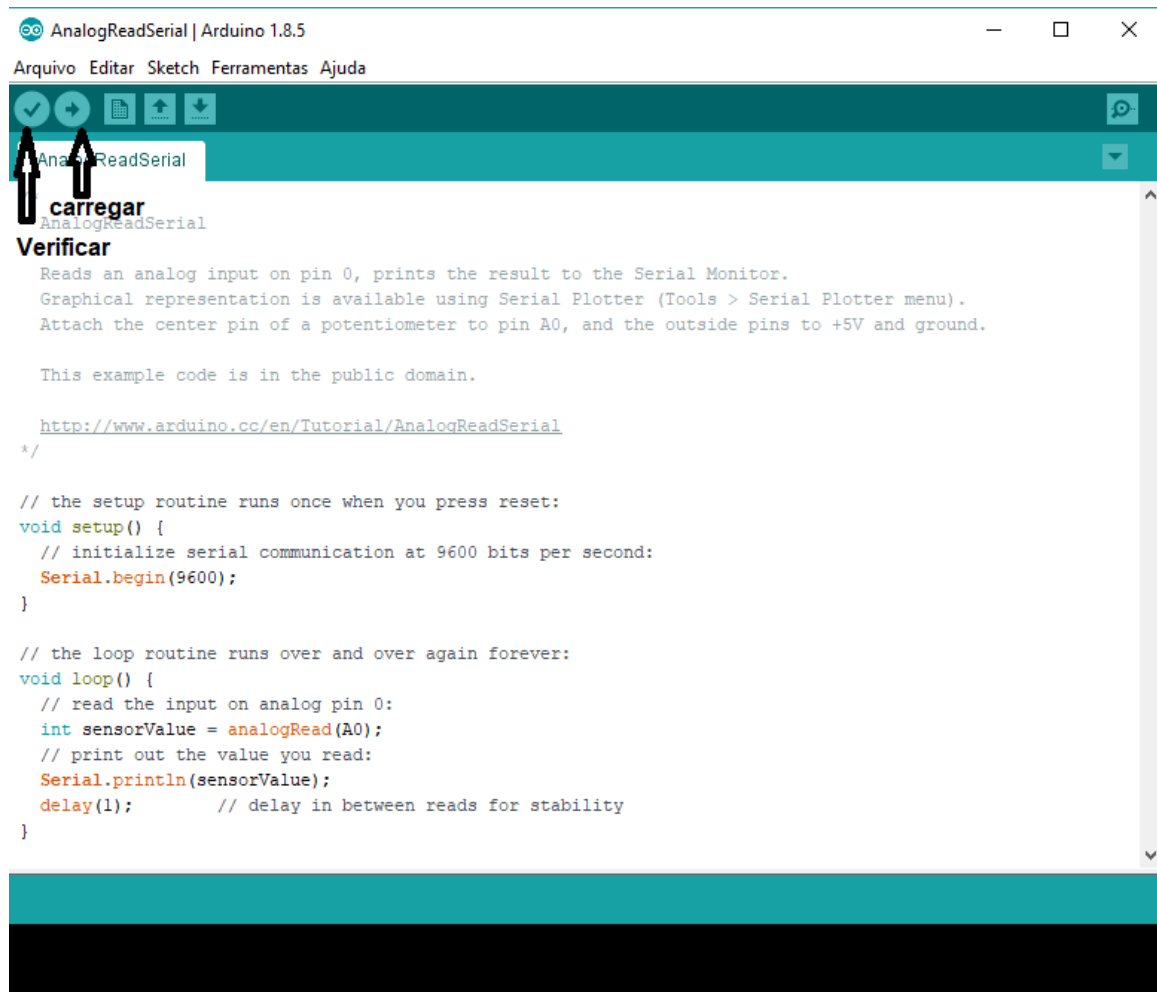


Figura 6 – Botões verificar e carregar

2 A linguagem de programação Python

Python é uma linguagem de programação interpretada, orientada a objetos e de alto nível, com semântica dinâmica [7]. Mesmo sendo uma linguagem poderosa, possui uma sintaxe fácil e intuitiva, o que faz com que os programas feitos em python sejam mais reduzidos que na maioria das linguagens.

Foi criada por Guido Van Rossum em 1991 com o objetivo principal de ter alta produtividade e legibilidade. Entre as características da linguagem estão: o baixo uso de caracteres especiais, o que torna a linguagem muito parecida com pseudo-código executável; o uso de indentação para marcar blocos; quase nenhum uso de palavras-chave voltadas para a compilação; coletor de lixo para gerenciar automaticamente o uso da memória. Possui também uma grande biblioteca padrão, que contém classes, métodos e funções para realizar essencialmente qualquer tarefa, desde o acesso a bancos de dados a interfaces gráficas com o usuário. É uma linguagem livre e multiplataforma. Isso significa que os programas escritos em uma plataforma serão executados sem nenhum problema na maioria das plataformas existentes sem necessidade de modificação. E, caso a plataforma que o usuário deseja utilizar não tenha uma versão de Python, o usuário a liberdade de estudar e modificar o código da linguagem para fazer as adaptações necessárias para que ela possa rodar onde quer que se queira. [8].

Pela sua praticidade e por produzir excelentes resultados, o Python é uma das linguagens mais utilizadas para tarefas científicas, como; ciência e análise de dados, matrizes, gráficos diversos, funções matemáticas e outras. Para isso, são necessárias baixar bibliotecas específicas para realização de determinadas tarefas, por exemplo; a biblioteca Numpy, para trabalhar com arranjos, vetores e matrizes de N dimensões; a biblioteca Matplotlib, para construção de gráficos 2D e 3D; dentre milhares de outras bibliotecas disponíveis. A seguir veremos como instalar o Python e as bibliotecas necessárias para execução do programa disponibilizado neste trabalho.

2.1 Como instalar o Python no seu computador

Recomenda-se a instalação do python sempre utilizando o site oficial da plataforma (<https://www.python.org>). A instalação é simples e está disponível para os principais sistemas operacionais, inclusive celulares e tablets . Porém, vamos mostrar a instalação para Windows, por ser o sistema operacional mais utilizado e disponível nas residências e nas escolas. Para isso, entre na página oficial do Python, clique na aba *Downloads* e dentro desta na aba *Download for Windows* (observe que a página já reconhece o sistema operacional que você está utilizando e sugere o download para o mesmo), como mostrado na Fig. 7.

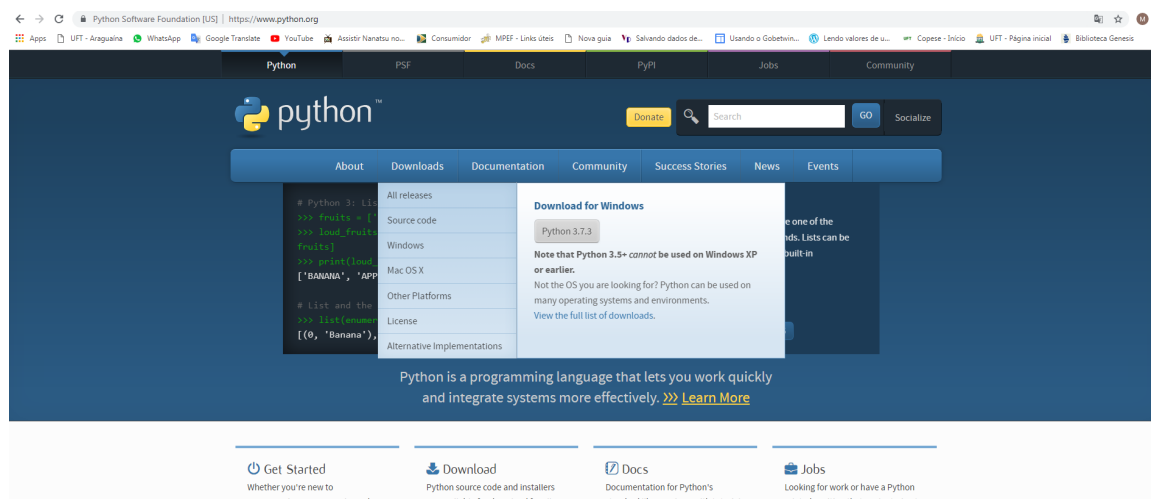


Figura 7 – Página Inicial do Python

Com o instalador do Python no seu computador, execute-o para iniciar a instalação. Como mostra a Fig. 8.

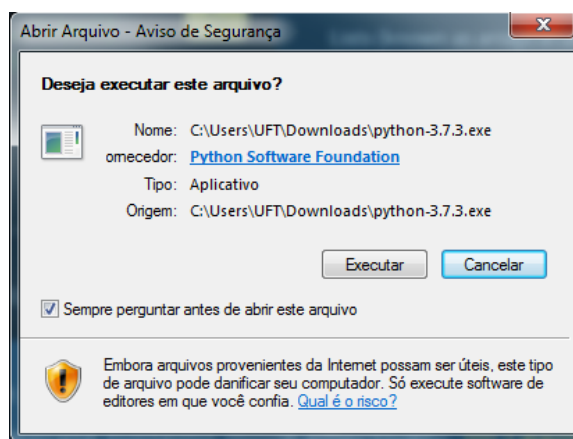


Figura 8 – Clique em executar para começar a instalação

Em seguida, selecione a opção *Install Now*, como mostra a Fig. 9, pois esta é a instalação mais completa e recomendada, e já vem com o Pip, que utilizaremos para, facilmente, baixar as bibliotecas necessárias. Faça todas as confirmações que a instalação requiera.



Figura 9 – Tela para escolha do tipo de instalação que o usuário deseja realizar

Depois disso, seu Python estará pronto para uso e já será capaz de realizar inúmeras atividades. Porém, para utilizar o programa disponibilizado neste trabalho, ainda será necessário incorporar algumas bibliotecas a ele. A instalação das mesmas é muito simples de se fazer com o Pip, e apresentamos a seguir.

2.1.1 Instalando as bibliotecas necessárias com o Pip

Vamos mostrar a instalação das bibliotecas Numpy e Matplotlib, por serem as bibliotecas necessárias neste trabalho, mas o método apresentado, pode ser utilizado para instalação de outras bibliotecas que o usuário precisar em outros projetos. Para isso, abra seu prompt de comando, isso pode ser feito clicando no menu iniciar e pesquisando por *cmd* ou *prompt de comando*, como mostra a Fig. 10 a seguir.

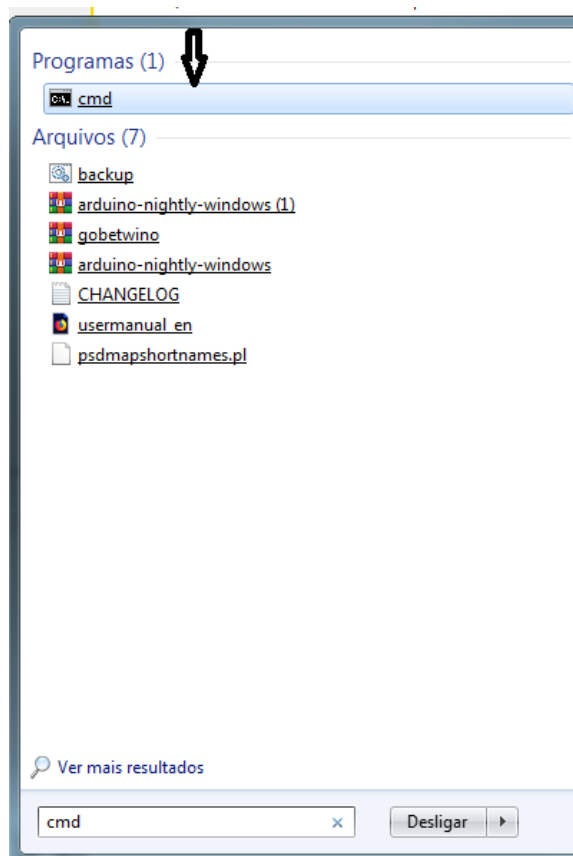


Figura 10 – Como abrir o prompt de comando

Em seguida, aparecerá o nome da unidade e outras configurações próprias do seu computador, e à frente disso o cursor para inserção de comandos. Digite o comando `py -m pip install numpy`, dê enter e espere o programa baixar e instalar o numpy, como mostra a Fig. 11

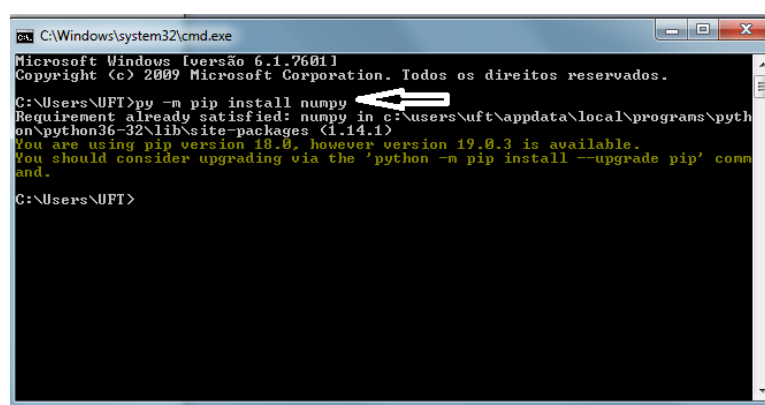
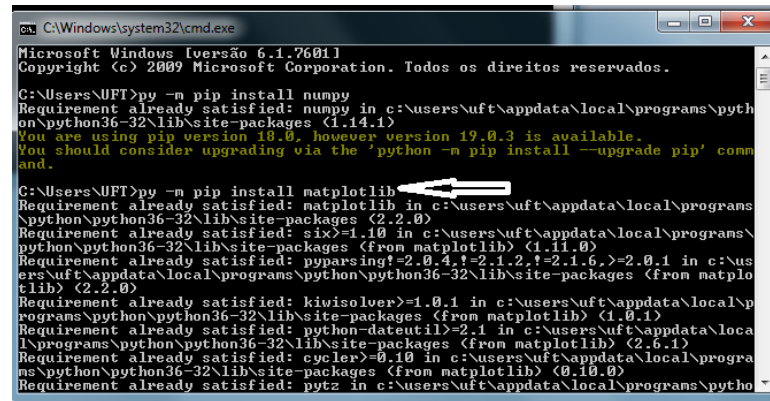


Figura 11 – Instalação da biblioteca Numpy

Da mesma forma, Digite o comando `py -m pip install Matplotlib`, dê enter e espere o programa baixar e instalar o Matplotlib, como mostra a Fig. 12



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [versão 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Users\UFT>py -m pip install numpy
Requirement already satisfied: numpy in c:\users\uft\appdata\local\programs\python\python36-32\lib\site-packages (1.14.1)
You are using pip version 18.0, however version 19.0.3 is available.
You should consider upgrading via the 'python -m pip install --upgrade pip' command.

C:\Users\UFT>py -m pip install matplotlib
Requirement already satisfied: matplotlib in c:\users\uft\appdata\local\programs\python\python36-32\lib\site-packages (2.2.0)
Requirement already satisfied: six>=1.10 in c:\users\uft\appdata\local\programs\python\python36-32\lib\site-packages (from matplotlib) (1.11.0)
Requirement already satisfied: pyparsing<2.0.4,!=2.1.2,!=2.1.6,>=2.0.1 in c:\users\uft\appdata\local\programs\python\python36-32\lib\site-packages (from matplotlib) (2.2.0)
Requirement already satisfied: kiwisolver<=1.0.1 in c:\users\uft\appdata\local\programs\python\python36-32\lib\site-packages (from matplotlib) (1.0.1)
Requirement already satisfied: python-dateutil<=2.1 in c:\users\uft\appdata\local\programs\python\python36-32\lib\site-packages (from matplotlib) (2.6.1)
Requirement already satisfied: cycler<=0.10 in c:\users\uft\appdata\local\programs\python\python36-32\lib\site-packages (from matplotlib) (0.10.0)
Requirement already satisfied: pytz in c:\users\uft\appdata\local\programs\python\python36-32\lib\site-packages (from matplotlib) (2018.9)
```

Figura 12 – Instalação da biblioteca Matplotlib

Agora seu Python estará apto para uma infinidade de aplicações que envolvam interface gráfica e outras. Para execução de um programa, o usuário pode escolher um dos vários editores que permitem a execução de programas em Python, como: Geany, Pycharm, Spyder, Atom, entre outros. Porém, o próprio Python tem o IDLE, que é excelente. Para abri-lo basta pesquisar *IDLE*, como na Fig. 13

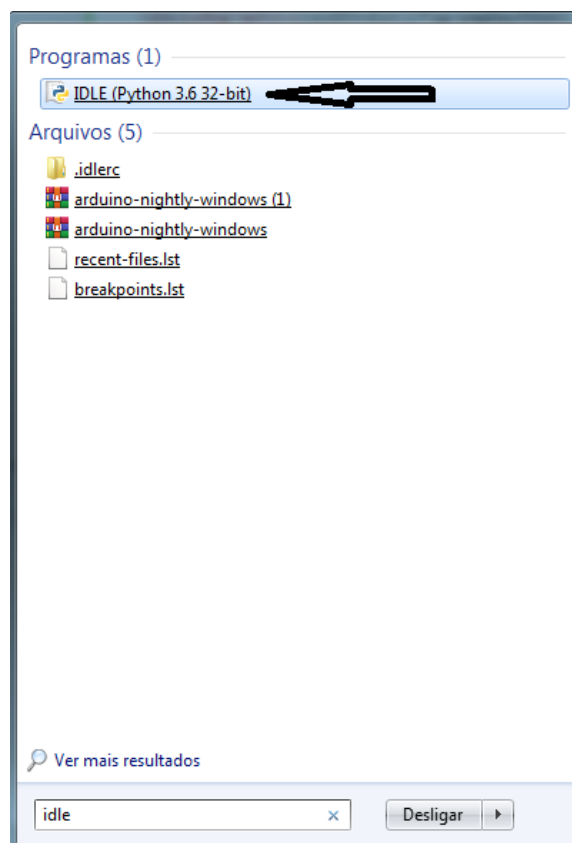


Figura 13 – Como abrir o IDLE

Para executar o programa, basta copiar o escript, clique no menu *File*, e dentro deste, na aba *New File*, para criar um novo programa. Cole o script, e aperte *F5* para executar o mesmo.

3 Fundamentos Teóricos

3.1 Interferência e Difração da luz

A interferência e a difração são fenômenos exclusivamente ondulatórios; sejam ondas sonoras, ondas eletromagnéticas ou até mesmo ondas de matéria; e como relatado na seção anterior, são esses fenômenos que denunciam a natureza ondulatória da luz. Os autores do livro [9] mostram que a interferência é responsável por incontáveis fenômenos e aplicações ópticas, como a variação de cores das asas de uma borboleta *Morpho*, que pode ser vista com vários tons de azul dependendo do ângulo de observação, e o uso de tintas com efeitos semelhantes em cédulas de alguns países para evitar falsificações.

Hecht [10], em breves palavras, define a **interferência óptica** como a interação de duas ou mais ondas luminosas produzindo uma irradiação resultante que não corresponde à soma das irradiações componentes. Desta forma, a onda resultante em um dado ponto P pode ter amplitude que varia de zero (interferência totalmente destrutiva) à soma das amplitudes de todas as ondas componentes (interferência construtiva). Se a amplitude da onda resultante for intermediária diz-se que a interferência foi parcialmente destrutiva.

A onda resultante de uma interferência depende da **diferença de fase** das ondas envolvidas. Duas ondas luminosas de mesma amplitude e mesmo comprimento de onda que se encontram em um dado ponto P, com a mesma fase, terão naquele ponto uma interferência construtiva, se porém, tiverem fases opostas, terão uma interferência totalmente destrutiva.

No clássico experimento da dupla fenda de Young, como mostra a Fig. 16 na seção 3.1.1, há a formação de um padrão com franjas claras e franjas escuras, a esse padrão chamamos de **figura de interferência** ou mesmo **figura de difração**. Para que uma figura de interferência apareça, é preciso que a diferença de fase entre as ondas que chegam a um ponto P qualquer não varie com o tempo. Isso acontece no caso do experimento de Young, pois os raios que passam pelas fendas fazem parte da mesma onda, advindas da primeira fenda. Quando a diferença de fase permanece constante em todos os pontos do espaço, dizemos que os raios que saem das duas fendas e chegam ao anteparo são totalmente **coerentes**. Se as ondas viessem, no entanto, de fontes diferentes, como dois filamentos de lâmpadas incandescentes, mesmo que passando por um filtro para se tornarem o mais monocromática possível, elas se comportariam como fontes incoerentes, e não formariam figura de interferência. Isso acontece devido a luz de uma fonte usual ser produzida por um grande número de átomos independentes e aleatórios. Porém, os lasers são fontes de luz altamente coerentes, pois seus átomos emitem luz de forma sincronizada, são quase perfeitamente monocromáticos e são emitidos em feixes finos [9], [11].

A diferença de fase de duas ondas coerentes pode mudar por variados motivos. Uma das

maneiras pelas quais isso ocorre, é quando essas ondas percorrerem caminhos ópticos diferentes, por exemplo, quando atravessam materiais com diferentes índices de refração. Essa diferença de fase também pode mudar quando uma ou ambas sofrem reflexões. E ainda, a diferença de fase pode mudar quando as ondas percorrem distancias diferentes. Neste último caso, como se verá na seção 3.4.1, enquadra-se a formação da figura de interferência no experimento de young, onde a localização dos pontos de máximos e mínimos, dependem da diferença de caminho percorrido por cada onda. Mas antes, é importante falar um pouco sobre a difração.

Hecht [10] descreve a difração como uma característica geral dos fenômenos ondulatórios que ocorrem sempre que uma parte da frente de onda, é de alguma maneira obstruída. As frentes de onda ao encontrar o obstáculo sofrem mudanças de amplitude ou fase, e ao se propagarem para além do obstáculo (seja ele transparente ou opaco) sofrem interferência, causando a distribuição específica de densidade de energia conhecida como padrão ou figura de difração. A difração sempre ocorre, porém, nem sempre pode ser notada. As situações em que o efeito difrativo pode ser desprezado estão no domínio do que se denomina Óptica Geométrica. Dentro desse domínio está o princípio da propagação retilínea da luz, onde há a formação de sombras dos objetos, e acontece quando o comprimento de onda da luz é muito menor que as dimensões do obstáculo.

No entanto, ainda segundo o mesmo autor, não há distinção física significativa entre interferência e difração. Tornou-se habitual falar de interferência ao considerar a superposição de apenas algumas ondas e difração ao tratar de um grande número de ondas. Mesmo assim, uma se refere à interferência de feixe múltiplo em um contexto e difração por uma rede em outra.

Convém mencionar que a difração é um fenômeno complexo, e seu tratamento completo é feito pela mais completa teoria da luz, a Eletrodinâmica Quântica. Mas, para as experiências que vamos tratar a seguir, a teoria eletromagnética clássica é mais que o suficiente, e extremamente mais simples.

Para entender como a difração ocorre, vamos recorrer ao **Princípio de Huygens-Fresnel**, que diz: Cada ponto não obstruído de uma frente de onda, em um dado instante, se comporta como uma fonte de ondas esféricas secundárias (com a mesma frequência da onda primária). A amplitude do campo óptico em qualquer ponto após passar o obstáculo, é a superposição de todas estas ondas secundárias (considerando suas amplitudes e fases relativas). A Fig. 14 mostra um exemplo de como esse princípio é aplicado para o entendimento da figura de difração no caso da difração por uma fenda simples. Convém notar que esse princípio nos leva à conclusão de que a luz sofre difração e isso ocorre devido à interferência.

Contudo, convém aqui mencionar que, para o caso de aberturas muito menores que o comprimento de onda ou para pontos de observação próximos à abertura, os efeitos de borda se tornam importantes e o princípio de Huygens-Fresnel não se aplica.

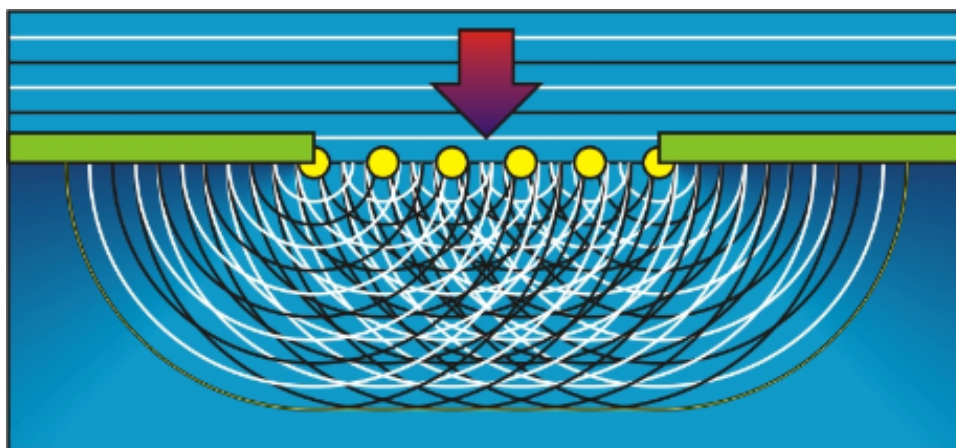


Figura 14 – Princípio de Huygens-Fresnel aplicado a uma fenda simples
Fonte: [12]

Neste trabalho será considerado apenas a **Difração de Fraunhofer** ou Difração de campo distante, que estabelece a condição de que tanto a fonte como a tela de observação estejam muito distantes da fenda (ou das fendas). Se, no entanto, a tela de observação estiver próxima à fenda, teremos a **Difração de Fresnel** ou Difração de campo próximo, e o tratamento matemático necessário será muitas vezes mais complicado. A Fig. 15 estabelece uma sucessão de imagens de difração por uma fenda simples observadas a distâncias decrescentes da fenda. Ela mostra que ao se aproximar a tela de observação da fenda, há uma deformação da figura de difração, passando do limite da difração de Fraunhofer para a difração de Fresnel. Não pretende-se aqui, no entanto, entrar nas questões mais fundamentais do por que isto ocorre.

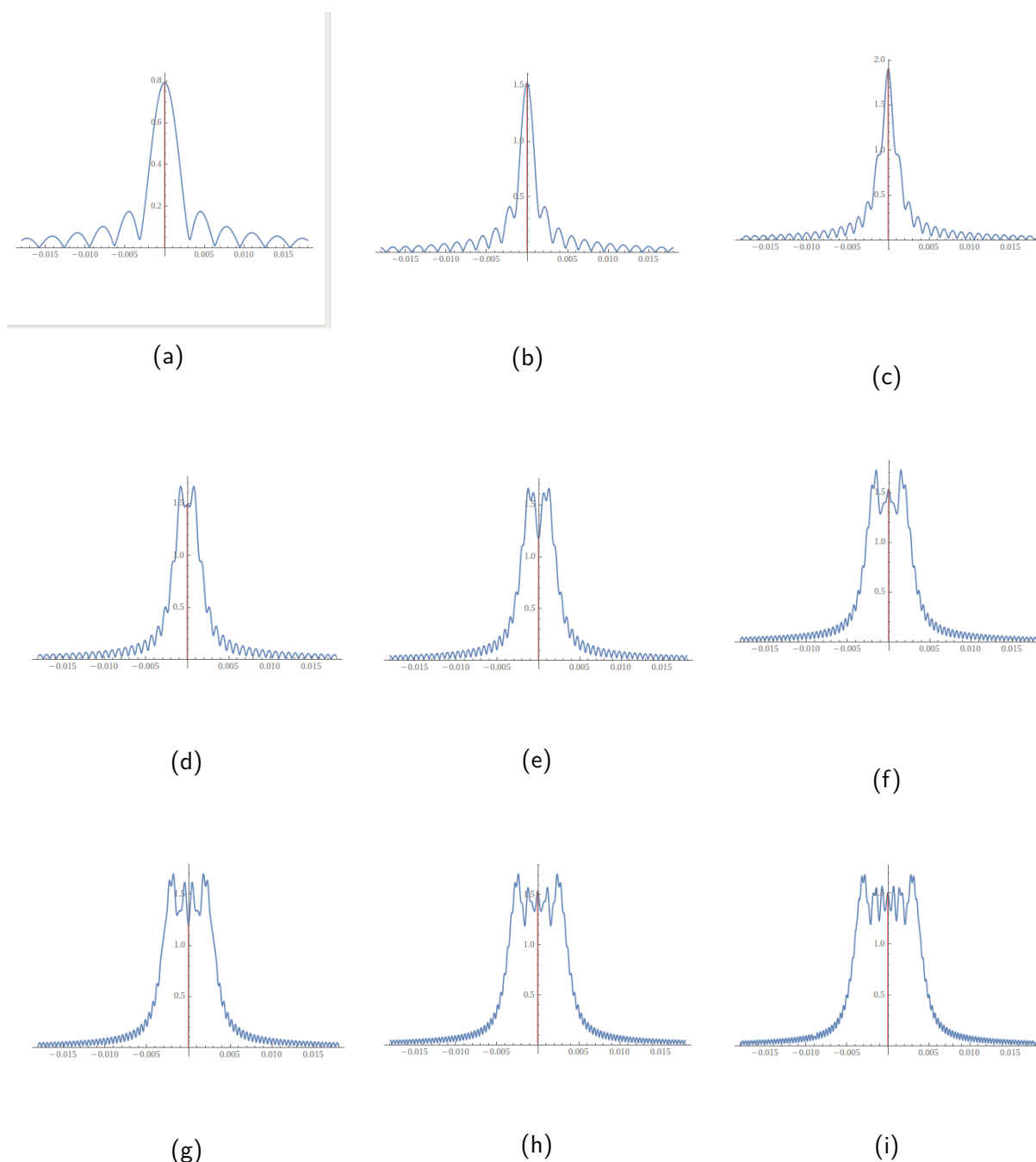


Figura 15 – De (a) até (i), uma sucessão de padrões de difração por fenda única em distâncias decrescentes da fenda; Difração de Fraunhofer (campo distante) na figura (a), indo em direção à difração de Fresnel (campo próximo) nas figuras que seguem
Fonte: Os autores

3.1.1 Interferência em Dupla Fenda

Vamos deduzir aqui as equações para determinação da posição das franjas claras e das franjas escuras no experimento da dupla fenda de Young. Vamos também deduzir a equação de distribuição de intensidades através do aparato. Trataremos da interferência luminosa, neste caso, como descrevem [9], considerando as fendas muito mais estreitas que o comprimento de

onda da luz, ou seja, fazendo a largura a das fendas ser muito menor que o comprimento de onda da luz λ ($a \ll \lambda$). Assim, as fendas S_1 e S_2 se comportam como fontes puntuais de luz, e o máximo central da figura de difração de cada fenda cobre toda a tela de observação (Quanto mais estreita a fenda, mais largo é o máximo central), e a onda luminosa que sai de cada uma das fendas, sofre interferência uma com a outra formando um padrão com franjas claras praticamente de mesma intensidade. A Fig. 16 mostra uma representação desse experimento.

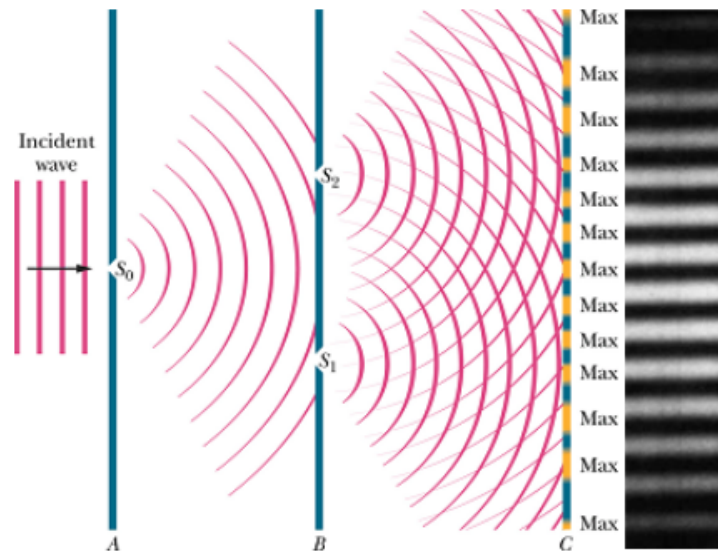


Figura 16 – A luz monocromática incide em uma fenda S_0 que se comporta como fonte pontual. A luz difratada por S_0 chega às fendas S_1 e S_2 e é novamente difratada por estas. A sobreposição das ondas luminosas das duas fendas chegam à tela de observação e formam um padrão de interferência com franjas claras e escuras

Fonte: [13]

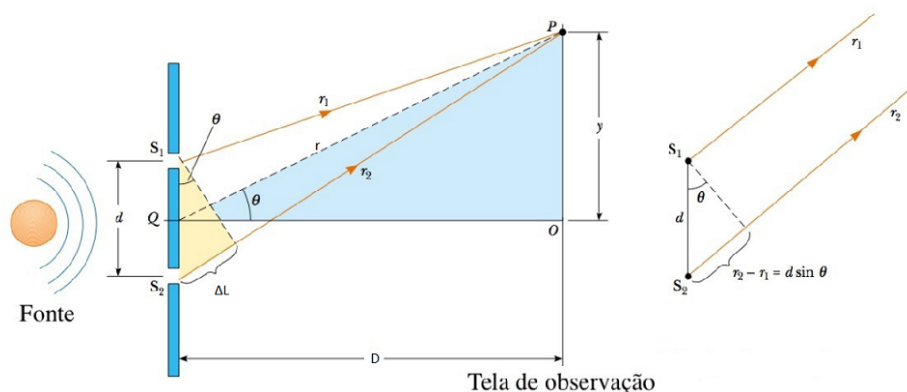


Figura 17 – A interferência das ondas que saem das fendas S_1 e S_2 é causada pela mudança na diferença de fase devido à diferença de caminho $r_2 - r_1$.

Fonte: [14]

Como mostra a Fig. 17, para determinar a localização das franjas claras e escuras, relembremos que a interferência de duas ondas coerentes depende da diferença de fase entre

elas, e que esta diferença de fase pode mudar se as ondas percorrerem distâncias diferentes. Assim, considerando um ponto P qualquer sobre a tela de observação, traçamos um raio r_1 saindo de uma das fendas e r_2 saindo da outra fenda. θ é o ângulo entre o eixo central (que liga o ponto médio das fendas à tela de observação ortogonalmente), e a linha que liga esse ponto médio até o ponto P . Como estamos utilizando a condição de Fraunhofer, a distância D entre as fendas e a tela de observação é muito maior que o comprimento de onda da luz λ e que a distância d entre as fendas, portanto, r_1 e r_2 podem ser considerados praticamente paralelos.

A diferença de caminho (neste caso, causados pela diferença nas distâncias percorridas) ΔL é dada por:

$$\Delta L = d \sin \theta \quad (3.1)$$

Para que se tenha uma franja clara, ΔL deve ser igual a 0 ou igual a um número inteiro de comprimentos de onda, que pode ser expresso como:

$$\Delta L = d \sin \theta = (\text{número inteiro})(\lambda)$$

Ou ainda,

$$\boxed{d \sin \theta = m\lambda}, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots (\text{frangas claras}) \quad (3.2)$$

Para que se tenha uma franja escura, ΔL deve ser um múltiplo ímpar da metade de um comprimento de onda, assim:

$$\Delta L = d \sin \theta = (\text{número ímpar})\left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

Portanto, pode-se dizer que ΔL deve ser um número inteiro de comprimentos de onda mais a metade de um comprimento de onda, assim

$$d \sin \theta = m\lambda + \frac{\lambda}{2}$$

Isso pode ser melhor escrito na forma:

$$\boxed{d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda}, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots (\text{mínimos}) \quad (3.3)$$

Note que para $m = 0$ na equação 3.2, teremos uma franja clara em $\theta = 0$, que é o máximo central e de maior intensidade. Fazendo $m = 1$ na mesma equação, encontra-se a localização θ da próxima franja clara, para $m = 2$ a seguinte e assim sucessivamente. Podemos

ainda encontrar a distância y acima (ou abaixo) do eixo central, de uma franja clara m qualquer. Na Fig. 17, observe que:

$$y_m = D \tan \theta \quad (3.4)$$

Como estamos considerando a tela de observação muito distante, o ângulo θ é muito pequeno, então pode-se utilizar a aproximação:

$$\tan \theta = \sin \theta \approx \theta$$

Assim, da Eq. 3.4 pode ser reescrita como:

$$y_m = D \sin \theta$$

Porém, da equação 3.2:

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d}$$

Finalmente,

$$\boxed{y_m = D \cdot \frac{m\lambda}{d}} \quad (3.5)$$

Que é a distância de qualquer uma das franjas claras ao eixo central. Note que a distância entre duas franjas claras consecutivas, pode ser dada por:

$$\Delta y = y_{m+1} - y_m \quad (3.6)$$

Vamos agora deduzir, para este caso, as equações de distribuição de intensidades luminosas ao longo da tela de observação. Para isso, recorremos à teoria eletromagnética, onde encontramos que uma onda eletromagnética plana pode ser escrita em termos de seu campo elétrico, que na forma complexa pode ser definido como:

$$E(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)} \quad (3.7)$$

$$E(x, t) = Ae^{ikx} \cdot e^{-i\omega t}$$

Fazendo

$$v(x) = Ae^{ikx}, \quad (3.8)$$

Podemos escrever o campo elétrico como:

$$E(x, t) = v(x)e^{-i\omega t} \quad (3.9)$$

Sabemos que a intensidade da onda é constante no tempo no ponto P , e é igual a $\langle E^2 \rangle$, então

$$I(x) = [v(x)]^2 = A^2 \quad (3.10)$$

O campo total E_{total} no ponto P é dado pela soma dos campos associados a cada onda:

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_1 + E_2 = Ae^{i(kr_1 - \omega t)} + Ae^{i(kr_2 - \omega t)} \\ &= Ae^{-i\omega t} (e^{ikr_1} + e^{ikr_2}) \end{aligned}$$

Considerando a equação 3.8 em duas dimensões, temos:

$$V(x) = A(e^{ikr_1} + e^{ikr_2})$$

Logo,

$$\boxed{E_t = V(x)e^{-i\omega t}} \quad (3.11)$$

Como estamos considerando $D \gg d$

$$d \sin \theta = r_1 - r_2$$

Assim, podemos fazer:

$$r_1 + \frac{d}{2} \sin \theta = r$$

E escrever r_1 e r_2 da seguinte forma:

$$\boxed{r_1 = r - \frac{d}{2} \sin \theta} \quad (3.12)$$

$$\boxed{r_2 = r + \frac{d}{2} \sin \theta} \quad (3.13)$$

Assim,

$$\begin{aligned} V(x) &= A \left[e^{ik(r - \frac{d}{2} \sin \theta)} - e^{ik(r + \frac{d}{2} \sin \theta)} \right] \\ &= Ae^{ikr} \left[e^{-\frac{i\varphi}{2}} + e^{\frac{i\varphi}{2}} \right], \end{aligned} \quad (3.14)$$

Onde

$$\varphi = kd \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta.$$

Lembrando que,

$$e^{\pm i\frac{\varphi}{2}} = \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \pm i \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right),$$

Então

$$V(x) = Ae^{ikr} \cdot 2 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

$$V(x) = 2Ae^{ikr} \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (3.15)$$

Como

$$I = [V(x)]^2 = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

Vamos chamar de I_0 a intensidade relacionada a apenas uma das fendas, assim:

$$I_0 = [v(x)]^2 = A^2 \quad (3.16)$$

Então, a intensidade no ponto P fica, finalmente:

$$\boxed{I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (\text{Interferência fenda dupla}) \quad (3.17)$$

Sendo

$$\boxed{\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta} \quad (3.18)$$

O padrão de interferência formado neste caso, está mostrado na Fig. 18

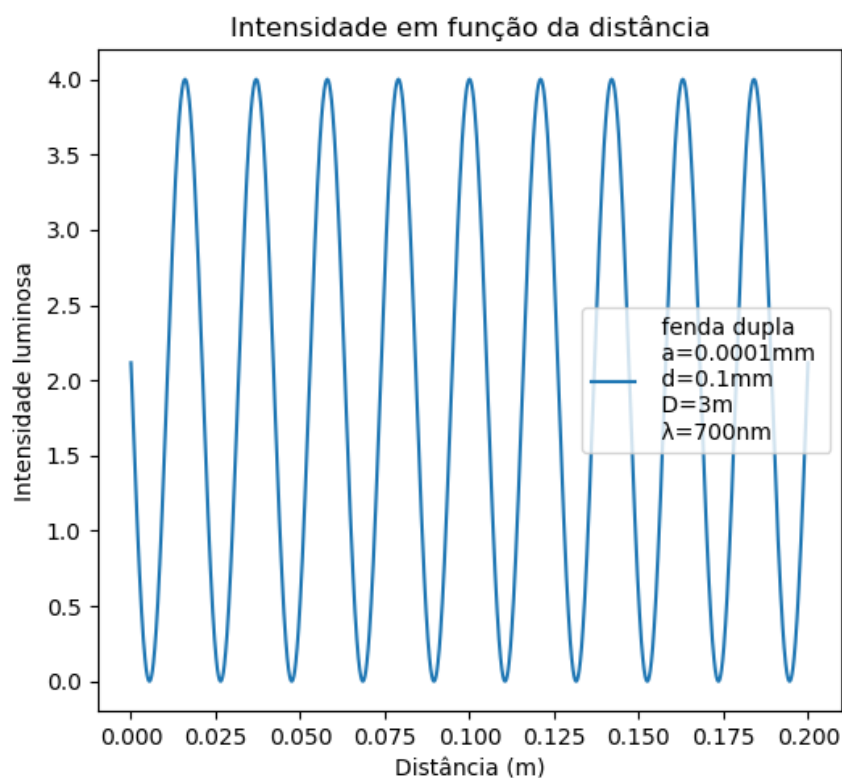


Figura 18 – Padrão de interferência da luz por fenda dupla
Fonte: Os autores

3.1.2 Difração: Fenda simples

Vamos discutir agora o fenômeno de difração da luz quando esta passa por uma fenda simples (ou fenda única) de largura a qualquer. Como já foi mencionado, esse fenômeno é mais complexo que o simples alargamento das frentes de ondas, dado pelo princípio de Huygens, pois também forma uma figura de interferência (ou figura de difração) ao ser interceptada por uma tela de observação. Assim como foi feito no caso da fenda dupla da seção 3.4.1, vamos discutir a posição das franjas e a distribuição de intensidades ao longo de uma tela de observação. A Fig. 19 a seguir mostra um esquema da fenda simples sendo atingida por uma onda plana.

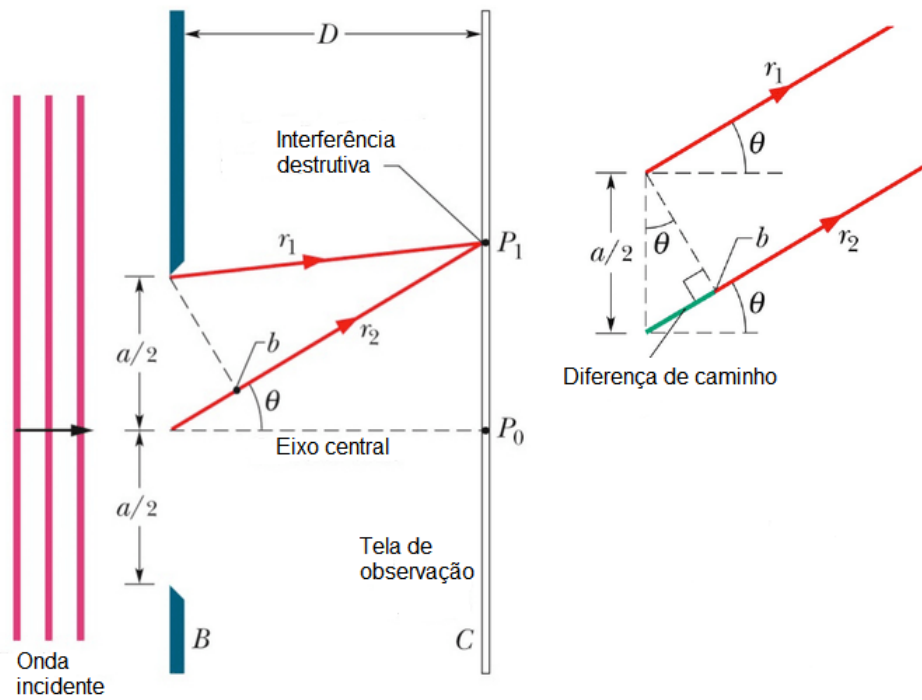


Figura 19 – Os raios r_1 e r_2 sofrem interferência destrutiva no ponto P_1 .

Fonte: [13]

Neste caso, de forma geral as dificuldades matemáticas são maiores que no caso da dupla fenda da seção anterior. Vamos encontrar a equação para posição das franjas escuras (interferência totalmente destrutiva), porém, sobre as franjas claras, apenas afirmaremos que estão a meio caminho entre duas franjas escuras consecutivas. Para encontrar a primeira franja escura, Dividimos primeiramente a fenda em duas partes e traçando dois raios r_1 e r_2 como na Fig. 19, a diferença de caminho entre eles é dado por:

$$r_1 - r_2 = \frac{a}{2} \sin \theta \quad (3.19)$$

A interferência será destrutiva quando a diferença de caminho ΔL for um número inteiro de $\frac{\lambda}{2}$, então:

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

$$\boxed{a \sin \theta = m\lambda} \quad m = 1, 2, 3, \dots (\text{franjas escuras}) \quad (3.20)$$

A equação 3.20 mostra que quanto menor for a largura a da fenda, mais distante do eixo central será a primeira franja escura, portanto, maior será extensão do máximo central. Isso indica que o efeito da difração se torna mais acentuado quanto menor for a fenda. No limite em que a fenda se torna muito grande em relação ao comprimento de onda da luz, quase nenhuma difração será percebida e entramos no limite da óptica geométrica.

Vamos agora determinar a distribuição de intensidade luminosa para fenda simples. Para isso, vamos aplicar o princípio de Huygens-Fresnel fazendo mentalmente a divisão da fenda em N partes igualmente espaçadas, e fazendo cada ponto dessa divisão se comportar como uma fonte de luz. Vamos colocar também o eixo central dividindo a fenda ao meio, e estabelecer a coordenada x na direção do comprimento da fenda. Os valores de x variam então de $-a/2$ até $a/2$, como mostra a Fig. 20.

Vimos no caso da fenda dupla, que podemos escrever a amplitude do campo elétrico associado a duas ondas eletromagnéticas planas que se encontram em um ponto P como:

$$v(x) = A(e^{-i\vec{k}\cdot\vec{x}_1} + e^{-i\vec{k}\cdot\vec{x}_2}) \quad (3.21)$$

Generalizando para N ondas planas, a amplitude total $V(x)$ será então a soma de todas as amplitudes associadas a cada uma das N ondas:

$$V(x) = A \sum_{j=1}^N e^{-i\vec{k}\cdot\vec{x}_j} \quad (3.22)$$

Notemos que quando $\theta = 0$, temos:

$$\vec{k} \cdot \vec{x}_j = kx_j \sin(0) = 0$$

E a amplitude é máxima, dada por:

$$V(0) = A \sum_{j=1}^N e^0 = NA \quad (3.23)$$

Vamos definir uma distribuição de amplitudes $V(\theta)$ relativas à amplitude máxima. Assim, pegando uma variação $\Delta X = \frac{a}{N}$, e a tornando tão pequena quanto se queira, como mostra a Fig. 20, a variação se torna diferencial, e o somatório da Eq. 3.22 vira uma integral. Assim, a fração:

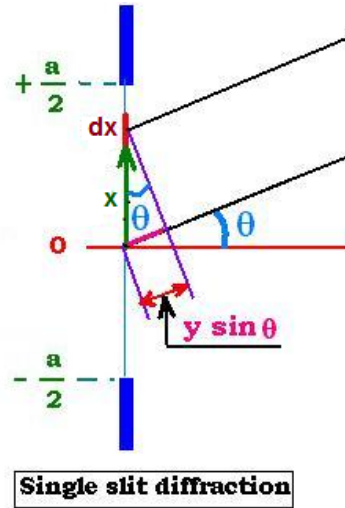


Figura 20 – A largura a da fenda é dividida em N partes, fazendo $N \rightarrow \infty$, dx passa ser a variação infinitesimal entre dois pontos consecutivos.

Fonte: [15]

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{1}{NA} A \sum e^{-i\vec{k} \cdot \vec{x}_j} \quad \text{onde, } \frac{1}{N} = \frac{\Delta X}{a}$$

Vira a integral:

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{1}{a} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{-i\vec{k} \cdot \vec{x}} dx \quad (3.24)$$

Que pode ser resolvida fazendo uma substituição simples,

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{1}{a} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{-ikx \sin \theta} dx \quad (3.25)$$

$$u = -ikx \sin \theta$$

$$\frac{du}{dx} = -ik \sin \theta$$

$$dx = \frac{du}{-ik \sin \theta}$$

$$\frac{1}{a} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{-ikx \sin \theta} dx = \frac{1}{a} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{e^u}{-ik \sin \theta} du$$

$$= \frac{1}{a} \left[\frac{e^{-ikx \sin \theta}}{-ik \sin \theta} \right]_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}}$$

$$= \frac{1}{a} \left[\frac{e^{-ik \frac{a}{2} \sin \theta} - e^{ik \frac{a}{2} \sin \theta}}{-ik \sin \theta} \right] \quad (3.26)$$

Lembrando que,

$$e^{-ik\frac{a}{2}\sin\theta} = \cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) - i\sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right), \quad (3.27)$$

E que,

$$e^{ik\frac{a}{2}\sin\theta} = \cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) + i\sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) \quad (3.28)$$

Teremos:

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{-2i\sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right)}{-2ik\frac{a}{2}\sin\theta} = \frac{\sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right)}{k\frac{a}{2}\sin\theta} \quad (3.29)$$

Fazendo $\alpha = ka\sin\theta$,

$$\frac{V(\theta)}{V(0)} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{\alpha}{2}}$$

No entanto, como já vimos: $I = \langle E^2 \rangle = |V|^2$, Portanto:

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \frac{V(\theta)^2}{V(0)^2}$$

$$\boxed{\frac{I(\theta)}{I(0)} = \left[\frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{\alpha}{2}} \right]^2} \quad (\text{Difração - fenda simples}) \quad (3.30)$$

Notemos que os mínimos ocorrem quando $\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 0$, ou seja, quando $\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ é $\pi, 2\pi, 3\pi, \dots$

$$\frac{\alpha}{2} = m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$$\frac{ka\sin\theta}{2} = m\pi$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{a\sin\theta}{2} = m\pi$$

$$\boxed{a\sin\theta = m\lambda}, \quad (3.31)$$

que é a equação 3.20 encontrada anteriormente.

O padrão de difração formada neste caso, é mostrado na Fig. 21.

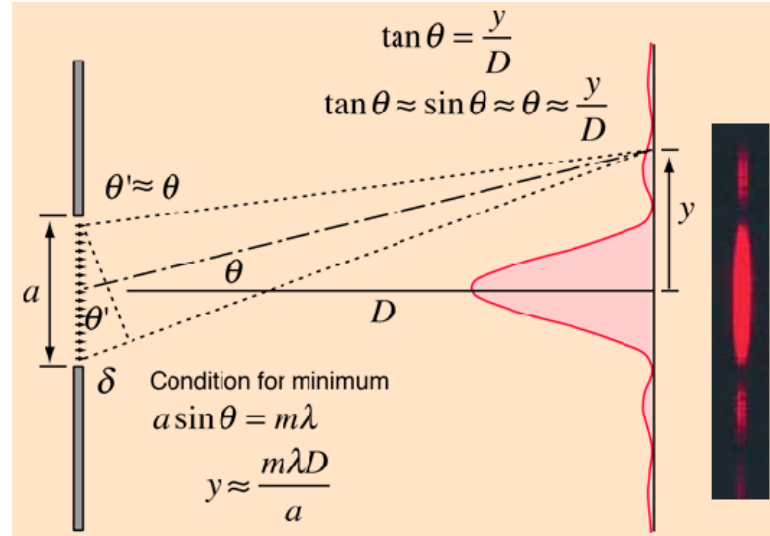


Figura 21 – Padrão de difração da luz por uma fenda simples
Fonte: [16]

3.1.3 Difração: Dupla Fenda

Na seção 3.4.1, vimos o caso da interferência sofrida pela luz ao passar por uma dupla fenda, porém, na ocasião foi considerado que a largura a das fendas era muito pequena, o que resultou num padrão com franjas claras de praticamente mesma intensidade. O que acontece, porém, se as fendas tiverem larguras a qualquer? Ou seja, não necessariamente pequena? Isso é o que acontece na maioria dos casos práticos, pois geralmente as fendas não possuem largura desprezível.

Assim, no caso de duas fendas de largura a , separadas por uma distância d , acontece a sobreposição do efeito da interferência das duas fendas com o efeito da difração individual de cada uma delas. Como mostra Hecht [10], isto resulta numa distribuição de intensidades que é um sistema de interferência de dupla fenda modulada por um padrão de difração de fenda única, onde aparece o termo de interferência e o termo de difração. Essa distribuição é dada por:

$$I(\theta) = \left(4I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \right) \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{\alpha}{2}} \right)^2 \quad (\text{Difração – Dupla fenda}) \quad (3.32)$$

onde,

$$\varphi = kd \sin \theta \quad e \quad \alpha = ka \sin \theta$$

O padrão de difração formado neste caso está ilustrada na Fig. 22

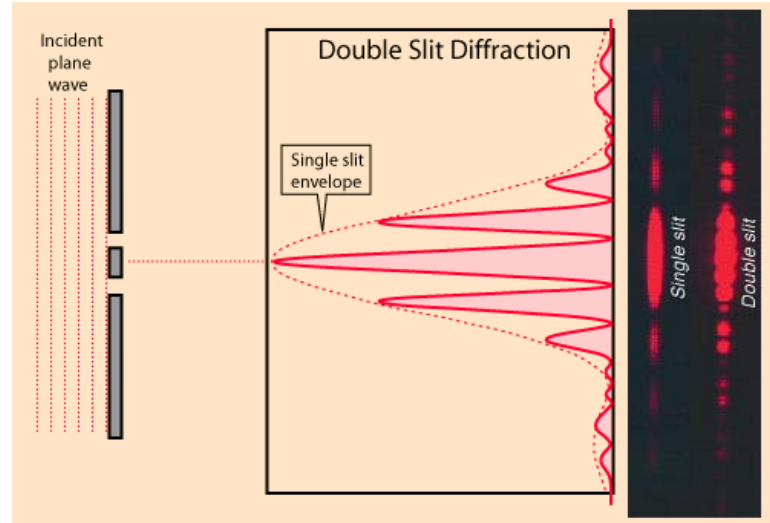


Figura 22 – Padrão de difração da luz por dupla-fenda, com diferentes larguras a da fenda e distância d entre elas sendo mantida constante. Note que a medida que a largura da fenda diminui, a largura do “envelope” dos máximos centrais aumenta, e esses ficam em maior quantidade.

Fonte: [16]

3.1.4 Difração: Fendas múltiplas

O mesmo raciocínio empregado no caso da dupla fenda pode ser estendido para encontrar a distribuição de intensidades para o caso de N fendas de mesma largura e igualmente espaçadas. Na verdade, a equação apresentada no caso da dupla fenda, é um caso particular da equação mais geral de distribuição de intensidades para N fendas idênticas. Teremos então um padrão de interferência modulado pelo padrão difrativo. A distribuição de intensidades é dada por:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin N \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \right)^2 \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{\alpha}{2}} \right)^2 \quad (\text{Difração} - N \text{ Fendas}) \quad (3.33)$$

Lembrando que estamos desde o início desta seção tratando I_0 como a intensidade de luz emitida por uma única fenda na direção $\theta = 0$. A intensidade total $I(0) = N^2 I_0$.

As Figuras abaixo mostram os gráficos de intensidades para os casos de 3 e 5 fendas.

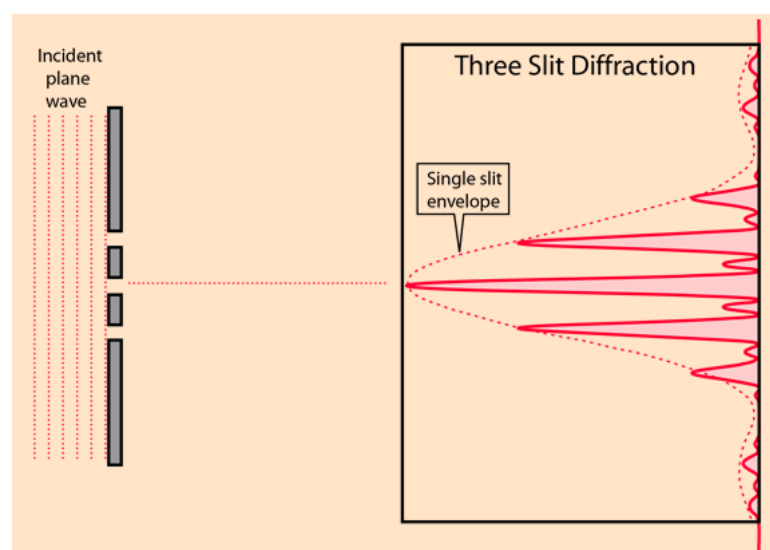


Figura 23 – Padrão de difração da luz por 3 fendas.
Fonte: [16]

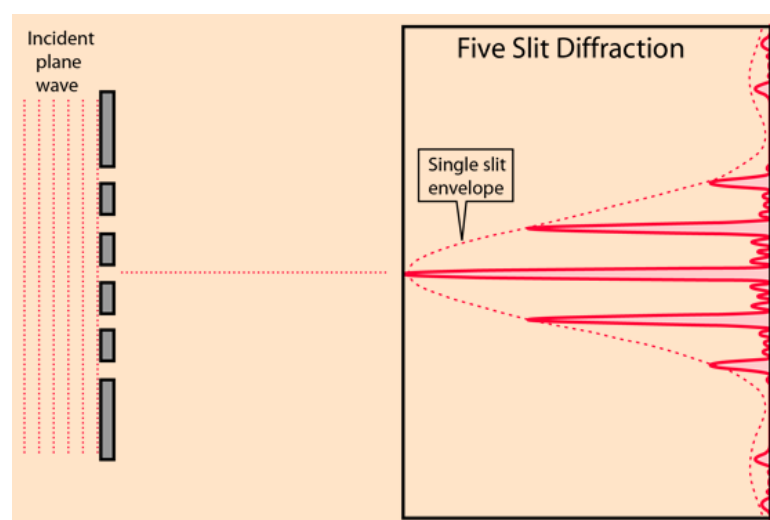


Figura 24 – Padrão de difração da luz por 5 fendas.
Fonte: [16]

4 Materiais e montagem do equipamento

Foi realizado um amplo estudo bibliográfico sobre o uso do Arduino na aquisição de dados em experimentos de física, afim de produzir um produto educacional inovador com o uso dessa tecnologia. Foram estudados a programação e montagem de circuitos com o mesmo, e especialmente sobre os principais elementos do circuito que compõem o aparato experimental, quais sejam: Sensor de luminosidade LDR e motor de passos. Assim, primeiramente foi montado um protótipo do equipamento, com o uso de uma sucata de uma impressora a jato de tinta, visto que estas impressoras possuem um motor que faz movimentar um carrinho com os cartuchos, e pôde-se, portanto, fazer o primeiro protótipo, apresentado na Fig. 25.

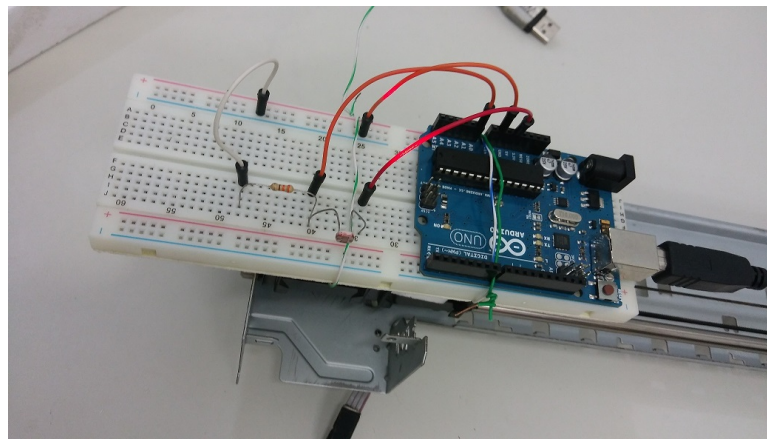
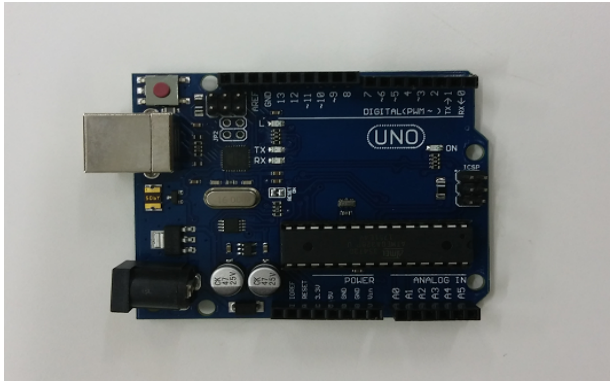
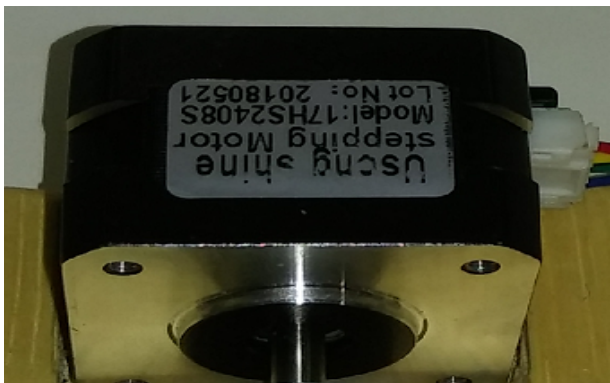
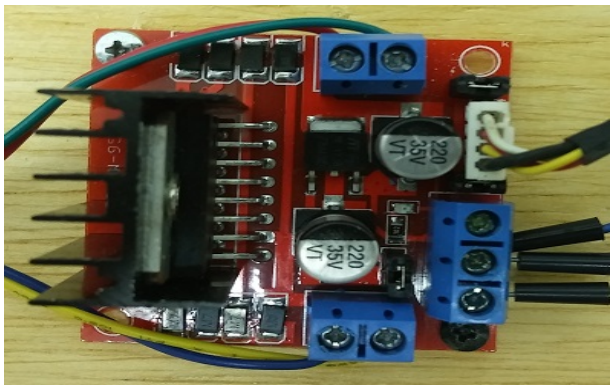


Figura 25 – Protótipo do experimento com utilização do Arduino Uno, Sensor LDR e trilho de impressora com motor de passos.

Fonte: Os autores

O protótipo funcionou perfeitamente, porém, para ter maior precisão nas medidas de posição, optou-se pela utilização de um fuso de rosca trapezoidal, pois esses permitem movimento linear totalmente controlado, e são amplamente utilizados em máquinas que exigem grande precisão de posicionamento, como CNC's (Computer Numeric Control ou Controle Numérico Computadorizado) e outras. Os materiais utilizados no experimento estão listados na Tab. 1.

Descrição do item	Imagem
Arduino Uno: É um microcontrolador que, através do programa gravado em sua memória, faz todo o controle do experimento. Recebe o sinal do sensor, converte e envia os dados para a porta serial, que podem ser visualizados no monitor serial da própria IDE do Arduino, ou acessados por outros programas capazes de estabelecer comunicação serial.	
Módulo sensor LDR (Light Dependent Resistor): É um resistor variável em que sua resistência depende da intensidade de luz que incide sobre ele. Sua resistência diminui quanto maior for a intensidade luminosa. No Arduino, os valores de luminosidade captados pelo sensor é convertido em números que variam de 0 (maior intensidade) a 1023 (menor intensidade).	
Motor de passos (modelo 17HS2408-S): É um motor elétrico que tem sua rotação controlada, ou seja, é possível controlar sua velocidade angular e o deslocamento angular realizado como múltiplo do deslocamento unitário (1 passo). Neste modelo, cada passo tem $1,8^\circ$, precisando assim de 200 passos para uma rotação completa. Para seu funcionamento é necessário um driver para ligação.	
Driver Motor Ponte H L298n: É um Driver para controle de cargas indutivas como relés, motores DC e motores de passo. É baseado em um chip do tipo L298n, e faz a interface entre a placa Arduino e o motor de passo, controlando sua velocidade e rotação.	

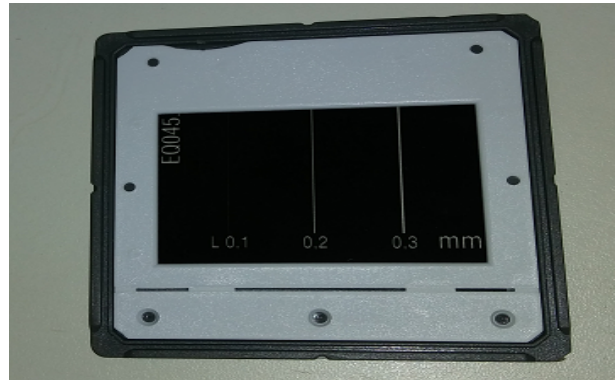
Fuso de rosca trapezoidal: É uma barra reta formada por roscas e passos contínuos com um ângulo de 30° . Esse dispositivo é usado na execução de quase todos os processos e aplicações industriais que exigem um movimento linear (na vertical ou horizontal) e de posicionamento [17]. O fuso utilizado tem comprimento de 60 cm, é do tipo TR8, e provoca um deslocamento linear de 8mm a cada rotação completa.



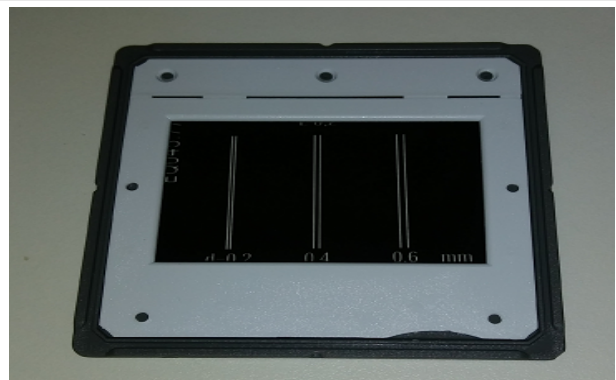
Laser: Para os experimentos podem ser utilizados lasers comuns, como os laser de diodo obtidos facilmente em lojas de eletrônica, brinquedos, ou mesmo livrarias, a um custo baixíssimo. Porém, os laser de diodo possuem menor qualidade que os lasers a gás, pois estes apresentam maior coerência. Por isso utilizamos neste projeto um laser de gás Hélio e Neônio (HeNe) da marca Cidepe (disponibilizados pela universidade), de comprimento de onda 600-700nm, apresentado na figura ao lado.



Fenda Simples: Placa com 3 fendas simples da marca Cidepe, com larguras de 0,1mm, 0,2mm e 0,3mm, utilizadas nos experimento de fendas simples deste trabalho. O usuário pode também construir suas próprias fendas. Em [18] é apresentado um método de impressão em folito (filme fotográfico) para confecção de fendas diversas.



Fendas Duplas: Placa com 3 fendas duplas da marca Cidepe. Todas as fendas tem largura de 0,2mm, porém, a distância entre as fendas são de 0,2mm, 0,4mm e 0,6mm.



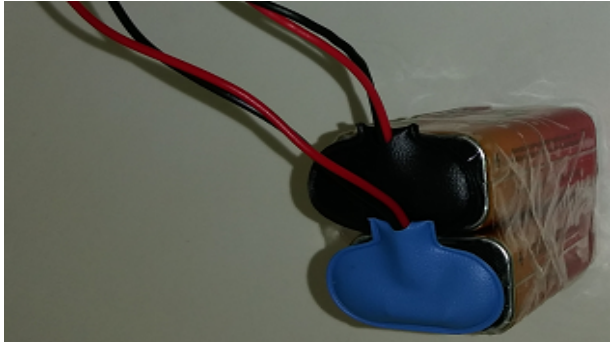
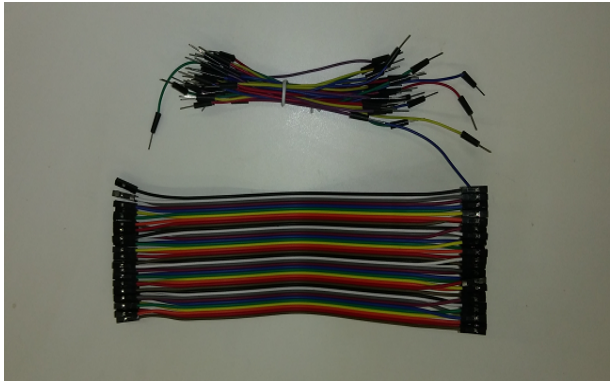
Baterias: Devido a alta potência do motor de passos, a alimentação deste deve ser feita por uma fonte externa. Nos experimentos deste trabalho, foram utilizados 2 baterias de 9V ligadas em paralelo. É importante salientar que: o usuário deve ler as especificações do motor e do driver que estiver utilizando, para que possa fornecer a tensão elétrica adequada; e quanto maior o número de baterias em paralelo o usuário utilizar, o motor terá melhor funcionamento, pois disporá de mais potência. Assim, recomenda-se a utilização de no mínimo 2 baterias.	
Conexões Elétricas: Foram utilizadas conexões elétricas do tipo macho e do tipo fêmea (figuras ao lado) para conexão dos elementos. Deve-se procurar conexões compatíveis com os bornes da placa Arduino e protoboard, encontradas facilmente em lojas do ramo.	

Tabela 1 – Descrição dos materiais utilizados no experimento

A montagem do aparato foi realizado sobre uma tábua, e consistiu em fixar o motor de passos no fuso de rosca trapezoidal, para que assim, pudesse movimentar a protoboard com o sensor LDR, e fazer a varredura das intensidades de luz nos padrões de difração gerados. O fuso utilizado faz o conjunto percorrer a distância de 8mm a cada rotação do motor, assim, com o controle do motor de passos via Arduino, foi determinado a distância entre cada medida feita pelo sensor LDR, gerando um conjunto de pontos de distância x intensidade ao longo dos padrões de difração gerados. O aparato completo é mostrado na Fig. 26

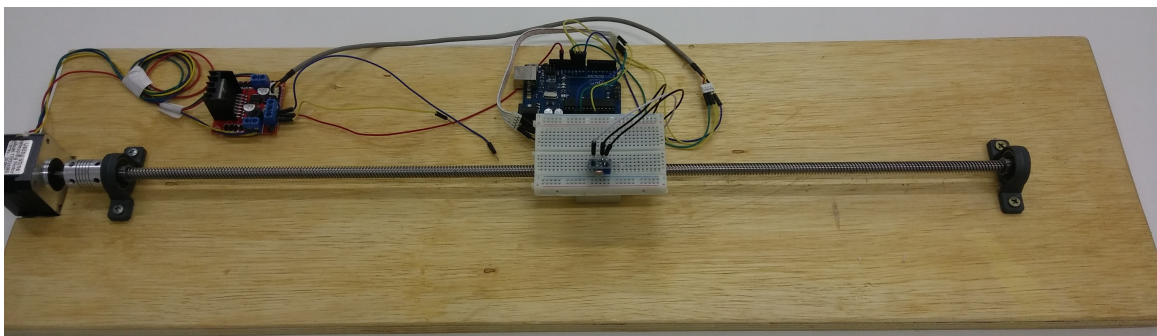


Figura 26 – Aparato experimental utilizado nas medidas.
Fonte: Os autores

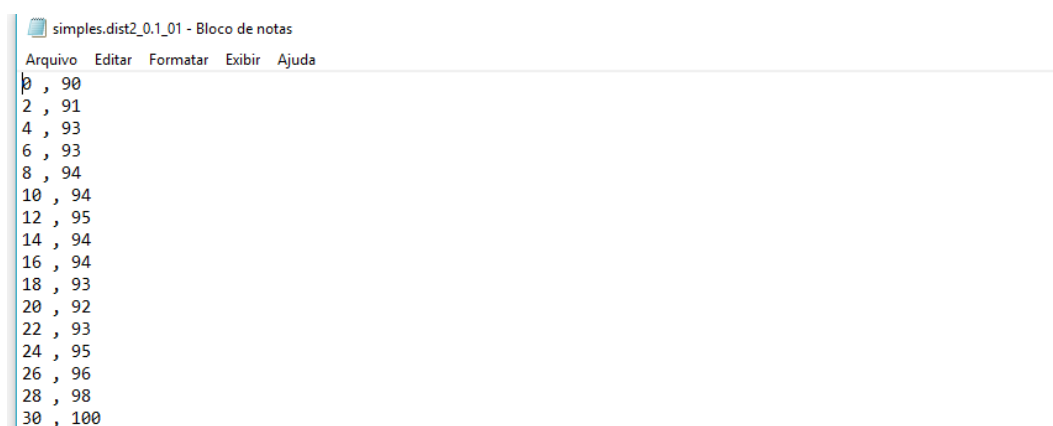
Para gerar as figuras de difração a serem medidas, pode ser utilizado um laser diodo comum juntamente com objetos como fio de cabelo, grafite, e fendas de variados tipos. Durante a pesquisa foram utilizados e testados diferentes lasers e objetos para formação das figuras de difração, porém, nos resultados experimentais que serão apresentados neste trabalho, foi utilizado um laser HeNe vermelho, marca Cidepe, pois os lasers a gás apresentam maior coerência que os lasers a diodo, e assim, apresentam padrões de difração mais nítidos que os lasers comuns. Foram utilizados também um conjunto de 3 fendas simples com diferentes larguras, e outro com 3 fendas duplas (com fendas de mesma largura e diferentes distâncias entre elas). Desta forma, foram realizadas vários testes e medidas, todas obedecendo as condições da difração de Fraunhofer, para que os resultados pudessem ser analisados segundo as equações apresentadas no capítulo anterior. Para formação dos padrões, o laser deve ser projetado sobre a (s) fenda (s), conforme mostrado na Fig. 27, ajustando a posição de maneira que em uma tela de observação, seja formado um padrão nítido de difração.



Figura 27 – Demonstração do laser HeNe incidindo sobre a fenda para geração do padrão de difração

Fonte: Os autores

Foi feito o programa na IDE do Arduino para controle de todo o experimento. Mas, primeiramente, realizou-se um teste para verificar a precisão dos deslocamentos que o motor de passos através do fuso de rosca trapezoidal imprime no conjunto protoboard-sensor LDR. No fuso utilizado, a cada volta completa do motor (que neste caso equivale a 200 passos), há um deslocamento de 8mm no conjunto, portanto, para uma medição de intensidades de 4 em 4 milímetros, por exemplo, a medição das intensidades pelo sensor LDR deve ser feita a cada 1/2 revolução. Para uma medição de 2 em 2 milímetros o programa deve ser ajustado para medição das intensidades a cada 1/4 de revolução. Os dados de posição versus luminosidade podem ser visualizados em tempo real no monitor serial do próprio Arduino, ou ainda, em qualquer programa capaz de estabelecer comunicação serial com o mesmo. Um exemplo de dados de distância (em mm) x luminosidade obtidos estão mostrados na Fig. 28. Os códigos dos programas utilizados e os circuitos para ligação dos componentes estão apresentados no Apêndice A.



simples.dist2_0.1_01 - Bloco de notas	
Arquivo	Editar
Formatar	Exibir
Ajuda	
0	, 90
2	, 91
4	, 93
6	, 93
8	, 94
10	, 94
12	, 95
14	, 94
16	, 94
18	, 93
20	, 92
22	, 93
24	, 95
26	, 96
28	, 98
30	, 100

Figura 28 – Uma parte dos dados obtidos em um dos experimentos realizados

Fonte: Os autores

Para fazer análise dos dados, foi utilizado uma rotina feita em Python, desta forma, os dados são gravados, e é gerado o gráfico da curva experimental com os pontos obtidos. Assim, permitem a visualização simultânea (ou posterior com a utilização dos dados gravados) dos resultados do experimento.

Foi construído ainda outro programa em Python para simulação teórica dos resultados, de acordo com as características dos equipamentos utilizados no aparato e as configurações do experimento, tais como; distâncias envolvidas, largura da(s) fenda (s), distância entre as fendas (quando foi caso). Desta forma, pôde-se atestar a qualidade das medidas realizadas, e o quanto as mesmas estão próximas dos modelos teóricos que embasam este trabalho.

5 Alguns resultados experimentais obtidos com o aparato

5.1 Fenda simples

Nestes experimentos, foram realizadas medidas da intensidade em função da posição de padrões de difração obtidos ao passar o feixe de laser por três fendas simples, de larguras: 0,1 mm, 0,2 mm e 0,3mm. Em todos estes experimentos a distância do laser até a fenda foi de 3 metros, e a distância da fenda até o sensor LDR foi de 3,5 metros.

Ao fazer o experimento, o sensor varreu os padrões com medidas da luminosidade a cada 2 mm, os dados são gravados em arquivo do tipo CSV, e o gráfico da distância x intensidade é construído com os mesmos utilizando o Python. Os padrões de difração produzidos e seus respectivos gráficos, obtidos nos experimentos com as fendas simples, estão ilustrados nas Fig. 30 a Fig. 35. Observe que com o alargamento da fenda, há o estreitamento da largura dos padrões de difração gerados, bem como o aumento no número de franjas claras.

Foi feito também um programa em Python para simulações de padrões de difração de N-fendas quaisquer, utilizando as equações de distribuição de intensidades da difração de Fraunhofer, e assim, fazer as previsões dos resultados esperados em cada experimento. Apresentamos na Fig. 29 o gráfico referente à simulação do resultado para o experimento com a fenda simples de 0,1mm, utilizando o comprimento de onda do laser, as mesmas distâncias envolvidas, e a mesma intensidade máxima I_0 obtida no experimento. As análises dos dados com os tratamentos teóricos e experimentais estão sendo aprimorados para publicação de artigo.

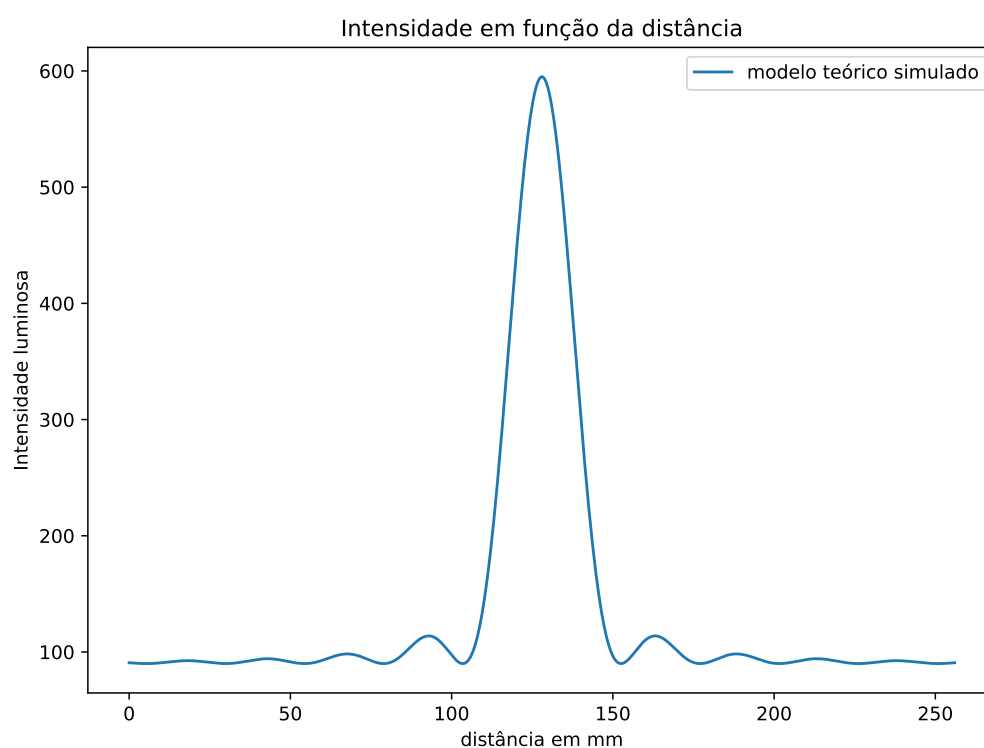


Figura 29 – Gráfico de simulação do experimento com fenda simples de largura 0,1 mm.
Fonte: Os autores

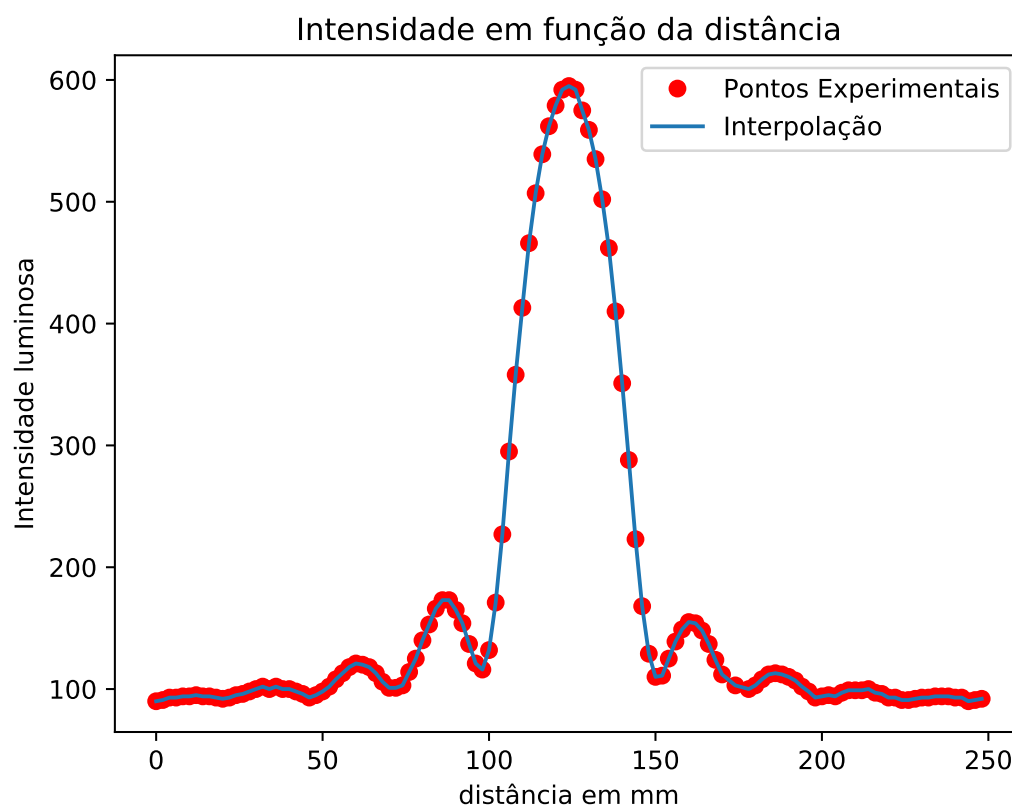


Figura 30 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,1 mm.
Fonte: Os autores



Figura 31 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,1
Fonte: Os autores

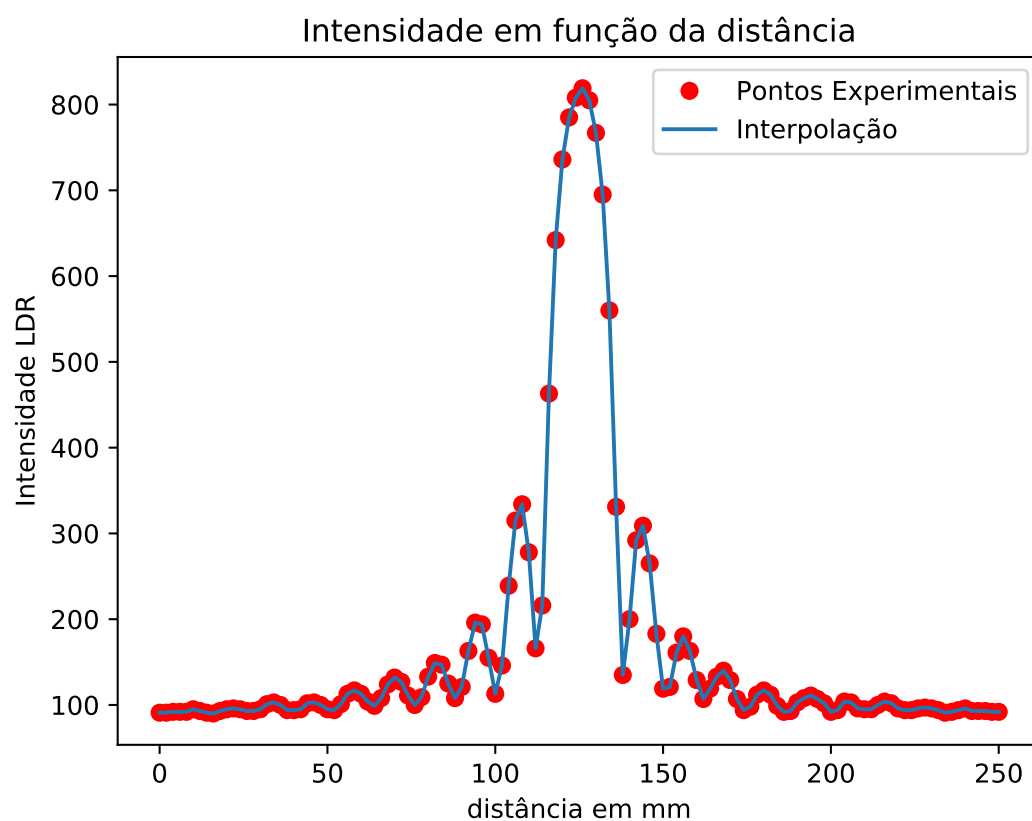


Figura 32 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,2 mm.
Fonte: Os autores



Figura 33 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,2
Fonte: Os autores

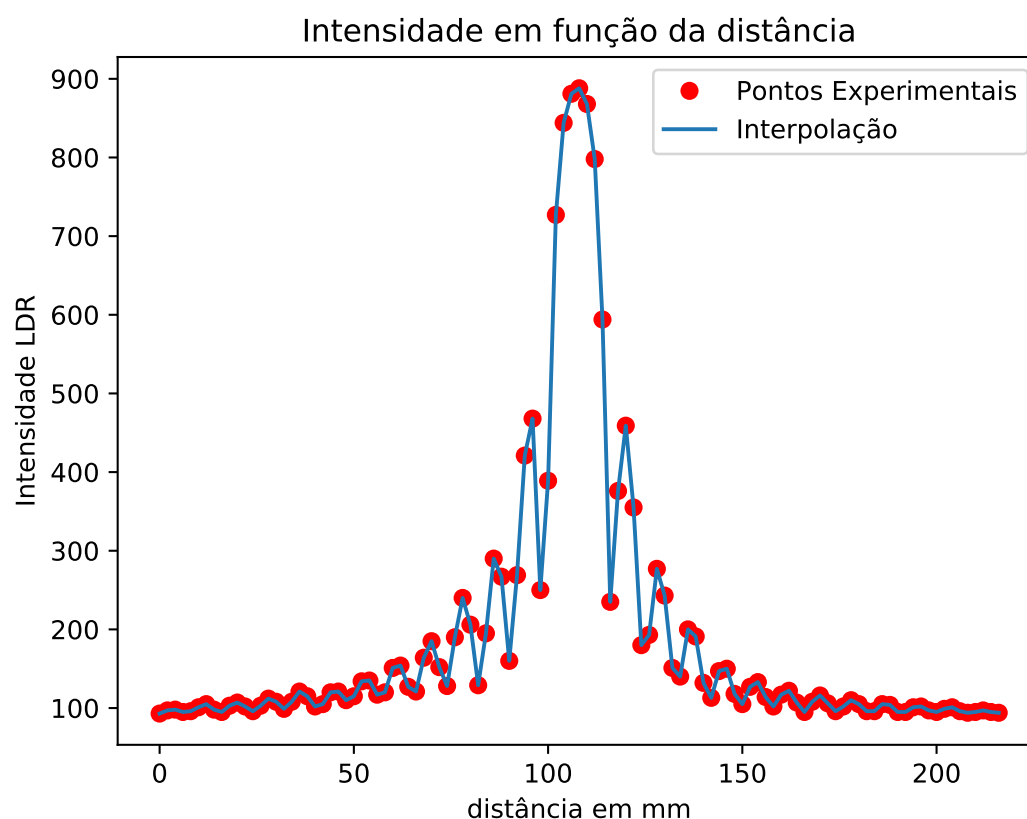


Figura 34 – Gráfico de experimento com fenda simples de largura 0,3 mm.

Fonte: Os autores

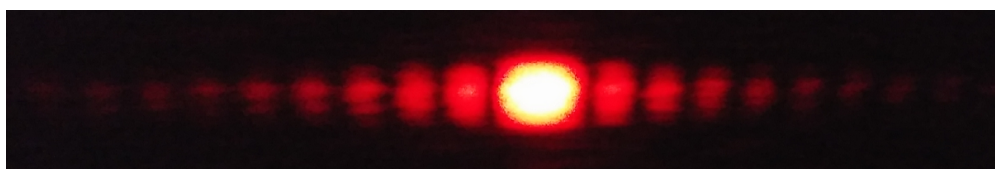


Figura 35 – Padrão de difração gerado em experimento com fenda simples de largura 0,3

Fonte: Os autores

Os padrões de difração produzidos e seus respectivos gráficos estão de acordos com os encontrados na literatura [10], [9], [11], [19], como mostrado no referencial teórico, principalmente no que diz respeito à posição dos pontos de máximo e mínima intensidade. No entanto, observa-se nos gráficos que, mesmo obedecendo as condições da difração de Fraunhofer (caso em que as franjas escuras tem intensidade igual a zero), há uma pequena elevação do gráfico nos pontos de mínima intensidade (franjas escuras), isso acontece devido ao sensor LDR ter uma largura de 5mm, o que ocasiona uma pequena sobreposição de luminosidade das franjas vizinhas à medida que as franjas se tornam mais próximas.

5.2 Fenda dupla

Nestes experimentos, foram realizadas medidas da intensidade em função da posição de padrões de difração obtidos com dois pares de fendas duplas. Em todas elas a largura a das fendas é 0,2 mm, e a distância d entre as fendas são: 0,2 e 0,4mm. A distância do laser até a fenda foi de 3 metros, e a distância da fenda até o sensor LDR foi de 3,5 metros. Os gráficos mostrados correspondem aos padrões de difração produzidos, e estão de acordo aos encontrados na literatura [10], [9], [11], [19], principalmente sobre as posições dos pontos de máxima e mínima intensidade. Porém, há uma elevação do gráfico nos pontos de mínima intensidade (franjas escuras), devido as franjas claras estarem mais próximas entre si.

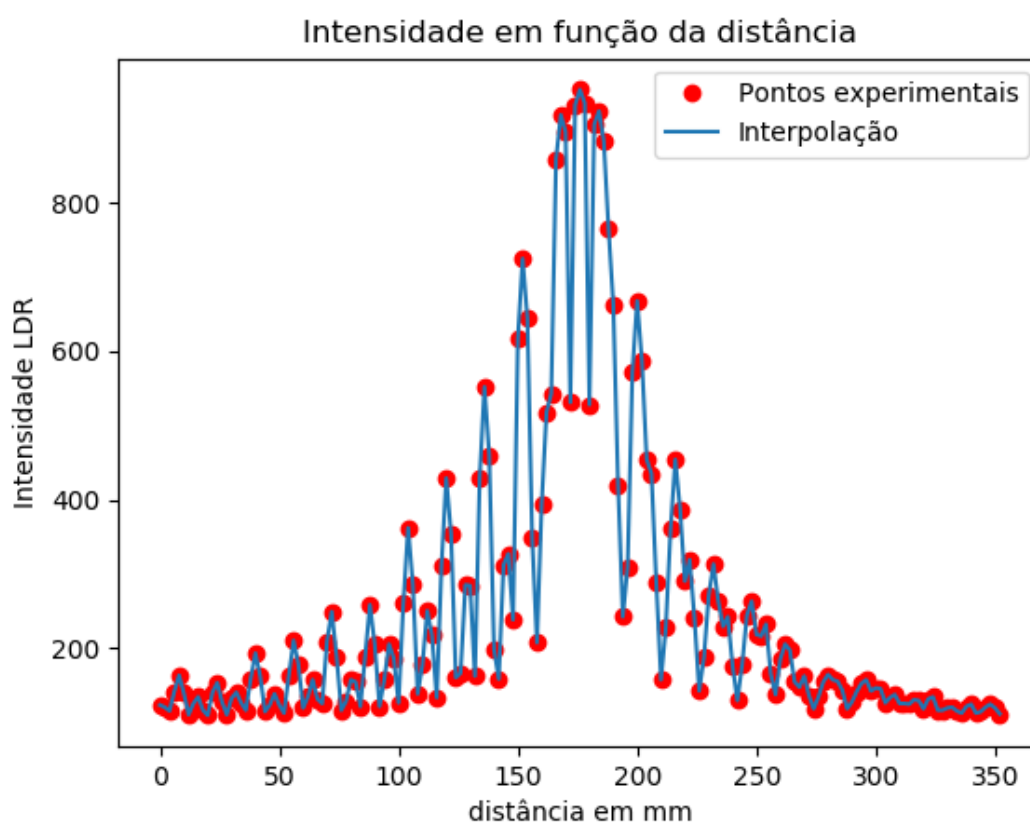


Figura 36 – Gráfico de experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,2 mm entre elas

Fonte: Os autores



Figura 37 – Padrão de difração gerado em experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,2 mm entre elas

Fonte: Os autores

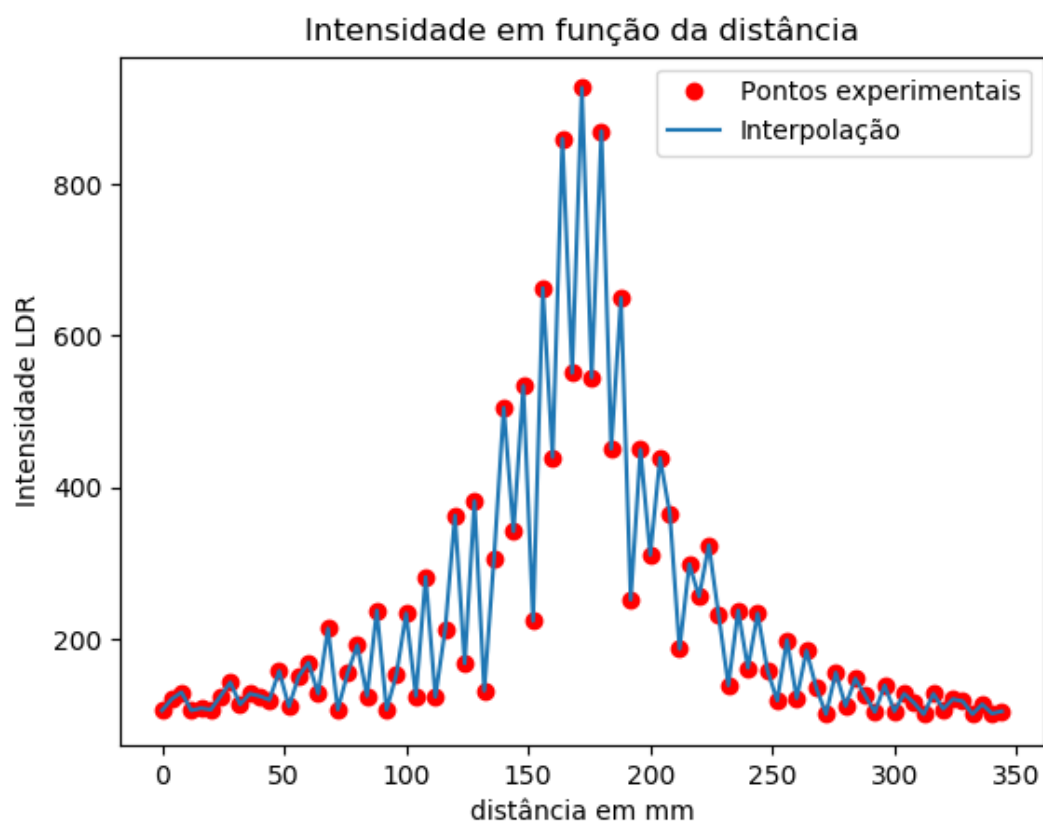


Figura 38 – Gráfico de experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,4 mm entre elas.

Fonte: Os autores



Figura 39 – Padrão de difração gerado em experimento com duas fendas de largura 0,2 mm e distância de 0,4 mm entre elas

Fonte: Os autores

6 Considerações Finais

O principal objetivo deste manual foi apresentar a construção de um produto educacional inovador, que oferecesse uma alternativa para a melhor inserção e exploração dos conteúdos de óptica ondulatória no ensino Médio (podendo também ser utilizado no Ensino Superior), visto que esses são porta de entrada para a Física Moderna. Assim, foi apresentado um sistema de aquisição automática de dados para atividades experimentais, que pelos resultados produzidos, se mostrou de alta qualidade; com a utilização da placa de prototipagem Arduino-UNO, e a utilização de softwares completamente livres.

Além do manual de montagem do equipamento foi realizada a disponibilização dos scripts dos programas necessários para sua execução, bem como o manual de instalação dos softwares necessários. Foram disponibilizados também dois roteiros com alternativas para utilização do equipamento em sala. Acreditamos que o equipamento pode ajudar a inserir os conteúdos abordados em uma perspectiva que contempla os anseios dos alunos por um ensino mais condizente com a realidade tecnológica que vivem, permitindo aos mesmos perceberem a utilização de computadores, sensores, motor, para realização de tarefas que antes não se via na escola (como a utilização de programação para construção de gráficos), passando a mensagem que o estudo de ciências pode ser mesclado com a utilização de tecnologias modernas.

Sobre a execução dos experimentos, pode-se afirmar que o Arduino, juntamente com o motor de passos e o sensor LDR, é uma opção viável e de boa qualidade para aquisição de dados de fenômenos de difração e interferência. Uma comparação dos resultados obtidos no experimento construído com outros produtos comerciais, mostram que os dados e gráficos obtidos com o Arduino e Python possuem qualidade análogo ou superior a esses produtos. E diferente dos Kits comercializados no mercado, o Arduino possui hardware e software totalmente livres, pode ser utilizado com um grande número de sensores e permite sua adaptação para finalidades diversas e o seu aprimoramento constante, o que fez crescer significativamente o número de trabalhos com essa ferramenta nos últimos anos.

Na execução dos experimentos, pode-se também concluir que são vários os fatores que podem influenciar nos resultados. Um fator que pode ser melhorado e possibilitará medidas mais precisas neste tipo de experimento, são as dimensões do sensor utilizado. O sensor LDR tem 5mm de largura, e portanto, a medida que as franjas tornam-se mais próximas (como em experimentos de muitas fendas, por exemplos), percebe-se em alguma medida a sobreposição de pontos de intensidades diferentes, o que impossibilita uma boa análise. Apresentaremos em breve o equipamento com a utilização de outros sensores.

Por fim, espera-se que este trabalho contribua para as discussões a cerca da inserção de tecnologias no Ensino de Física, e que seja mais uma opção para montagem de laboratórios

didáticos com qualidade e de baixo custo. Acreditamos que o incentivo à instrumentação científica deve ser sempre buscado, e a produção de equipamentos desta natureza seja cada vez mais viável.

Referências

- [1] WHAT IS ARDUINO?. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 14 nov. 2018. Citado na página 10.
- [2] CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com arduino para iniciantes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 33, n. 4, p. 4503–4503, 2011. Citado na página 10.
- [3] INTRODUÇÃO AO ARDUINO. Disponível em: <<http://www.gerunicamp.com.br/wp-content/uploads/2016/08/Apostila-GER.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018. Citado na página 10.
- [4] THOMSEN, A. *O que é Arduino*. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-arduino/>>. Acesso em: 23 nov. 2018. Citado na página 10.
- [5] JUSTEN, A. *Curso de Arduino*. Disponível em: <<http://cursodearduino.com.br/apostila/apostila-rev4.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2018. Citado na página 11.
- [6] RODRIGUES, R. F.; CUNHA, S. L. S. Arduino para físicos: Uma ferramenta prática para aquisição de dados automáticos. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, v. 25, n. 4, 2014. Citado na página 11.
- [7] WHAT IS PYTHON? EXECUTIVE SUMMARY. Disponível em: <<https://www.python.org/doc/essays/blurb/>>. Acesso em: 25 nov. 2018. Citado na página 16.
- [8] PYTHON: O QUE É? POR QUÊ USAR? Disponível em: <<http://pyscience-brasil.wikidot.com/python:python-oq-e-pq>>. Acesso em: 26 nov. 2018. Citado na página 16.
- [9] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física*, v. 4 *Óptica e Física Moderna*. Rio de Janeiro: Editora SA, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 21, 24, 48 e 49.
- [10] HECHT, E. *Optics*. 5. ed. [S.l.]: Pearson, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 35, 48 e 49.
- [11] NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica*, v. 4 *Óptica e Física Moderna*. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 21, 48 e 49.
- [12] HUYGENS'S PRINCIPLE. Disponível em: <<http://www.ipodphysics.com/huygen-principle.php>>. Acesso em: 10 out. 2018. Citado na página 23.

- [13] KAPOOR, R. *INTERFERENCE*. Disponível em: <<http://www.rakeshkapoor.us/ClassNotes/classnotes>>. Acesso em: 10 mar. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 31.
- [14] SERWAY, R. A. *Física 3: Eletricidade, Magnetismo e Ótica*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. Citado na página 25.
- [15] DAVIS, C. L. *Single Slit Diffraction*. Disponível em: <http://www.physics.louisville.edu/cldavis/phys299/notes/lo_ssdiffraction.html>. Acesso em: 30 nov. 2018. Citado na página 33.
- [16] HYPERPHYSICS. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>>. Acesso em: 10 mar. 2019. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 37.
- [17] FUSO DE ROSCA TRAPEZOIDAL. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC043/Prof.Walter_Kapp/PrAcesso>. Acesso em: 10 out. 2018. Citado na página 40.
- [18] GOMES, P. M. *Experimentos de Óptica – Com ênfase na Física Contemporânea e Ondulatória*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2018. Citado na página 40.
- [19] TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros: Eletricidade e magnetismo, óptica*. vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.
- [20] CONTROLE DE MOTOR DE PASSOS COM A PONTE H L298N. Disponível em: <<https://www.arduinoecia.com.br/2014/08/ponte-h-l298n-motor-de-passo.html>>. Acesso em: 02 fev. 2018. Citado na página 58.
- [21] MACIEL, A. *Difração da luz: fenda simples*. Disponível em: <<https://alexandremaciel.wordpress.com/ensino/protocolos-das-praticas-experimentais/oti02-difracao-da-luz-fenda-simples/>>. Acesso em: 20 nov. 2018. Citado na página 60.

Apêndices

APÊNDICE A – Programas e Circuitos

A.1 Programa Arduino

```
//PROGRAMA ARDUINO PARA MEDIDAS DE INTENSIDADE LUMINOSA EM FUNÇÃO
DA DISTÂNCIA EM PADRÕES DE DIFRAÇÃO/INTERFERÊNCIA
```

```
//=====
```

```
#include <Stepper.h> //chama a biblioteca Stepper
```

```
const int stepsPerRevolution = 200; //ajusta o número de passos por revolução, de acordo
com o motor utilizado
```

```
Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8, 9, 10, 11); // inicializa a biblioteca Stepper nos
pinos de 8 a 11
```

```
//=====
```

```
void setup() // Inicia aqui a parte de configuração que será executado uma única vez
```

```
{
```

```
myStepper.setSpeed(10); //define a velocidade do motor em 10 rpm:
```

```
Serial.begin(9600); // inicializa a porta serial
```

```
} //Finaliza a parte de configuração
```

```
//=====
```

```
void loop() // coloque aqui seu código principal, esta parte irá rodar repetidamente
```

```
{
```

```
delay(20000); //faz o programa dar uma pausa de 20.000 ms
```

```
myStepper.setSpeed(10);
```

```
int i=0; // esta variável i marcará a distância percorrida
```

```
while (i<300) //Determina o número de medidas a serem executadas
```

```
{
```

```
int sensorLDR = analogRead(A0); // ler os dados de entrada do sensor LDR na porta A0
```

```
int luminosidade = 1023-sensorLDR;
```

```
Serial.print(i); // imprime o valor de i na serial
```

```
Serial.print (" , "); // imprime a virgula que separa a variável na impressão dos dados
```

```

Serial.println(luminosidade); // imprime o valor da luminosidade
myStepper.step(stepsPerRevolution*0.25); //faz o motor girar 1/4 de revolução, o conjunto
anda portanto 2mm
i=i+2; //o valor de i receberá o incremento de 2 mm para proxima medida.
}

// Essa parte faz o motor girar em sentido contrário e voltar automaticamente a posição inicial
para novas medidas

delay (10000);
myStepper.setSpeed(30); // define nova velocidade de 30 rpm para o motor
myStepper.step(-stepsPerRevolution*31); // O motor gira no sentido contrário fazendo o
conjunto voltar a posição inicial
delay(20000); //espera de 20000 ms

} //end loop
//=====

```

A.2 Modelo de programa em python para geração de gráficos tendo salvo um arquivo txt com os pontos

```

#Programa para gerar os gráficos dos padrões de interferência/difração obtidos#

import matplotlib.pyplot as plt #importa a biblioteca matplotlib
import numpy as np #importa a biblioteca numpy

x, y = np.loadtxt('nomedoarquivo.txt', delimiter= ',', unpack=True) #define (x, y) como os
pontos contidos no arquivo

plt.plot(x,y,'ro', label='Pontos Experimentais') #plota os pontos experimentais
plt.plot(x,y, label='Interpolação') #plota a curva que liga os pontos

plt.xlabel('distância em mm') #nomeia o eixo x
plt.ylabel('Intensidade luminosa') #nomeia o eixo y
plt.title('Intensidade em função da distância') #nomeia o gráfico

plt.legend() #para que apareça as legendas definidas nas plotagens

```

plt.show() #para que o programa mostre o gráfico

A.3 Esquema de ligação do Módulo sensor LDR e do Motor de passos

A ligação do módulo sensor LDR é simples e é feita com a conexão do mesmo diretamente na placa Arduino (com a utilização da protoboard). Com o sensor acoplado à protoboard, faça a ligação apresentada na Fig. 40 conexão.

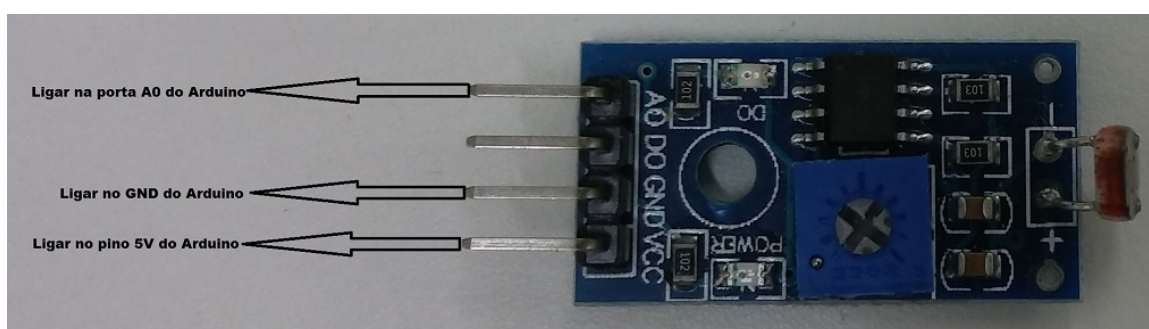


Figura 40 – Esquema de ligação do Módulo sensor LDR

A ligação do motor de passos é feita com o auxílio do Driver motor ponte H, e sua alimentação não pode ser feita diretamente pela placa Arduino, pois esta não consegue fornecer a potência que o motor precisa. Assim, para alimentação do conjunto, são utilizadas baterias ou mesmo fontes de alimentação. O esquema de ligação está disposto na Fig. 41. Veja que os bornes IN1, IN2, IN3 e IN4 do Driver ponte H estão conectados nas entradas digitais 8, 9, 10 e 11 da placa Arduino, respectivamente.

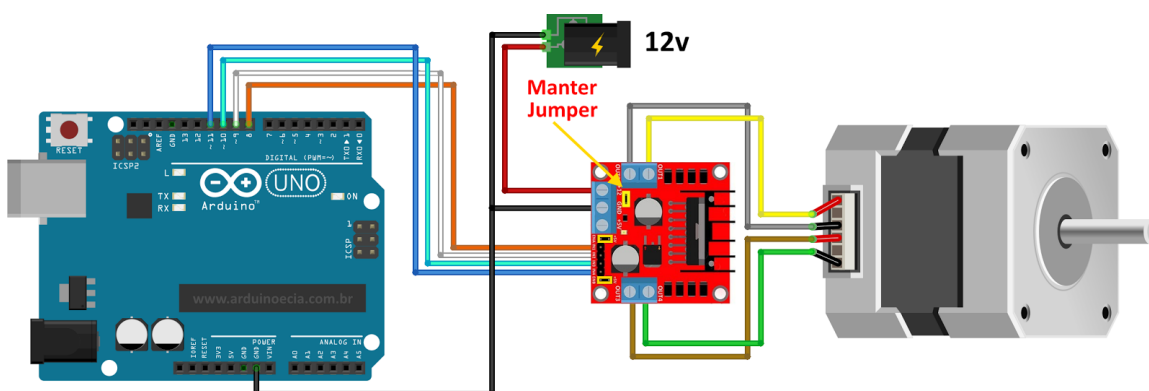


Figura 41 – Esquema de ligação do motor de passos com o Driver motor ponte H
Fonte: [20]

APÊNDICE B – Modelo de roteiro experimental para utilização do equipamento no Ensino Médio

ROTEIRO EXPERIMENTAL

B.1 Experimento 1: Medindo o comprimento de onda de um laser

OBJETIVOS

- Observar o padrão de difração de um laser ao passar por uma fenda simples;
- Utilizar o fenômeno da difração por uma fenda para calcular o comprimento de onda de um laser.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Um laser;
- Uma fenda simples de largura conhecida;
- Um anteparo de cor clara (de preferência branco);
- Uma trena.

PROCEDIMENTOS

- Fixe bem o laser apontando-o para a fenda simples;
- Fixe a fenda simples a uma distância de 10cm a 100cm do laser, tomando cuidado para que ela fique em uma posição perpendicular ao mesmo;
- Coloque o anteparo a uma distância de 2 a 3m da fenda, para que o laser tendo passado pela fenda, incida sobre ele;
- Ligue o laser e faça passar o feixe luminoso pela fenda simples;
- Descreva o que você consegue observar no anteparo;

- Sabendo que a posição das franjas escuras para difração da luz por uma fenda simples é dada pela equação B.1,

$$a \sin \theta = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots (\text{franjas escuras}) \quad (\text{B.1})$$

Onde,

a é a largura da fenda;

θ é o ângulo entre a linha que liga a fenda ao centro da franja central e a linha que liga a fenda às franjas escuras;

m é a numeração da franja escura que se está analisando, ou seja, para $m = 1$ tem-se a primeira franja escura, para $m = 2$ tem-se a segunda franja escura, e assim sucessivamente;

λ é o comprimento de onda do laser utilizado;

- Faça o cálculo do comprimento de onda do laser que você está utilizando para pelo menos a primeira e a segunda franja escura ($m = 1$ e $m = 2$). (Dica: para calcular o seno do ângulo θ , utilize a trena para medir as distâncias necessárias). Veja a Fig. 42

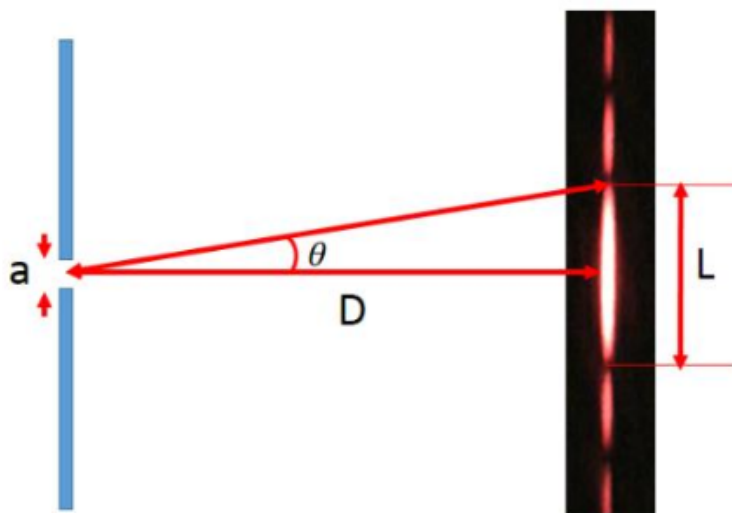


Figura 42 – Diagrama esquemático da difração por uma fenda simples

Fonte: [21]

B.2 Experimento 2: A distribuição de intensidades em padrões de difração em fendas simples e fendas duplas

OBJETIVOS

- Reconhecer as distribuições de intensidades de padrões de difração de fendas simples e fendas duplas;

- Entender alguns parâmetros que influenciam nestas distribuições.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Um laser;
- Uma grade com 3 fendas simples com larguras de: 0,1mm, 0,2mm e 0,3mm;
- Uma grade com 3 fendas duplas com larguras das fendas 0,2mm e distâncias entre as fendas de: 0,2mm, 0,4mm e 0,6mm;
- Um anteparo de cor clara (de preferência branco);
- Um equipamento para medições de intensidade luminosa composto por: Placa Arduino, motor de passos, sensor LDR, fuso de rosca trapezoidal, protoboard.
- Um computador.

PROCEDIMENTOS

- Fixe bem o laser apontando-o para a grade com as fendas;
- Fixe a grade com a fenda simples a uma distância de 10cm a 100cm do laser, tomando cuidado para que ela fique em uma posição perpendicular ao mesmo;
- Coloque o equipamento para medições de intensidade luminosa a uma distância de 2 a 3m da fenda;
- Ligue o laser e faça passar o feixe luminoso pela fenda simples de 0,1mm, utilize o anteparo para verificar se o padrão de difração formada está nítido e simétrico;
- Ajuste a altura do equipamento de forma que o sensor LDR ao percorrer o padrão de difração formado, passe por todas as franjas do mesmo;
- Verifique se o conjunto com o sensor LDR está no início do fuso, e o sensor no início do padrão difrativo a ser medido; - Ligue a placa Arduino do equipamento ao computador;
- Execute o programa Python para visualização dos dados e gráficos de posição x intensidade obtidos no experimento;
- Repita as medições para as outras fendas simples e para as fendas duplas.
- Diante dos gráficos obtidos, o que você pode afirmar sobre as intensidades na difração da luz por uma fenda simples? Em que a largura da fenda influenciou os resultados?

- Sobre as intensidade na difração da luz por fendas duplas, quais as diferenças e semelhanças

em relação aos resultados obtidos nas fendas simples? Em que a distância entre as fendas influenciou os resultados?

- Observando as diferenças entre os resultados obtidos com as fendas simples e com as fendas duplas, o que você poderia afirmar sobre a difração com 3 ou mais fendas?
