

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

ALDO ALBERTO CÂMARA MARQUES

A utilização de um simulador como ferramenta Pedagógica para facilitar o ensino da Difração
no Ensino Médio

São Luís – 2021

ALDO ALBERTO CÂMARA MARQUES

A UTILIZAÇÃO DE UM SIMULADOR COMO FERRAMENTA PEDAGÓGICA PARA
FACILITAR O ENSINO DA DIFRAÇÃO NO ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional Nacional em Ensino de Física - polo UFMA, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em ensino de Física.

Linhas de Pesquisa: Processo de ensino aprendizagem e tecnologia de informação e comunicação no ensino de Física.

Orientador: Jerias Alves Batista

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Camara Marques, Aldo Alberto.

A utilização de um simulador como ferramenta pedagógica para facilitar o Ensino da Difração no Ensino Médio / Aldo Alberto Camara Marques. - 2021.

176 f.

Orientador(a): Jerias Alves Batista.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Rede - Ensino de Física em Rede Nacional/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

1. Difração. 2. Ensino de Física. 3. Simulador. I. Alves Batista, Jerias. II. Título.

ALDO ALBERTO CÂMARA MARQUES

A utilização de um simulador como ferramenta pedagógica para facilitar o ensino da Difração
no Ensino Médio

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado
Profissional Nacional em Ensino de Física - polo UFMA,
como parte dos requisitos necessários para obtenção do
título de mestre em ensino de Física.

Aprovada em: 23/09/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jerias Alves Batista
Doutor em Física
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Eduardo Moares Diniz
Doutor em Física
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Hênio Henrique Aragão Rego
Doutor em Física
Instituto Federal do Maranhão

Dedicatória

Agradecimentos

Agradeço a Deus primeiramente

Aos meus pais Maria das Graças e Carlos Alberto

Ao meu irmão Railton

A minha esposa Sidiane Nunes

A Universidade Federal do Maranhão

Ao coordenador do curso de Mestrado, Edson Firmino Viana

A Coordenação do curso Mestrado Nacional em ensino de Física

Aos Professores do curso do Mestrado Nacional em Ensino de Física

Ao Professor Jerias Alves Batista, por suas orientações, paciência, disponibilidade e seu grande suporte neste trabalho

Aos colegas da turma de Mestrado pelo incentivo e apoio

Ao Gestor Ronald Cutrim e aos colegas professores da escola CEM ANEXOIII/São Bernardo

RESUMO

A utilização de um simulador como ferramenta pedagógica para facilitar o Ensino da Difração

Qualificação de Mestrado Submetida ao programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Maranhão—UFMA – no Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aldo Alberto Câmara Marques

Orientador: Prof. Dr. Jerias Alves Batista

Durante o processo de ensino o professor sempre encontra muitas dificuldades na sua jornada, seja pelo fato do conteúdo de Física ser muito complexo e de difícil assimilação, seja pelo fato de alunos já estarem muitos desmotivados e eles já vêm com uma ideia que a Física é uma matéria não muito atrativa, abstrata e que é repassada por meio de fórmulas. Diante dessa problemática, o presente trabalho tem como objetivo mostrar que a Física tem muitas aplicações, tanto para a tecnologia ou nos fenômenos naturais e, dessa forma, tornando as aulas mais atrativas e dinâmicas, além disso, também mostrará que a Física está entrelaçada em diversas áreas da ciência. Nesse sentido, o foco desse trabalho é o assunto da Difração, fenômeno Físico de características ondulatórias, assunto este que, por muitas vezes, não é trabalhado nas escolas de Ensino Médio e, quando é visto, é de forma muito resumida. Por isso a importância da aplicação desta pesquisa. A ferramenta pedagógica utilizada para facilitar o desenvolvimento desse conteúdo foi por meio de um software, o qual reproduz diversas simulações de fenômenos ondulatórios. O referencial teórico utilizado para auxiliar o desenvolvimento desta pesquisa é Jerome Brunner, acerca de suas concepções da Teoria cognitivista, nela o ensino se dá de forma ativa e não passiva, o aluno tem grande participação nesse processo. A aplicação deste produto educacional foi desenvolvida na Escola da rede pública CEM ANEXO SÃO CRISTÓVÃO III/ SÃO BERNARDO, com alunos do 2^a ano. Devido a pandemia da Covid-19, a aplicação desta pesquisa se fez toda de forma remota, seguido as normas de distanciamento social estabelecidas pela Organização mundial de Saúde. A utilização deste software tem por finalidade tornar as aulas de Física mais atrativas, a fim de despertar mais interesse no aluno por essa matéria.

Palavras-chave: Ensino de Física, Simulador, Difração

ABSTRACT

During the teaching process, the teacher always encounters many difficulties in his journey, either because the content of Physics is very complex and difficult to assimilate, or because students are already highly motivated and they already come with an idea that Physics is a material that is not very attractive, abstract and that is passed on through formulas. In view of this problem, the present work aims to show that Physics has many applications, both for technology or in natural phenomena and, thus, making classes more attractive and dynamic, in addition, it will also show that Physics is intertwined in different areas of science. In this sense, the focus of this work is the subject of Diffraction, a physical event with undulating characteristics, a subject that, many times, is not worked on in high schools and, when it is seen, it is very summarized. Hence the importance of applying this research. The pedagogical tool used to facilitate the development of this content was through software, which reproduces several simulations of wave phenomena. The theoretical framework used to assist the development of this research is Jerome Brunner, about his conceptions of the cognitive theory, in which teaching takes place in an active and not passive way, the student has great participation in this process. The application of this educational product was developed at the public school CEM ANNEX SÃO CRISTÓVÃO III / SÃO BERNARDO, with 2nd year students. Due to the Covid-19 pandemic, the application of this research was done all remotely, following the rules of social distance established by the World Health Organization. The purpose of this software is to make Physics classes more attractive, in order to arouse more interest in the student in this matter.

Keywords: Physics teaching, simulator, Diffraction

LISTA DE FIGURAS

FIGURA1-página do livro Bonjorno.....	17
FIGURA2 -página do livro Bonjorno.....	17
FIGURA 3 - página do livro KASUITO e FUKU.....	19
FIGURA 4-Página MARIO PIETROCOLA.....	20
FIGURA 5-Página do livro CARLOS MAGNO A. TORRES.....	21
FIGURA 6-Página do livro Alberto Gaspar.....	22
FIGURA 7: página do livro Alberto.....	22
FIGURA 8:página do livro ANA FUKU.....	23
FIGURA 9: Livro ANA FUKU.....	24
FIGURA 10-Propagação de ondas em uma corda esticada.....	41
FIGURA 11- Ilustração para ondas mecânicas.....	43
FIGURA12- Campo Magnético e Campo-a-combinação destes vai gerar ondas eletromagnéticas.....	44
FIGURA 13- (a) Ilustração para as ondas quânticas de um elétron dentro de um poço de potencial infinito para o nível de energia fundamental (Energia E_0) e primeiro nível excitado (Energia $4E_0$). (b) Probabilidade de achar o elétron dentro do poço de largura L no nível fundamental e primeiro nível excitado.....	48
FIGURA14-Ilustração para uma onda tipo transversal em uma corda.....	50
FIGURA 15- Ilustração para uma onda tipo transversal em uma mola.....	51
FIGURA 16- Ilustração para uma onda tipo longitudinal no ar. Na figura (a) moléculas estão uniformemente distribuídas. Na figura (b) estão organizadas de forma a evidenciar um padrão regular repetitivo.....	52
FIGURA 17- Elemento de uma corda massa dm na qual a onda se propaga. As forças dos elementos da corda são mostradas.....	54
FIGURA 18- Ilustração para soma de dois vetores girando com velocidades constantes.....	61
FIGURA 19- Interferência de ondas fora de fase por $k\Delta x$ radianos.....	64
FIGURA 20- Interferência de ondas passando por duas fendas.....	66
FIGURA 21 - Análise geométrica da fenda de Young.....	67
FIGURA 22- Fotografia de uma laminar de barbear (esquerda) mostrando a difração nos seus contornos. À direita mostrando a ampliação da borda da sombra.....	70
FIGURA 23 - Ilustração para o Princípio de Huygens.....	71
FIGURA 24-Ilustração para a Difração usando o Princípio de Huygens- Fresnel.....	72
FIGURA 25 - Ilustração para a Difração no limite de Fraunhofer.....	74
FIGURA 26 - Ilustração para a soma de Fasores.....	75
FIGURA 27 - Distribuição de intensidades para ondas difratadas.....	78
FIGURA 28 -Tela de Trabalho para o programa Rippler Tank Simulation.....	80

FIGURA 29 - Conteúdo das funções: Arquivo, Editar e Adicionar.....	80
FIGURA 30- Tipos de ondas e seus ajustes.....	81
FIGURA 31- Ilustração para pontos focais de uma lente e uma superfície parabólica.....	83
FIGURA 32- Ilustração para a difração usando o princípio de Huygens-Fresnel para uma fenda com 500 nm.(a)comprimento de onda de 100 nm. (b) comprimento de onda de 1nm.....	84
FIGURA 33: 1º Momento da ministração da aula, pelo software Google meet.....	94
FIGURA 34: 2º Momento da ministração da aula, pelo software Google meet.....	94
FIGURA 35: Simulação realizada com o software RIPPLE TANK SIMULATION.....	95
FIGURA 36a: respostas das perguntas feitas ao aluno.....	100
FIGURA 36b: respostas das perguntas feitas ao aluno.....	100
FIGURA 36c: respostas das perguntas feitas ao aluno.....	100
FIGURA 36d: respostas das perguntas feitas ao aluno.....	101
FIGURA 36e: respostas das perguntas feitas ao aluno.....	102
FIGURA 37: respostas das perguntas feitas ao aluno.....	102

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1- Percentual de erros e acertos da questão 1.....	96
GRÁFICO 2- Percentual de erros e acertos da questão 2.....	97
GRÁFICO 3- Percentual de erros e acertos da questão 3.....	98
GRÁFICO 4- Percentual de erros e acertos da questão 4.....	99
GRÁFICO 5- Resultado da pergunta 1 do questionário de satisfação.....	102
GRÁFICO 6- Resultado da pergunta 2 do questionário de satisfação.....	103
GRÁFICO 7- Resultado da pergunta 3 do questionário de satisfação.....	103
GRÁFICO 8- Resultado da pergunta 4 do questionário de satisfação.....	104
GRÁFICO 9- Resultado da pergunta 5 do questionário de satisfação.....	105
GRÁFICO 10- Resultado da pergunta 6 do questionário de satisfação.....	106
GRÁFICO 11- Resultado da pergunta 7 do questionário de satisfação.....	107
GRÁFICO 12- Resultado da pergunta 8 do questionário de satisfação.....	108
GRÁFICO 13- Resultado da pergunta 9 do questionário de satisfação.....	109
GRÁFICO 14 Resultado da pergunta 10 do questionário de satisfação.....	110

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 JUSTIFICATIVA.....	16
2.1.1 Coleção Física	16
2.1.2 Coleção: Física Interação e Tecnologia	17
2.1.3 Coleção: Física para o Ensino Médio.....	18
2.1.4 Coleção: Física em contextos	19
2.1.5 Coleção: Física Ciência e Tecnologia	20
2.1.6 Coleção: Compreendendo a Física	21
2.1.7 Coleção Física Ser Protagonista.....	23
2.1.8 Coleção Física aula por aula.....	24
2.2 Identificação da proposta.....	25
2.3 Sobre o Ensino da Física.....	28
2.4 O enfrentamento dos desafios da Física no Ensino Médio.....	30
2.5 A importância da atitude do professor para contornar dificuldades.....	34
3 Referencial Teórico.....	37
3.1 Propostas Educacionais	38
3.2 Psicologia Educacional	40
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	41
4.1 Descrição Física do Problema.....	41
4.1.1 As Ondas e o Ambiente de Propagação	41
4.1.1.1 Ondas Mecânicas	42
4.1.1.2 Ondas Eletromagnéticas	43
4.1.1.3 Ondas Quânticas	46
4.1.2 As Ondas e os Entes Oscilatórios.....	50
4.1.2.1 Ondas Transversais.....	50
4.1.2.2 Ondas Longitudinais.....	51
4.2 Descrição Matemática do Problema	53
4.2.1 Ondas Mecânicas e Eletromagnéticas	53
4.2.2 Ondas Quânticas.....	58
4.3 O Fenômeno da Difração de Ondas	59
4.3.1 Interferência de Ondas	60
4.3.2 A Difração à Luz do Princípio de Huygens-Fresnel	69
4.3.3 Intensidade das Ondas Difractadas	73
4.4 Uso do Software Ripple Tank Simulation como Mediador para o Ensino da Difração ..	78
4.4.1 Instruções básicas sobre a operação do RTS.....	79
4.4.2 Aplicações do RTS	82

5 Sequencia Didática construtivista.....	87
6 Proposta para desenvolvimento de aplicação do produto educacional.....	91
6.1 Descrição das etapas de aplicação do Produto Educacional.....	92
7 Apresentação e discussão dos resultados.....	110
7.1 Análise dos Resultados Obtidos.....	111
7.2 Análise dos resultados obtidos do questionário de Satisfação.....	111
8 Considerações finais.....	113
9 Referências.....	114
Apêndice A.....	118
Apêndice B.....	119
Apêndice C.....	120

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que o modelo utilizado para o ensino de Física no Brasil não tem alcançado o nível satisfatório, haja vista os resultados observados nas últimas avaliações do Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA), um programa da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). É fácil comprovar isto a partir da comparação do rendimento escolar dos estudantes brasileiros com o rendimento de estudantes de dezenas de países de todos os continentes, a partir de uma rápida investigação nos resultados da avaliação de 2018. Uma das possíveis razões para este baixo rendimento está no fato de que os conteúdos da área de Física não são vistos com uma abordagem apropriada para o seu entendimento ou, em grande parte, não são trabalhados durante o semestre letivo nas séries do Ensino médio.

Neste trabalho será desenvolvida uma proposta de ensino para facilitar o aprendizado do conteúdo da difração de ondas. Este assunto deveria ser explorado de forma mais consistente para que o público do Ensino Médio pudesse ver sua importância e conseqüentemente ter mais interesse pela Física no dia a dia. Quase sempre ela é vista como uma disciplina difícil, estressante, e muitas vezes confundida com a Matemática, pelo fato de os professores ministrarem seus conteúdos apenas usando fórmulas matemáticas.

A Física não é trabalhada de forma que a fenomenologia seja bem entendida. Seus conceitos são vistos de maneira muito superficial e de forma abstrata, não sendo possível seu aprendizado se conectar aos subsunçores (conhecimentos prévios) dos estudantes e, portanto, não levando a uma aprendizagem significativa. Assim como no ensino geral da Física, os conceitos de difração são pouco explorados ou, quando muito, repassados de forma resumida e superficial, tal como se encontram nos livros didáticos. Diante dessa problemática, o presente trabalho tem como objetivo elaborar uma metodologia facilitadora da compreensão do conteúdo da difração utilizando um simulador virtual que reproduz cenários relevantes sobre difração.

Na maioria das vezes as aulas de Física são ministradas de maneira expositiva, com ênfase em fórmulas matemáticas, resolução de questões usando apenas a substituição de letras por números. A aferição do conhecimento nas avaliações é feita de forma mecânica, geralmente abordando questões iguais às já resolvidas em sala de aula. Esta metodologia de ensino é ineficaz à medida em que não forma um estudante com capacidades de investigação crítica de sua realidade. Por meio de uma sequência didática investigativa, serão trabalhados alguns conteúdos na parte de ondulatória que são necessários para a compreensão do assunto difração. Como elemento de motivação, será utilizado o simulador virtual de ondas planas denominado *riper tank simulacion*.

A escolha do assunto Difração na elaboração desta pesquisa parte do pressuposto de que o assunto é pouco explorado na sala de aula. Este é um tema bem complexo na área da Física e também possui muitas aplicações no cotidiano. Em geral, o professor encontra dificuldades na execução e transmissão do seu conteúdo. Entretanto, historicamente é assim no processo de ensino e aprendizagem. O professor de Física encontra muitas barreiras no dia a dia da sua sala de aula, sendo as aulas ministradas utilizando a mesma metodologia: o conteúdo é abordado sem explorar suas aplicações, resoluções de problemas por meios de fórmulas, apenas focando a abordagem matemática. Uma matéria da importância da Física - que está presente em quase todos os fenômenos naturais e que nos transmite uma descrição completa do funcionamento do Universo, deveria ser abordada de forma mais contextualizada. Segundo Moreira:

A Física permeia a vida de todos os seres humanos. Ela está na base das Tecnologias de informação e comunicação, da engenharia das técnicas de diagnósticos e tratamentos usados na Medicina. A Física tem modelos e teorias que explicam grande parte do mundo físico que vivemos. Biologia, Química neurociências e outras áreas científicas usam conceitos, princípios, modelos e teorias derivados da Física. Então, aprender física é um direito humano. (Moreira. 2017)

Desta forma, vemos que a Física é a base de muitas outras áreas do conhecimento, sobretudo na ciência. Porém, o que vemos é que os conteúdos da área Física são transmitidos de maneira muito superficial e meramente explicativos, seguindo apenas um roteiro. Podemos ver, claramente, que o método utilizado para ensinar a Física está pautado em apenas repassar os conteúdos, não tem muito a finalidade de que o aluno aprenda de fato a Física; é meramente com o intuito que ele passe de ano, é um ensino mecanizado, baseado apenas na resolução de problemas, somente o prepara para de provas e exames. O aluno apenas coleta aquela informação e ela é processada, o professor apenas leva aquela carga de conteúdo ao aluno. Para Moreira:

Contudo, “mais Física” não significa mais conteúdo a serem decorados, memorizados mecanicamente. É preciso pensar como ensinar esses conteúdos. É preciso dar atenção didática específica, à transferência didática, a como abordar a Física de modo a despertar o interesse, a intencionalidade, a predisposição dos alunos, os sem os quais a aprendizagem não será significativa, apenas mecânica para “passar”. (MOREIRA. 2017)

O professor deve estar nesta busca constante para desenvolver práticas de ensino que estimulem a participação mais ativa dos alunos, deve desenvolver metodologias de ensino mais eficazes, que tornem as aulas mais dinâmicas e prazerosas, desta forma, fazendo com que as

aulas não venham a se tornar aquelas baseadas no ensino tradicional, onde o professor é o protagonista e o aluno apenas um mero receptor das informações transmitidas.

Segundo Libâneo (2017), a pedagogia tradicional caracteriza as concepções de educação onde sobressai a educação massificada, repetição, o acúmulo de conhecimentos, e o que importa é a transmissão do saber passado de geração a geração como se fossem verdades absolutas. O professor é o detentor do saber e o aluno é um ser passivo.

Diante dessa problemática, o presente trabalho tem como objetivo levar uma nova perspectiva ao ensino de Física. No primeiro capítulo foi designado a fazer um apanhado geral de como a difração está abordada nos livros mais usados nas escolas vamos mostrar a importância dos softwares e programas computacionais, a forma como a tecnologia facilita a vida do ser humano e também e auxilia na vida do professor no processo de ensino-aprendizagem. No capítulo seguinte mostraremos as dificuldades enfrentadas pelo professor durante sua jornada de trabalho. No capítulo 3 vamos apresentar as concepções da proposta de ensino aqui apresentas estão baseadas no referencial teórico de Jerome Brunner. Mostraremos que quando seguidas as ideias da teoria cognitiva elas são bem úteis no desenvolvimento de um ensino mais ativo e com uma maior participação dos alunos e uma aula bem mais dinâmica.

No capítulo 4, que está destinado à Fundamentação Teórica, foi feita uma breve pesquisa sobre o conteúdo de ondas e de difração. O capítulo 5 foi destinado a apresentação da Sequência Didática construtivista, que serviu para organizar os conteúdos trabalhados e também para organizar as etapas de aplicação do Produto Educacional. No capítulo 6, temos a descrição completa de cada uma das etapas de desenvolvimento do Produto Educacional. E por fim no Capítulo 7 será exibido uma análise detalhada dos resultados obtidos e também do questionário de satisfação.

2 JUSTIFICATIVA

2.1 Identificação do problema

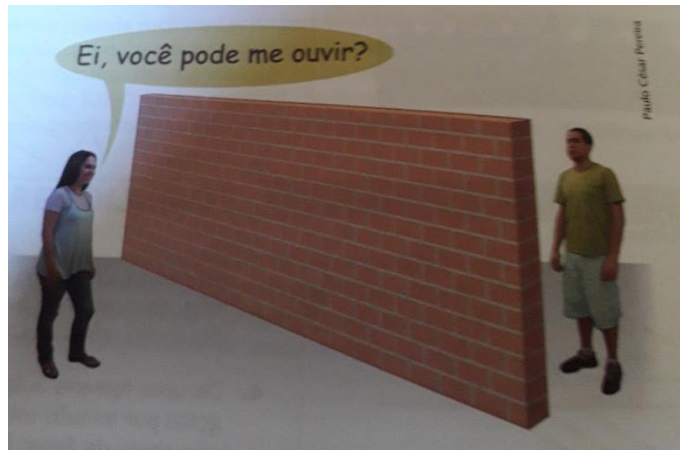
Embora o conceito de difração e os fenômenos decorrentes dela sejam de grande importância no cotidiano, este assunto não é abordado de forma apropriada nos livros aprovados no Plano Nacional do Livro Didático (PNLD). Nesta seção será mostrada como os livros didáticos tratam os assuntos. A partir de uma análise sem muitas minúcias, será identificado o problema tema deste trabalho nesta dissertação, como o objetivo de suprir as falhas identificadas.

2.1.1 Coleção Física

Nesta obra de autoria de Bonjorno *et al.*, (2016), no capítulo 15 os autores descrevem como a difração pode ocorrer no dia a dia. Se referem à difração como “o encurvamento das ondas nas bordas de um obstáculo e de aberturas (fendas) cuja dimensão é da ordem de grandeza do comprimento de onda das ondas”, e ilustram o fenômeno pela Figura 1, na qual duas pessoas conversam separadas por um muro. Os autores também exemplificam na difração ocorrendo na água, descreve que quando as ondas do mar atingem um quebra-mar formado por rochas elas o contornam, sofrendo um desvio na direção de propagação. Isto está ilustrado na Figura 2.

Os autores explicam a difração da seguinte forma: considere uma fonte externa (por exemplo uma régua percutindo levemente a superfície da água) emitindo ondas retas que atinge a fenda (abertura) entre dois obstáculos. Se a largura da fenda for menor ou igual ao comprimento da onda incidente, ela contorna o obstáculo, caso contrário, o contorno será pouco perceptível. O autor também mostra as situações em que a difração ocorre com mais intensidade, através de 2 casos, quando $d < \lambda$ a difração é bastante acentuada e $d > \lambda$ a difração é pouco acentuada. Embora os autores mostrem figuras para ilustrar o efeito da difração, não se verifica explicações sobre as reais causas do fenômeno e nem suas possíveis aplicações. Segundo a visão do autor desta Dissertação, é possível dar a explicação acerca da origem do fenômeno aos alunos do ensino médio, além de explorar melhor as aplicações o dia-a-dia.

Figura 1 - Reprodução da Figura 24 da obra de Bonjorno *et al.*



Fonte: Bonjorno *et al.*

Figura 2 - Reprodução da Figura 25 de Bonjorno *et al*



Fonte: livro Bonjono *et al*

2.1.2 Coleção: Física Interação e Tecnologia

Na Referência (Filho Toscano 2016) os autores abordam a difração no volume II, no capítulo 7, na parte de difração da luz, a qual começa com a pergunta: “o que acontece com um feixe de luz quando atravessa uma abertura muito estreita?”. É mostrado o contexto histórico acerca das teorias feitas sobre a natureza da luz, tanto como onda ou como partícula, mostra também como cada cientista abordava a natureza da luz. Segundo o modelo corpuscular, inicialmente o feixe luminoso vai ficando cada vez mais fino, à medida que o orifício vai diminuindo. Ao atingir um diâmetro muito estreito, observou-se, porém, que o feixe se espalha,

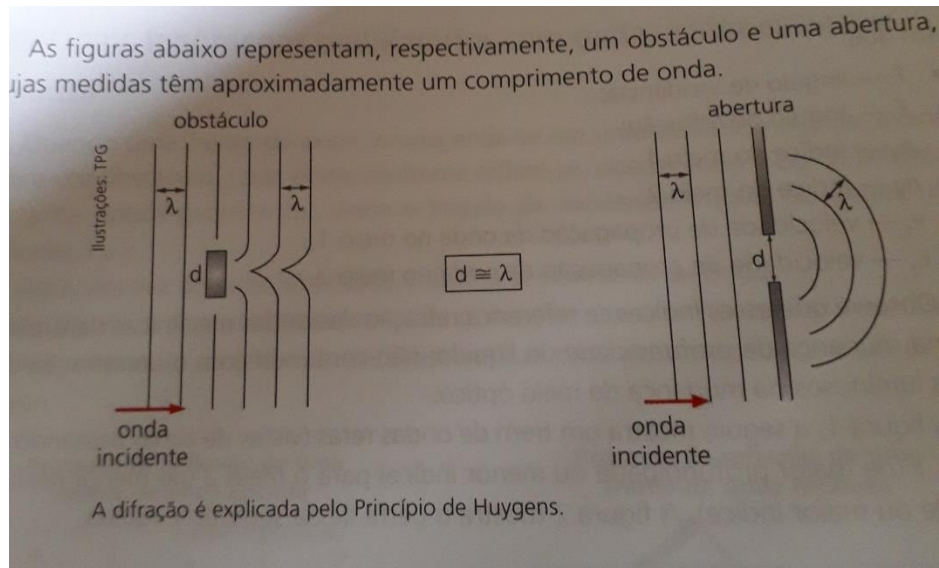
em vez de tornar-se ainda mais fino. No livro, o autor mostra esse fenômeno por meio de figura, e também conclui que a luz não se propaga em linha reta, mas de certa forma contorna obstáculos. O autor traz o questionamento sobre os cientistas que defendiam a tese de Huygens, que tinha um problema: como explicar a formação de sombras por esse modelo? Afinal, se há sombras, significa que a luz não contornou nada, mas se propagou em linha reta, como propunha a teoria corpuscular. Nota-se que a abordagem que os autores fazem do assunto é muito superficial, se limitando a falar quando o fenômeno acontece, mas sem dar detalhes sobre sua origem e as aplicações no cotidiano.

2.1.3 Coleção: Física para o Ensino Médio

Na Referência (KASUITO e FUKU 2017) os autores abordam a difração no volume II, no capítulo 15, na parte de ondas. O autor faz um comentário breve, exemplificando que quando escutamos a voz de uma pessoa que está do outro lado de uma parede é devido ao fenômeno da difração. Aborda também que a difração acontece quando uma onda contorna um obstáculo, em seguida faz o questionamento: Mas por que o som sofre difração e a luz não? Em seguida o livro traz a explicação. A resposta está nas dimensões relativas do muro e dos comprimentos de onda do som e da luz. O muro tem dimensões comparáveis aos comprimentos de onda da onda sonora, e a luz tem comprimentos de ondas muitíssimo menores.

Em seguida os autores explicam que a difração só ocorre quando a dimensão do obstáculo (ou abertura) é comparável à dimensão do comprimento de onda. Continua mostrando duas figuras, uma com uma onda incidente atingindo o obstáculo e outra com uma onda atingindo uma abertura, comparando como seria uma difração ora quando uma onda atinge um obstáculo ora quando essa onda incidente atinge uma abertura ou fenda. Como se observa, as explicações são superficiais, não dando ao estudante a oportunidade de entender qual é a causa do fenômeno, e também não explora as aplicações.

Figura 3 - página da obra do livro KASUITO e FUKU *et al*



Fonte: livro KASUITO e FUKU- *et al*

2.1.4 Coleção: Física em contextos

Na Referência (MARIO PIETROCOLA *et al* 2017) os autores abordam a difração no volume II, no capítulo 12, na parte de ondas sonoras. Nesse exemplar o tema difração está muito pouco comentado, apenas explica que a difração ocorre quando uma onda encontra um obstáculo da mesma ordem de grandeza do seu comprimento de onda e ela pode contorná-lo. Explica também que o fenômeno pode ocorrer com uma fenda, se esta for da mesma ordem de grandeza do seu comprimento de onda. Exemplifica que é dessa forma que podemos ouvir, por exemplo, um vizinho conversando do outro lado de um muro. Logo em seguida mostra a figura de uma pessoa tocando guitarra, e as ondas sonoras da guitarra contornando a parede com uma pessoa sentada em um sofá escutando o som.

Figura 4 - Figura 12.21: Pagina MARIO PIETROCOLA *et al*

Fonte livro: MARIO PIETROCOLA *et al*

2.1.5 Coleção: Física Ciência e Tecnologia

Na Referência (CARLOS MAGNO A. TORRES *et al*, 2017) os autores abordam a difração no capítulo 5, na seção de ondas. O autor começa definindo difração: “é o nome dado à capacidade de uma onda transpor um obstáculo, como objetos ou fendas”, e que esse fenômeno foi observado e estudado pelo Jesuíta Italiano Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), criador do termo difração.

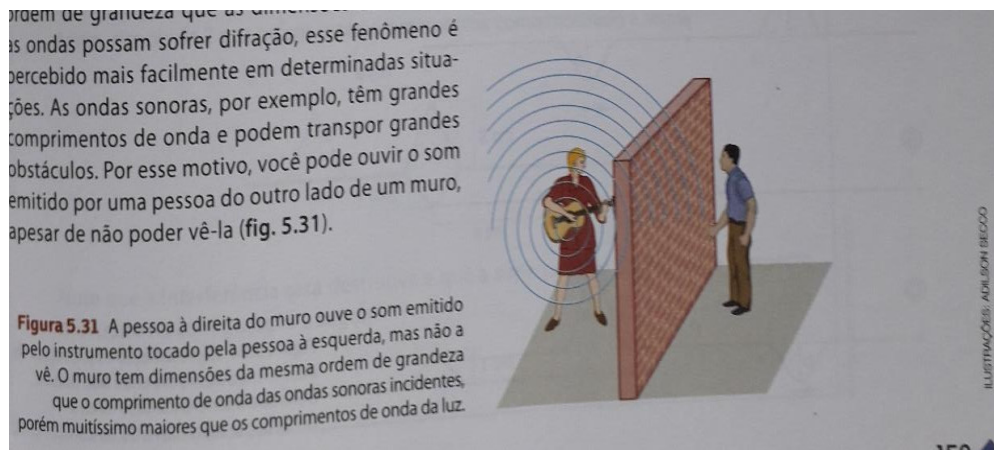
Em 1678, o físico Holandês Cristian Huygens (1629-1695) enunciou um princípio conhecido hoje com princípio de Huygens, para explicar a difração da luz. De acordo com o princípio de Huygens: cada ponto de um meio atingido por uma frente de onda num dado instante comporta-se como uma fonte de onda secundária com as mesmas características da onda que se propaga. A nova frente de onda, num instante posterior a $t + \Delta t$, é determinada pela linha ou superfície que tangencia essa onda.

Assim, a capacidade de uma onda transpor um obstáculo (objeto ou fenda), propagando-se além dele, pode ser explicada pelo fato de pontos da frente de onda que atinge o obstáculo comportarem-se com fontes de ondas secundárias.

O fenômeno da difração ocorre quando o comprimento de onda de uma onda tem a mesma ordem de grandeza que as dimensões do obstáculo a ser transposto: por isso, embora todas as ondas possam sofrer difração, esse fenômeno é percebido mais facilmente em determinadas situações. As ondas sonoras, por exemplo, têm grandes comprimentos de onda e podem transpor grandes obstáculos. Por esse motivo, você pode ouvir o som emitido por uma

pessoa do outro lado de um muro, apesar de não poder vê-la, conforme ilustrado na Figura 5. Além de falar do assunto de forma muito superficial, o autor apresenta uma figura de ondas não compatível com o conceito de difração por um obstáculo, mas sim de transmissão através de uma parede.

Figura 5 – Figura :Página do livro CARLOS MAGNO A. TORRES *et al*



Fonte: CARLOS MAGNO A. TORRES *et al*

2.1.6 Coleção: Compreendendo a Física

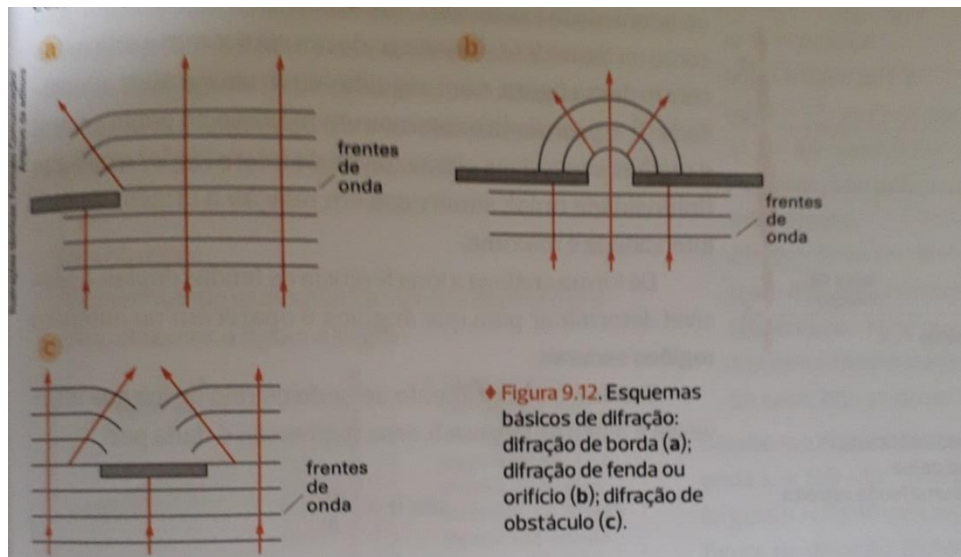
Na Referência (ALBERTO GASPAR, 2016) os autores abordam a difração no volume 2, capítulo 9, na parte de Ótica ondulatória, e é explicado da seguinte forma:

como a interferência, a difração também é um fenômeno tipicamente ondulatório. Um Feixe de corpúsculos, como grãos de areia caindo numa ampulheta, não difrata, mas esse feixe se mantém com a espessura praticamente uniforme, isso não acontece na propagação ondulatória figura 12.

Ondas na água, por exemplo, ao passarem por um obstáculo, tendem a contorná-lo ao atravessarem a pequena abertura, abrem-se ou se difratam-se, formando um feixe divergente. A difração também ocorre quando as ondas encontram um pequeno obstáculo - elas se abrem e tendem a contorná-lo. Embora difícil de ser percebida, a difração também acontece com a luz. Os primeiros trabalhos que descrevem a difração e a interferência da luz foram realizados no século XVII, pelo Físico e Jesuíta italiano Francisco Maria Grimaldi.

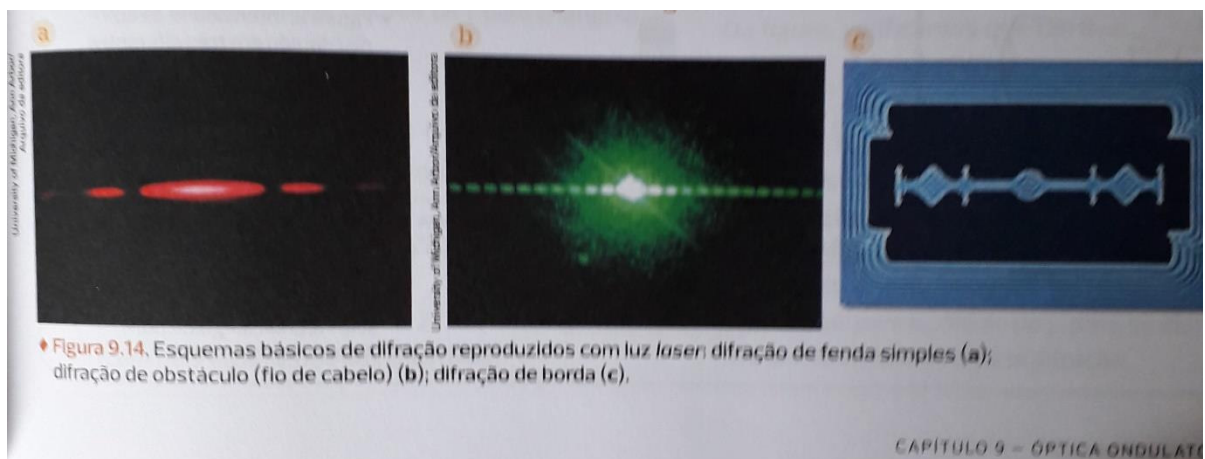
Apesar de ter características próprias, a difração da luz pode ser observada em todas as situações apresentadas pelas ondas mecânicas ilustradas na Figura 6 e 7 (Figuras 9.12 e 9.14 do livro, respectivamente), na tendência de contornar obstáculos aparecendo na forma de franjas claras e escuras, na abertura do feixe depois de atravessar uma fenda estreita, ou na travessia de um obstáculo estreito.

Figura 6 - Figura 29: Página do livro Alberto Gaspar *et al*



Fonte: Livro Alberto Gaspar *et al*

Figura 7: página do livro da obra de Alberto Gaspar *et al*



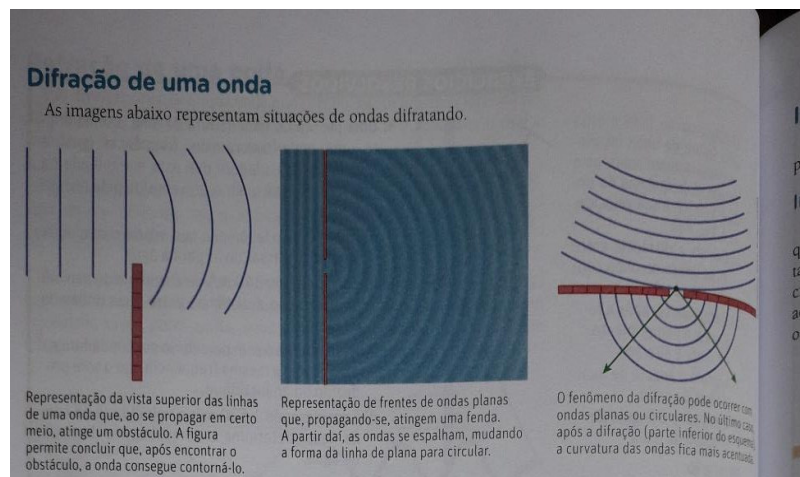
Fonte: livro Alberto Gaspar *et al*

2.1.7 Coleção Física Ser Protagonista

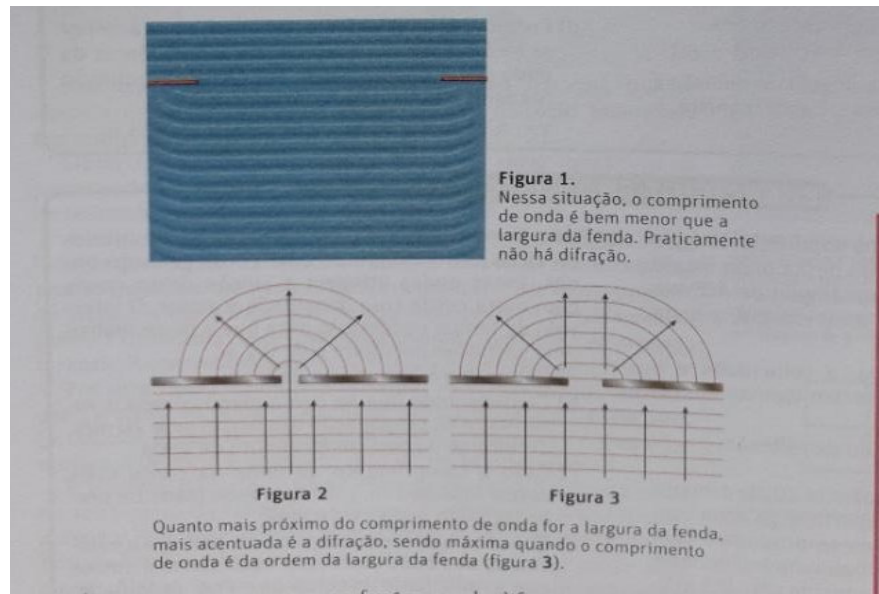
Na Referência (ANA FUIKI *et al* 2016) a autora aborda a difração no volume II, no capítulo 9, na unidade de ondas. Nesse exemplar, os autores começam mostrando, por meio de figuras, três situações de ondas se difratando. Ao se propagarem por certo meio e atingirem um obstáculo eles concluem que a ondas, após encontrar o obstáculo, podem contorná-lo. No outro exemplo, temos uma representação de frente de ondas planas, que passam por uma fenda e que, após se propagarem, mudam de forma - passam da forma plana para a forma circular. E no último exemplo é mostrado que a difração pode ocorrer com ondas planas e circulares. Nesse último caso, após a difração, a curvatura das ondas fica mais acentuada.

A autora traz a definição de difração: “é o fenômeno no qual a onda contorna um obstáculo ou se espalha após passar pela fonte”. Mais adiante ele ressalta que a difração depende do comprimento de onda e da largura da fenda, mostra por meio de figuras que quando o comprimento de onda for muito pequeno em relação à largura da fenda a difração será de menor intensidade (Figura 7), e que a difração será mais acentuada quando o comprimento de onda for da ordem da largura da fenda (Figuras 8 e 9). No último parágrafo, a autora faz a observação que na difração o comprimento de onda, a frequência e a velocidade da onda permanecem constantes. A única alteração ocorre na forma da linha da onda.

Figura 8: página do livro ANA FUIKI *et al* 2016



Fonte: livro ANA FUIKI *et al* 2016

Figura 9- Livro ANA FUIKI *et al* 2016

Fonte: livro ANA FUIKI *et al* 2016

2.1.8 Coleção Física aula por aula

Na referência (Benigno Barreto *et al*) os autores abordam o assunto difração no volume 2 da sua coleção, na unidade 6, na parte de ondulatória. Antes de iniciar o conceito de difração os autores descrevem um experimento.

Com a autorização do professor, faça a seguinte experiência. Vá para o pátio da escola ou para outro ambiente que contenha parede de separação. Peça a um colega que fique do outro lado da parede ou no ambiente. Fale algo para seu amigo. Depois voltando para o mesmo ambiente, questione se ele ouviu o que você disse. Tente fazer o teste em dois ambientes diferentes: apenas em um local com um muro de separação, mas com o teto em comum e em outro com duas regiões totalmente separadas. O que você percebeu? E o seu colega? É bem provável que seu colega tenha escutado o que disse, embora no ambiente com o teto em comum, talvez o som tenha sido mais nítido do que em outro ambiente. Você deve estar se perguntando por que isso ocorre.

Para compreender esse fenômeno, é preciso saber o que é difração de ondas. Segundo os autores, “a difração é uma propriedade que uma onda possui de contornar um obstáculo ou fenda, chegando a uma região que não poderia ser atingida se a propagação dessa onda fosse retilínea”. O efeito da difração de ondas está ligado ao comprimento de onda da onda incidente e ao tamanho do obstáculo a ser transposto: ambos precisam ter a mesma ordem de grandeza.

Após uma breve análise dos conteúdos das obras oficiais usadas no ensino médio, percebe-se grandes lacunas de informações úteis para que os estudantes entendam de fato o que é difração, exemplos muitos superficiais que são encontrados nos livros, conceitos bem abreviados, da forma que a Difração é abordada nos livros o público do Ensino médio não vai compreender qual a sua importância da Difração para o desenvolvimento da humanidade. A identificação da falta de tais informações resultou na proposta deste trabalho, que é a elaboração de um material de apoio aos professores para complementar os textos adotados no PNLD.

2.2 Identificação da proposta

A complementação das obras do ensino médio pode ser feita de várias maneiras. Uma delas é através do uso de computadores e celulares, cujo foco é a participação direta do estudante no processo de aprendizagem, e não apenas se postando como um elemento de recepção de informações por parte do professor. Os conceitos e aplicações não exploradas nos livros textos serão explorados por meio do uso de softwares educacionais disponíveis nas redes de internet. Este é precisamente o foco deste trabalho de conclusão de mestrado.

Os softwares educacionais têm um papel muito importante no ensino não só da Física, mas também no ensino de qualquer área da ciência. Atualmente, toda a sociedade, sobretudo os mais jovens, são constantemente expostos à grande quantidade de informações, o que tem comprometido severamente a capacidade de processamento e a sua interpretação adequada. Para o professor que trabalha especificamente com o esse público, o cenário se torna complexo. Neste sentido, Santos e Moraes (2003) argumentam:

que a educação desempenha um papel muito importante no que eles denominam como sociedade tecnológica, uma vez que ela é um dos elementos fundamentais que permitem que os indivíduos possam ser capazes de questionar e buscar entender e transformar a sociedade que se vive. (Santos e Moraes.2003)

A utilização dos softwares é muito importante no ensino da Física por muitos motivos, dentre os quais podemos citar a facilidade com a qual o jovem tem de se adequar às tecnologias, além da motivação associado ao seu uso. Como muitas escolas não dispõem de laboratórios de Física, esse recurso se faz muito útil no processo do ensino da Física, tendo em vista que muitos alunos já tem a uma aversão à disciplina pelo modo como ela é trabalhada em sala de aula. Antes mesmo do primeiro contato com as aulas, eles já chegam das séries anteriores com a ideia de que a disciplina é difícil e não vão poder assimilar os conteúdos. Por meio desses programas

e simuladores, é possível representar conceitos físicos mais abstratos de forma que eles sejam facilmente assimilados. Os softwares são programas desenvolvidos para várias funções, uma das quais é auxiliar no processo de ensino. Segundo Papet (2007), para Piaget todo o funcionamento da mente possui duas facetas que ele domina como assimilação, na qual o indivíduo muda sua representação de mundo para encaixar-se aos modos de pensar, e a acomodação do sujeito deve encaixar-se ao mundo.

Durante muito tempo o uso da tecnologia foi acessível apenas a uma pequena parcela da sociedade. Contudo, com seu aperfeiçoamento, ela foi se tornando mais barata e acessível a todos. Isto não foi diferente na área de educação, que possui alguns serviços para a propagação de conhecimentos na área de ciências. Como exemplo, temos celulares, tablets e computadores que possuem muitas funções e também uma grande quantidade de aplicativos. Como estamos vivendo na era tecnológica, cabe ao professor, como formador de opinião, aproveitar essa proximidade que o jovem tem com a tecnologia para trabalhar suas potencialidades. A função do professor não é apenas ensinar conteúdos; o educador também deve ampliar a capacidade do aluno para novos horizontes. De acordo com Nogai (NOGAI, 2005)

A informática na educação é vista como nova e promissora área e com potencial que pode possibilitar mudanças nos sistemas educacionais. Por isso a importância que se reveste a formação de professores no domínio da tecnologia para que se tornem capazes de refletir e de participar ativamente desse processo de mudança e inserção da informática aplicada a educação. (NOGAI, 2005.)

Na atualidade o fluxo de informações é muito alto, sendo necessária a utilização de algum instrumento para auxiliar a processar parte dele. Os estudantes atuais têm posturas diferentes em relação às gerações anteriores. Antes o professor apenas transmitia o conteúdo e o aluno o memorizava; hoje o perfil do aluno mudou, os jovens são mais informados, mais ativos, mas infelizmente ainda não têm um ensino que privilegie a conceituação e, sobretudo, as aplicações no cotidiano dos conhecimentos aprendidos.

A qualidade da educação geralmente centrada nas inovações curriculares e Didáticas, não pode se colocar a margem dos recursos disponíveis para levar a diante as reformas e inovações em matéria educativa, nem da forma de gestão que possibilitam sua implantação. A incorporação das novas tecnologias como conteúdos básicos comuns é um elemento que pode contribuir para uma maior vinculação de ensino e culturas que se desenvolvem fora do âmbito escolar. Mercado (2002. p 12).

O Ensino da Física, via de regra, é estigmatizado por muitos alunos como a representação de uma disciplina de difícil entendimento, que trabalha com conceitos, técnicas e práticas

desmotivadoras, sem vinculação à realidade prática e, portanto, desinteressante. Também para muitos professores, a Física é uma disciplina teórica, reproduzindo em sua docência a forma como foram ensinados em sala de aula, através de métodos tradicionais que estimulam a memorização e a avaliação do desempenho prático, através de metodologias que não se baseiam na contextualização, na interdisciplinaridade ou na transdisciplinaridade. Do encontro dessas duas perspectivas, em sala de aula, surgem conflitos que, por um lado, dificultam que o professor efetivamente ensine a Física e, por outro, impedem que os alunos compreendam, sintam-se estimulados e efetivamente aprendam.

A Física é uma disciplina que lidera o ranking de reprovações nas escolas brasileiras e também é um dos cursos com menor número de pessoas que ingressam na carreira da docência. O que se pode fazer para melhorar essa realidade? O professor pode utilizar um software de maneira a ser recurso adicional, para dar uma maior contribuição para tornar as aulas bem mais dinâmicas e prazerosas, assim quebrando um pouco daquela visão que muitos têm da Física de ser uma matéria chata e rotineira que só pode ser explicada a partir de fórmulas.

A informática na educação de que estamos tratando enfatiza o fato de o professor da disciplina curricular ter conhecimento dos potenciais educacionais do computador e ser capaz de alternar adequadamente, atividades não informatizadas de ensino-aprendizagem e atividades que usam o computador. No entanto atividades que usam o computador podem ser feitas tanto para continuar transmitindo, a informação para o aluno, e portanto, para reforçar o processo instrucionista de ensino, quanto para criar condições para o aluno criar seu conhecimento em ambientes de aprendizagem que incorporem o uso do computador (FREIRE, 2001, p. 32).

Miranda e Laudares (2007) argumentam que alguns professores ainda têm receio da mudança, resistindo em deixar de lado a aula expositiva que segundo ele é um método eficaz. Acredita-se que tal postura está relacionado a sua falta de formação. Fugimoto (2010) ao argumentar a utilização do computador como ferramenta educacional, salienta que o professor necessita de uma formação que seja possível de capacitá-lo para o desenvolvimento de atividades que contribuam para a construção do conhecimento dos alunos.

Para Machado *et al* (2001), a ferramenta computacional é uma das possibilidades de trabalho em sala de aula, ocupando, inclusive papel de destaque nas orientações expressas nos Parâmetros Curriculares Nacionais. A postura de se utilizar software nas áreas de Matemática e Física se fundamenta na expectativa de tornar o ensino das ciências mais dinâmico e mais próximo das constantes transformações que a sociedade vive, em particular o ensino das duas disciplinas, tem vivenciado.

A maioria das escolas públicas não possui laboratório de informática e, quando possui, não é utilizado. Muitas vezes o professor não faz o uso deste não por falta de recursos, mas sim por falta de capacitação técnica e também por ter se acostumado a trabalhar o conteúdo de forma tradicional. Em geral os educadores não exploram bem os computadores, ou usam essas máquinas nos laboratórios de forma limitada - na maioria das vezes é usado apenas para pesquisas em internet e outras atividades on-line. Ferramentas como editores de textos, planilhas de cálculos e software na área de exatas quase nunca são utilizados. De acordo com Mercado (2002) não basta colocar à disposição dos professores apenas os computadores, mas é preciso prepará-los, principalmente para fazer com que entenda o porquê de uma ferramenta nova de trabalho.

2.3 Sobre o Ensino da Física

O ensino da Física tem evoluído constantemente em objetivos e em conteúdo, alcançando sempre novas dimensões, pela consideração de que a capacidade para a resolução de problemas, o estímulo ao raciocínio lógico e a abstração são fundamentais para efetivamente formar integralmente o aluno para a vida em sociedade. As inovações e a evolução do ensino da Física fazem com que a própria legislação educacional se especialize, passando a considerar que o ensino da Física deve ser efetivado com a participação ativa do aluno em todo o processo, capacitando-o a pensar para atribuir significados ao que aprende e a vivência, aplicando-se recursos tecnológicos e ferramentas desenvolvidas por meio desses recursos na prática em sala de aula.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais – PCNs - para as séries do Ensino Médio estabelecem:

A presença da Física no ensino Médio ganhou um novo sentido a partir das diretrizes apresentadas nos PCNs. Trata-se de construir uma nova visão da física que esteja voltada para o cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade. Nesse sentido mesmo os jovens que após a conclusão do Ensino Médio não venham a ter mais contato escolar com o conhecimento em Física, em outras instâncias profissionais ou Universitárias ainda sim terão a formação necessária para compreender e participar do mundo que vivem. (PCN+ Ensino médio, 2016, p.1)

Contudo, em que pese a disposição dos PCNs, como a Física em si é uma ciência intensamente dinâmica e constantemente em evolução, de forma rápida em seus próprios conteúdos e de forma mais lenta em sua própria concepção profunda, também se deve considerar que a atividade Física não pode ser uma realidade cuja abordagem se realize de uma

forma simplista ou simplificada e, portanto, deve ser constantemente repensada. Sobre essa questão se manifesta Garnica:

O outro membro do binômio Ensino-Física não é simples. A educação deve, necessariamente, fazer referência ao mais profundo da pessoa, uma pessoa ainda a ser conformada, bem como à sociedade em evolução na qual esta pessoa deve se integrar, à cultura que se desenvolve nessa sociedade, aos meios concretos pessoais e materiais que, no momento, se pode ou se quer dispor, às finalidades prioritárias que se deseja corresponder a essa educação, que podem ser extraordinariamente variadas.(GARNICA)

A complexidade da Física e da educação sugere que os teóricos da educação— e não menos os seus agentes — devem permanecer constantemente atentos e abertos às mudanças profundas que, em muitos aspectos, a dinâmica rapidamente mutante da situação global vem exigindo. (GARNICA, 2002, p. 92). Ainda se observa que a educação, como um sistema complexo, apresenta uma forte resistência à mudança, do que decorrem alguns conflitos quando se trata no ensino de Física, quando essa resistência não se conjuga com uma capacidade de adaptação diante da mutabilidade das circunstâncias do entorno.

De qualquer modo, em todos os sistemas educativos a Física é um conhecimento relevante, porque com ela as pessoas desenvolvem de maneira mais eficiente atividades práticas de aspectos quantitativos enquadrados na vida cotidiana ou, ainda, ajuda a compreender aspectos naturais de sua própria existência e a elaborar perspectivas que servem para entender a realidade, dentre tantas outras contribuições. De acordo com Ávila:

O objetivo do ensino da Física, portanto, se relaciona muito mais com a intuição e com a imaginação do que como o raciocínio lógico-dedutivo. O ensino da Física, assim como da língua materna, é trabalhado desde o início da escolarização. Por esse motivo, esse ensino se torna tão importante e indispensável como a alfabetização, embora também possa representar um problema que pode se prolongar durante toda a vida estudantil, calcado em dificuldades de compreensão e de superação desses problemas, transformando-se em obstáculos ao desenvolvimento cognitivo do sujeito que pode — ou não — ser superado futuramente. (ÁVILA, 2007, p. 48)

O ensino tradicional da Física, para muitos professores, se perpetua de forma equivocada, apresentando muitos obstáculos para a mudança educativa que vem sendo construída, sendo poucos os professores que adotam uma postura nova em relação as práticas para facilitar a aprendizagem dessa matéria. Muitas vezes, essa postura não é motivada pela ausência de conhecimento de novas técnicas e instrumentos (materiais, meios e recursos) didáticos, mas por resistência à mudança, por insistência em ensinar o que foi aprendido, da mesma forma como lhes foi ensinado.

Do ponto de vista do professor de Física, pode-se afirmar que são variadas as situações e múltiplos os elementos que se envolvem e interferem no momento de questionar-se dos problemas e das dificuldades que podem ser encontradas no ensino-aprendizagem. Ávila (2007) pondera que algumas dessas implicações são representadas por marcos socioeconômicos, pela cultura da superficialidade predominante entre estes e os alunos – característica do entorno social, a interação entre ambos e destes com o conhecimento matemático de referência, a instituição de ensino e a sociedade. Também se pode considerar que o ensino-aprendizagem, as técnicas, os estímulos e outros fatores que norteiam a problemática encontrada no ensino são encontrados no pensamento de Freire, evocado por Fossa:

Na relação ensino-aprendizagem, o professor não pode colocar conteúdos como se estes fossem um conhecimento acabado, de cujo processo construtor-criador nem mesmo quem ensina sabe. Não deve transmitir os conteúdos friamente, mecanicamente, para o educando. O educando tem que aprender o significado profundo da produção e do conhecimento. Os conteúdos deveriam ser entendidos enquanto mediação do encontro entre o educador e o educando. (FREIRE, in FOSSA, 2001, p. 36)

Contudo, para que isso possa ocorrer, o professor necessita refletir sobre o papel que tem nesse processo, questionando que ser professor não se limita apenas a explicar temas e conteúdos, mas sim assumir o seu papel de mediador-facilitador da aprendizagem, no qual o objeto principal é o aluno. O professor deve oferecer formas didáticas diferenciadas, como atividades lúdicas para que o aluno sinta o desejo de pensar logicamente. Isso significa que ele pode não apresentar predisposição para gostar da disciplina e por isso não se interessa por ela. Daí a necessidade de programar atividades lúdicas na escola.

2.4 O enfrentamento dos desafios da Física no Ensino Médio

Antecipando-se às necessidades de enfrentar as resistências dos alunos diante da Física, é fundamental ao professor a reflexão sobre sua práxis didática e, mais especificamente, sobre a sua visão da matemática e de sua importância para a própria vida. Indo além, Armstrong (2001, p. 69), sugere que o professor determine “a natureza e a qualidade de suas próprias ideias sobre a Física e a forma de aprendê-la, buscando maneiras de desenvolvê-las em sua própria vida”. Armstrong (2001) propõe, para o desenvolvimento do raciocínio, o suporte da teoria das inteligências múltiplas, compreendendo que, da mesma forma que a escola pratica e desenvolve a capacidade de escrever ou a capacidade para o esporte, pode e deve desenvolver e praticar o

conjunto de outras capacidades que permitam uma relação adequada dos alunos com o mundo exterior, consigo próprio, ou seja, o desenvolvimento e o incremento da inteligência emocional, como suporte para todas as demais inteligências, ancorada no estímulo às inteligências a ela ligadas, inclusive a inteligência pictórica.

A adoção de novas práticas pedagógicas e institucionais, embora não seja uma proposta totalmente esclarecida do ponto de vista científico, tem um valor intrínseco e coerente que merece atenção. Elas afetam tanto ao professor quanto aos alunos, representando desafios que se chocam, de início, com as dificuldades evocadas por Armstrong (2001):

- a) a implantação dessa ideia dentro de um currículo tradicional não é fácil de ser efetivado;
- b) há necessidade de treinamento específico para que os professores desenvolvam as atividades;
- c) os planos de aula e os horários rígidos devem ser modificados, tornando-se mais flexíveis;
- d) há necessidade de tempo extra para o preparo de atividades e de materiais didáticos;
- e) há necessidade de mais docentes em algumas escolas, diante da escassez de professores;
- f) é necessário um currículo que tenha o aluno como centro do processo ensino-aprendizagem e que este seja considerado como um indivíduo;
- g) o aluno deve ser preparado para trabalhar com novos enfoques educativos;
- h) o aluno será avaliado de forma diversa da tradicional;
- i) o uso das inteligências múltiplas como ferramenta de instrução demanda uma reestruturação do ensino em sala de aula;
- j) é necessário mais tempo para que o aluno possa trabalhar de forma diferente daquela a que está acostumado;
- l) é necessário afastar o temor de rotular os alunos;
- m) é necessário o aporte de tecnologia e de materiais concretos.

Diante dessas necessidades, essas ideias apresentam um desafio para os professores, para considerarem que, sendo a inteligência a capacidade que permite ao ser humano resolver problemas, deve-se dar aos alunos oportunidades para desenvolvê-la plenamente, na medida em que se permita sua condição particular. Contudo, o eixo fundamental de qualquer processo de ensino e aprendizagem da Física é a resolução de problemas, o que se mostra, portanto, lógico pensar que, dada a complexidade do tema, muitos são os atores ou pesquisadores que realizam estudos nesse sentido.

Font *et al* (2006) fazem referência à Física como uma atividade de resolução de problemas, socialmente compartilhada, uma linguagem simbólica e um sistema conceitual

logicamente organizado. Isso indica que a resolução de problemas faz parte do conceito propriamente dito e que o mesmo se constitui em um marco de referência importante no mundo da Física. Esta questão, está associada à situação especial representada pelas características da resolução de problemas, na qual se requer uma boa base matemática e de agilidade para a obtenção de resultados claros e precisos.

A maioria dos pesquisadores pontua a resolução de problemas como uma sequência de passos ou etapas nas quais a primeira constitui a base fundamental, já que dali dependerá a consecução ou não do que foi proposto. Esse primeiro passo geral, conforme Pozo (2000), é a análise e a interpretação do enunciado do problema (compreensão leitora), com a consequente obtenção dos dados do mesmo. Conforme o que é observado e analisado, o aluno começa a apresentar problemas desde esta primeira etapa, que são produtos de uma errônea interpretação e deficiente análise da situação proposta, causada pela baixa qualidade de sua aprendizagem da língua portuguesa. Essas deficiências também podem ser atribuídas a uma debilidade do próprio sistema educativo, quando não se proporciona a criação de uma cultura orientada para esses dois aspectos – análise e interpretação – e para sua importância para o progresso intelectual.

Pozo (2000), observa que desse primeiro passo se obtêm os dados e se estabelecem variáveis, expressando assim, em uma linguagem simbólica, os termos a serem utilizados durante a resolução do problema. Sobre essa base de dados e essas variáveis se esboçam as equações a serem utilizadas, levando em conta que devem ser dimensionalmente homogêneas. Uma vez resolvidas e apresentados os resultados, com suas respectivas análises, observa-se a necessidade de que estes satisfaçam as condições do problema. Finalmente, se deve traduzir os resultados obtidos em palavras, como conclusão, e comprová-los, se as circunstâncias exigirem. Destaca-se nesse sentido, que os passos de resolução propostos por Pozo (2000) podem ser modificados, conforme cada necessidade em particular.

Por seu turno, Polya (2003) considera que existem quatro etapas no processo de resolução de problemas e esse processo se inicia, sempre, na compreensão do enunciado ou conteúdo do problema. Quando não se entende o problema, não é possível resolvê-lo e, portanto, deve ser concebida uma estratégia para sua resolução.

As proposições de Polya (2003) podem ser assim determinadas:

a) Primeiro: compreender o problema, sendo que essa compreensão consiste na decodificação dos símbolos escritos e na conversão do enunciado matemático em uma representação mental. Nessa representação intervêm, por sua vez, dois subprocessos:

- 1) a tradução do problema ou passagem de cada oração a uma representação mental;
- 2) a integração ou combinação da informação disponível em um esquema coerente.

Para compreender um problema, é necessário responder a perguntas básicas: “entendo ou compreendo tudo o que diz o problema?”, “posso alterar o problema, colocando-o em minhas próprias palavras?”, “distingo quais são os dados?”, “sei onde quero chegar?”, “há informação suficiente?”, “há alguma informação especial?”, “o problema é similar a algum outro que já tenha sido resolvido anteriormente?”

b) Segundo: conceber um plano, fase na qual se desenha o esquema de atuação a seguir, o que supõe identificar as metas, examinar as diversas estratégias gerais que podem ser aplicadas e escolher as ações que devem ser realizadas para encontrar a relação entre os dados e as incógnitas.

Não sendo encontrada uma relação imediata, devem ser considerados problemas semelhantes que tenham sido resolvidos anteriormente. A concepção do plano deve ser flexível e afastar-se do mecanicismo.

c) Terceiro: executar o plano, que consiste em implementá-lo e desenvolvê-lo segundo o previsto, considerando que o pensamento não é linear, que há saltos entre o planejamento inicial e a prática das ações.

A recomendação é que se observem os seguintes critérios:

- 1) implementar a estratégia ou estratégias escolhidas até solucionar completamente o problema ou até que a mesma ação sugira a necessidade de buscar um novo caminho;
- 2) ao executar o plano deve ser comprovado cada um dos passos;
- 3) é possível ver claramente que cada passo dado é correto?
- 4) antes de fazer algo, pensar o que irá ser conseguido com a ação desenvolvida;
- 5) acompanhar cada operação matemática de uma explicação do que se faz e para que se faz;
- 6) diante de uma dificuldade existente e que possa bloquear o prosseguimento, se deve voltar ao princípio, reordenar as ideias e provar novamente.

d) Quarto: examinar a solução obtida, importante porque supõe a confrontação com contexto do resultado obtido pelo modelo do problema realizado.

Além disso, é possível assumir estratégias heurísticas para a resolução de problemas, sobretudo, constituídas por quatro competências, nas quais as três primeiras se relacionam ao desenvolvimento cognitivo do aluno e a última com a criatividade e a imaginação no momento de buscar um resultado eficiente. (COLL e VALLS, 2000). Da mesma forma, existem outras variáveis que incidem no rendimento dos alunos, representadas pelo pouco tempo dedicado para a disciplina, a baixa motivação ou gosto pela Física, a utilização de instrumentos diversos, a inclusão da tecnologia educativa nas aulas de Física, etc.

2.5 A importância da atitude do professor para contornar dificuldades

O ensino da Física tem suscitado muitas discussões em relação às dificuldades de aprendizagem. Boa parte desses estudos aponta que um dos motivos para as dificuldades é a atitude do professor diante da disciplina, já que a maneira própria de compreendê-la e visualizá-la determina a sua prática pedagógica, que influencia o processo de ensino-aprendizagem. Isso significa, segundo Ponte (2003), que existe um vínculo entre ensinar, aprender e investigar, no qual “investigar” não consiste em apenas em procurar adquirir conhecimento, mas sim abranger e procurar encontrar soluções. Também afirma o autor:

Existem muitas acepções do que é ensinar e do que é ser professor. Para muitos, será, sobretudo, o “debitar” da matéria, em frente do quadro ou de modo mais sofisticado, com retroprojektor ou PowerPoint.

Nesta perspectiva, ensinar e aprender são independentes – o professor pode ensinar sem que os alunos aprendam. Mas também se pode assumir a perspectiva oposta – se os alunos não aprenderam, é porque o professor não ensinou. Falou, gesticulou, escreveu no quadro, esforçou-se mais falhou. (PONTE, 2003, p. 3)

Borges (2005, p. 175), evocando D’Ambrósio, ressalta ainda o descompasso no ensino em sala de aula: “[...] é como se a gente tivesse no século XX, aqui na faculdade, fazendo Física do século XX e quando chega lá na escola, está no século XVIII, XVII”. O que se destaca, portanto, é que não se admite um professor em sala de aula que não perceba que tem à sua frente alunos do século XXI, com necessidades e vontades diferentes dos séculos passados, sobre o que manifesta Borges, citando D’Ambrósio:

[...] Euclides era a base de tudo, mas a gente tinha que ensinar as coisas como eram feitas naquela época, com a linguagem da época, com o estilo das coisas da época. Queria dizer, não é o Euclides que serve para as classes de hoje. A geração de hoje não pode se pendurar no Euclides. A geração de hoje tem que fazer as coisas que são feitas hoje [...] (BORGES, 2005, p.175).

Desta forma, na atualidade, se os alunos não conseguirem fazer qualquer relação dos conteúdos que são ensinados em sala de aula com o seu cotidiano, a tendência é que não encontrem sentido em estudar algo que trará resultados futuros, levando ao desinteresse pela disciplina. Além disso, uma aprendizagem significativa da Física ocorre quando o aluno está interessado e motivado e, sobretudo, quando a condição dessa aprendizagem seja favorável. Por isso, quando se pensa em um aluno com dificuldade em aprender, não se pode associar essa dificuldade apenas à falta de interesse devido ao seu mau comportamento, mas é necessário analisar esse caso com maior cuidado. (BORGES, 2005).

Sendo assim, o educador tem tanto a possibilidade de adotar atitudes que provoquem o desinteresse pela Física no aluno como pode ajudá-lo a perceber que a disciplina é necessária para a sua vida, além de não representar algo impossível de apreender. Observa Cerqueira (2003) que para compreender as dificuldades que influenciam atitudes de alguns professores, é necessário separar as dificuldades específicas na área de deficiências estruturais - baixos salários, professores mal formados, falta de condições adequadas de trabalho, dentre outras. Ainda, há duas questões importantes: a primeira é a questão do preconceito social de que a Física é para poucos e a segunda são as questões metodológicas, ou seja, relacionadas a como e o que ensinar.

Neves (2002, p. 33) comenta que em relação a ensinar Física, de acordo com Brito, a atitude do professor é definida como “uma disposição pessoal, idiossincrática, presente em todos os indivíduos, dirigida a objetos, eventos ou pessoas”, que assume diferente direção e intensidade conforme as experiências do indivíduo. Além disto, apresenta componentes do domínio afetivo, cognitivo e motor. Em relação às atitudes, reforça Neves (2002) que estas, em sua maioria, influenciam significativamente nas atitudes de rejeição dos alunos para com a disciplina, de tal forma que as experiências vividas em sala de aula vão determinar o sucesso e o insucesso do aluno, levando assim a atitudes positivas ou negativas.

Relativamente às dificuldades de aprender Física que decorrem das atitudes do professor, Rodrigues comenta:

A dificuldade em aprender pode trazer como consequências o medo da Física ou atitudes de indiferença frente ao conhecimento, gerando uma relação alienante com o saber em geral, além de alimentar um sistema de crenças negativas em relação à disciplina. (RODRIGUES, 2001, p.18)

Ainda, baseando-se nas ideias de Borges (2005), verifica-se a necessidade de se trabalhar com os erros dos alunos, tendo atitudes que fortaleçam o espírito crítico e não provocando medo quando ocorrem esses erros. Isso evitaria que se verificasse, com a frequência que ainda se verifica – que, muitas vezes, os alunos apontam a Física como uma disciplina de que não gostam, isso porque o educador, em vez de criar meios que possibilitem na prática a construção do conhecimento por parte do aluno, utiliza-se de atitudes que causam obstáculos no processo de aprendizagem.

Outra atitude que pode vir a suscitar no aluno o sentimento de rejeição à Física é quando o educador o incentiva a simplesmente tirar uma nota significativa para “passar de ano”. Essa atitude, de acordo com Neves (2002), não possibilita que o aluno compreenda o significado positivo que a Física tem no seu dia a dia, pois não desenvolve o desejo em aprender, e sim uma

visão da matemática como uma obrigação a ser cumprida. De acordo com Borges (2005, p. 1.649), D'Ambrósio tentou buscar explicações para essas “atitudes”, que levaram o ensino da Física, em pleno século XXI, a se manter estruturado em um ensino obsoleto e arcaico: “É porque ninguém queria mudar o jeito que estava fazendo as coisas. Esse é o medo de conflito, que existe até hoje”.

Dessas considerações se pode abstrair que o grande desafio da atitude do docente de Física, a partir do momento em que se passa a reconhecer a sua constante evolução, é definir a Física como sendo uma ciência que tanto pode ser considerada em si mesma como por suas aplicações, ou seja, como objeto de conhecimento ou como instrumento de conhecimento, como jogo, arte e aventura do pensamento, como uma poderosa ferramenta para analisar, compreender e interpretar a realidade, para a comunicação.

Através do conhecimento da Física, portanto, se pode proporcionar aos alunos conhecimentos e habilidades relacionadas entre si ou relacionados com outros temas, nos quais a Física tem uma função importante. São duas faces complementares da ciência em si, dificilmente separáveis, pois a distinção entre a Física em si e suas aplicações não tem fronteiras definidas, ainda que os problemas que trata de resolver, por vezes, se encontram dentro de seus limites e, por vezes, fora dos mesmos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO DAS TEORIAS EDUCACIONAIS

No presente capítulo será apresentado as contribuições e a história de Jerome Bruner e será exposto como sua Teoria da Aprendizagem tem muita relevância no processo de ensino-aprendizagem para a Educação. As bases dessa teoria foram utilizadas como suporte na aplicação do desenvolvimento desde Produto Educacional em sala de aula. Vamos mostrar como a Psicologia Cognitivista pode contribuir no processo de aprendizagem do ensino do conteúdo da Física. Bruner tem uma visão geral de que a educação não se deve se concentrar apenas na memorização dos fatos.

Jerome Seymon Bruner, de descendência polonesa, nasceu em Nova York em outubro de 1915 e faleceu em julho 2016. Foi professor de Psicologia em Harvard e depois em Oxford, onde desenvolveu muitos trabalhos importantes na área da educação. Na década de 1960, liderou a Psicologia Cognitivista, a qual introduz novas perspectivas no estudo da mente, superando os postulados colocados até aquela época pelo behaviorismo, que focava apenas nos fenômenos observáveis. Durante o governo dos presidentes Kennedy e Johnson ele chefiou o Comitê de Ciências (Science and Advisory Committee).

Bruner foi quem deu início à psicologia cognitiva nos Estados Unidos, se dedicou muito à Psicologia e focou em estudar o comportamento do ser humano e como a mente humana funciona. Ele passou a maior parte de sua vida tentando entender a maneira pela qual a mente humana percebe o mundo, o que o levou a fazer contribuições importantes para o campo da educação e da psicologia cognitiva. Uma das suas primeiras descobertas levou ao que ficou conhecido como a teoria do Novo Olhar, um postulado sobre a percepção. O pesquisador mostrou que as percepções que as pessoas têm sobre objetos e eventos são frequentemente influenciadas por condições sociais e culturais que não são vistas. Em um de seus experimentos mais famosos, ele determinou que as crianças pobres tinham uma percepção do tamanho das moedas muito diferente da das crianças ricas. Para elas, quanto maior o valor monetário da moeda, maior o imaginavam. Esse estudo ajudou o Bruner a concluir que as motivações humanas eram mais complexas do que se supunha anteriormente e que elas estavam sujeitas a emoções, imaginação e formação cultural.

A estrutura de qualquer de conhecimento pode ser caracterizada de três maneiras, todas elas ligadas à habilidade do estudante em dominar o assunto: a forma de representação, sob a qual é posta; sua economia, e a potência efetiva. Variam a forma, economia e potência com diferentes idades, com diversos estilos entre estudantes, e com distintas matérias. (Uma nova teoria de aprendizagem P.60)

3.1 Propostas Educacionais

Nos seus estudos da Psicologia cognitivista Bruner inicia o desenvolvimento dessa teoria, com a proposta de que a percepção e a sensação humana como parte do processo de aprendizagem, e estes vão se dar de maneira ativa e não apenas de maneira de receptiva. Outro aspecto da teoria de Bruner que tem de ser levado em consideração é que neste o aluno aprende por meio de um processo ativo, o aprendiz constrói novas ideias e conceito a partir de conhecimentos passados e atuais, ou seja, o aprendizado vai se dá de maneira processual e não um produto final e acabado através das experiências diárias as pessoas podem adquirir conhecimento. O aprendiz vai formular suas próprias hipóteses e tomar suas próprias decisões, ele vai ser autossuficiente, desta forma ele utiliza uma psicologia cognitiva.

É costumeiro, ao discutir as predisposições para a aprendizagem, focalizar os fatores culturais, motivacionais e pessoais que infleem no desejo de aprender, de tentar solucionar problemas. São realmente da maior importância tais fatores: há por exemplo a relação professor-aluno ---qualquer que seja o status formal do instrutor-professor ou pai. Tratando-se de relação entre pessoas em que um possui algo que falta no outro, há sempre, no caso, um problema de autoridade. A forma dessa relação se reflete na natureza da aprendizagem, no grau em que o estudante desenvolve uma habilidade independente, na medida em que ele confia na capacidade própria para trabalhar sozinho, e assim por diante. As relações entre quem ensina e quem aprende repercutem na aprendizagem. E desde que o processo do ensino é essencialmente social – principalmente nos primeiros estágios, quando abrange, no mínimo professor e um aluno –é claro que uma criança que vai à escola deve ter um mínimo de conhecimentos sociais para poder participar do processo de aprendizagem escolar (Uma nova teoria de aprendizagem P.58)

3.2 Psicologia Educacional

Nas publicações de Bruner na Universidade de Harvard foram feitas uma série de avaliações sobre o sistema de ensino, onde e quais formas este precisa ser melhorado. Na sua visão, a educação não deve ser trabalhada apenas na memorização dos fatos. Na sua concepção, para se trabalhar determinado assunto este dever ser tratado com um espiral, ou seja, em níveis, partindo do mais simples até chegar ao mais complexo; cada conceito trabalhado deveria ser ensinado de repetidas vezes. Desta forma, a criança poderia aprender um assunto que fosse mais complexo de uma forma mais simples.

Todo domínio de conhecimento (ou qualquer problema dentro desse domínio) pode ser representado sob três forma:

- i. por um conjunto de ações e apropriadas para obter determinado resultado (representação ativa);
- ii. por um conjunto de imagens resumidas, ou gráficos que representam conceitos, sem defini-los completamente (representação icônica);
- iii. por conjunto de preposições, lógicas ou simbólicas, derivado de um sistema simbólico regido por normas ou leis para formar ou transformar proposições (representação simbólica).

Dado o exposto, podemos constatar que a Teoria Cognitivista de Jerome Bruner se encaixa de maneira bem coerente na construção da aplicação deste Produto Educacional. Como vimos no referencial teórico, sua teoria mostra que o aprendizado se dá de maneira ativa e não passiva, e vai muito além da informação dada. Essa construção acontece de uma forma bem dinâmica, muito diferente do ensino tradicional, em que a informação era apenas repassada ao aluno; este apenas armazenava o conteúdo e o deixava guardado, e o professor era o centro do processo. Na metodologia aqui descrita neste trabalho o aluno será o centro do processo e vai ter participação muito ativa na construção desta aplicação do Produto Educacional para facilitar o ensino da Difração.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o objetivo subsidiar as discussões sobre o fenômeno da difração de ondas, inicialmente será feita uma análise pormenorizada acerca dos principais conceitos associados aos fenômenos ondulatórios e oscilatórios. De modo geral, pode-se dizer que estes fenômenos são inerentes à própria natureza e, como tal, se manifestam no nosso cotidiano, do universo macroscópico das galáxias e estrelas até a escala microscópica das partículas subatômicas. Alguns exemplos serão mencionados apenas para demonstrar a grande abrangência destes. Um carro se movendo em uma pista irregular apresenta pequenas oscilações; um barco ao navegar em alto-mar oscila lentamente em razão das ondas que o atingem; o som que ouvimos chega aos nossos ouvidos como um padrão ondulatório que se propaga no ar, cujas moléculas oscilam na direção da propagação da onda; terremotos são o resultado de oscilações das camadas de rochas da crosta terrestre.

Além disso, a informação compartilhada entre dois smartphones ocorre via ondas viajantes que são formadas pelas oscilações de campos elétrico e magnético que permeiam todo o Universo. O mesmo ocorre com sinais de TV, rádio, Wi-Fi, radar, etc. Segundo a teoria física denominada Modelo Padrão, as próprias partículas elementares que formam toda a matéria ordinária, tais como elétrons, quarks up e quarks down (estes últimos formadores de prótons e nêutrons), são oscilações nos campos eletromagnético e campos quânticos, respectivamente. Sendo assim, fenômenos como a fusão nuclear, que alimenta o brilho das estrelas, e a fissão nuclear, que origina os decaimentos radioativos, são fundamentalmente fenômenos ondulatórios.

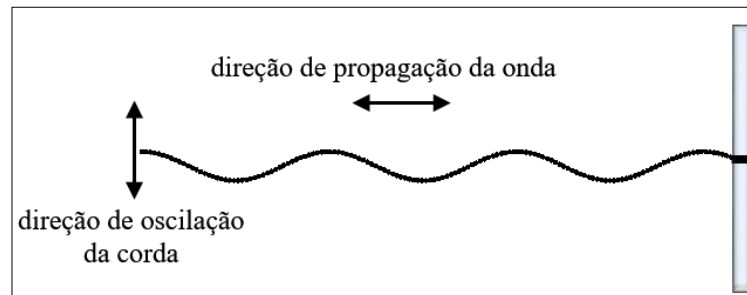
Como se pode verificar, são muitos exemplos da ocorrência de ondas no nosso cotidiano. As ondas também são muito importantes para o desenvolvimento da tecnologia. Através delas foi possível o aperfeiçoamento de muitos aparatos tecnológicos e, graças a essa maravilha da natureza, podemos nos comunicar com pessoas a grandes distâncias de uma maneira muito rápida.

Ficou evidente nos parágrafos acima a importância das ondas e os cenários nos quais elas se manifestam com mais evidência. Entretanto, ainda não foi dada uma definição precisa acerca do que seja uma onda. Mediante uma pesquisa superficial nos livros didáticos disponíveis no mercado pode-se achar vários conceitos, que juntos definem o que é uma onda. Onda é uma perturbação que se propaga no espaço contendo matéria ou não. Elas transportam energia e quantidade de movimento, sem que haja o transporte de matéria propriamente.

A Figura 10 ilustra uma onda que se propaga em uma corda na direção horizontal que se encontra presa a um obstáculo na sua extremidade direita. Esta onda causa apenas movimento

oscilatório vertical nos elementos da corda, de modo que estes não se movem na direção de propagação da onda. No caso desta ilustração, a corda oscila verticalmente apenas. As ondas podem ser classificadas em vários tipos, dependendo do meio no qual eles se propagam e da maneira como as oscilações das partículas do meio ocorrem. Nas próximas seções, será feita uma breve discussão sobre os aspectos físicos e matemáticos das ondas.

Figura 10 – Propagação de ondas em uma corda esticada.



Fonte: Próprio autor.

4.1 Descrição Física do Problema

Uma possível maneira de se conhecer um fenômeno que possui um grau de complexidade é mediante a identificação de um grupo de propriedades que sejam comuns dentro de determinados cenários. Com esta proposta, os fenômenos ondulatórios podem ser descritos em conexão com o tipo de ambiente no espaço dentro do qual as ondas se manifestam. Além disso, eles podem ser descritos de acordo com a forma como as oscilações que dão origem às ondas ocorrem quando comparadas com a direção de propagação da energia da onda. Nas subseções seguintes cada caso será examinado separadamente.

4.1.1 As Ondas e o Ambiente de Propagação

Quanto às características do espaço dentro do qual as ondas existem, elas podem ser classificadas em três grandes grupos, denominados ondas mecânicas, ondas eletromagnéticas e ondas quânticas.

4.1.1.1 Ondas Mecânicas

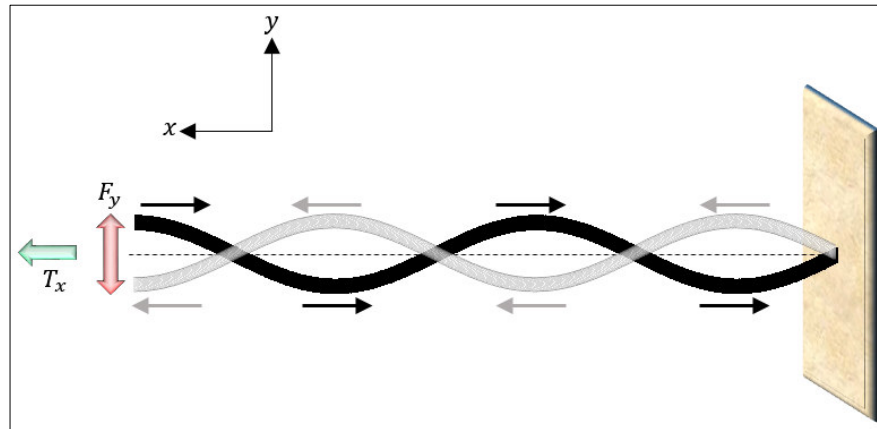
São aquelas cujas oscilações são provenientes de partículas que possuem massa inercial não nula, ou seja, são ondas que se propagam em meios materiais. Essas ondas são facilmente encontradas na natureza e, portanto, familiares à nossa percepção. Ondas do mar, ondas sonoras e ondas sísmicas, mencionadas anteriormente, são exemplos de ondas mecânicas. Com o objetivo de facilitar o entendimento deste tipo de onda, a Figura 11 ilustra uma corda com densidade de massa μ , esticada por uma força de tensão T_x que oscila na direção do eixo vertical sob ação da força F_y . Enquanto a corda vibra na direção vertical, uma parte da energia fornecida por F_y se propaga para a direita, é refletida pela parede e então se propaga para a esquerda, eventualmente formando um padrão de distribuição de energia em equilíbrio dinâmico ao longo da corda cujo perfil é conhecido como onda estacionária.

Como este tipo de onda depende do movimento de partículas com massa, quanto maior a densidade de massa da corda menor é a velocidade de propagação destas ondas. Pondo na forma de uma equação tem-se:

$$v = \sqrt{\frac{T_x}{\mu}} \quad (1)$$

Observa-se que a velocidade da onda depende totalmente das propriedades do meio no qual viaja. Estudam-se estas ondas com a teoria de Newton para o movimento de partículas sob ação de forças. Deve-se ressaltar que, embora a descrição acima seja mecânica, no sentido de que foi usado conceito de força newtoniana, a origem de todas essas forças que promovem a propagação contínua da energia e quantidade de movimento na forma de uma ondulação tem origem no campo eletromagnético. Entretanto, em virtude da necessidade de partículas materiais para a existência de tais ondas, a sua descrição por meio das leis do movimento de Newton é mais simples do ponto de vista intuitivo. A descrição da transmissão de energia pelo espaço sem a necessidade de partículas materiais será estudada na próxima seção, com as ondas eletromagnéticas.

Figura 11: Ilustração para ondas mecânicas.



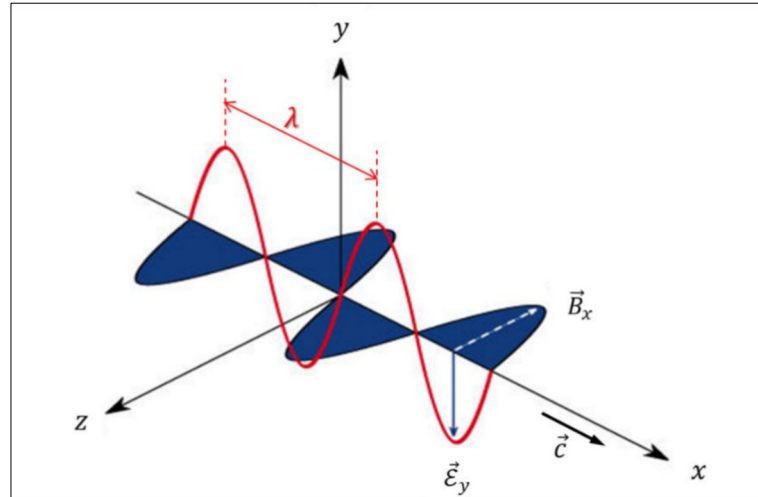
Fonte: Próprio autor.

4.1.1.2 Ondas Eletromagnéticas

São aquelas cujas oscilações não são produzidas pelo movimento de partículas com massa inercial, mas sim pelas mudanças nos valores de duas grandezas físicas intrínsecas ao espaço conhecidas como campo elétrico $\vec{E}$ e campo magnético $\vec{B}$. Uma vez que estes campos existem em todos os locais do Universo, este tipo de onda se encontra espalhada por todo o espaço, independente de existir matéria ou não dentro nele. Luz ultravioleta, visível e infravermelha, ondas de rádio e de televisão, micro-ondas, raios-x e ondas de radar são exemplos de ondas eletromagnéticas.

A Figura 12 ilustra como os campos elétricos $\vec{E}_y$, na direção do eixo y e magnético $\vec{B}_z$, na direção do eixo z , se combinam perpendicularmente no espaço formando o padrão conhecido como onda eletromagnética. Observa-se que os campos não se movem ao longo dos seus respectivos eixos, mas apenas alteram seus valores em cada ponto do espaço. O padrão desta alteração nos valores é que se move na forma de uma ondulação, na direção do eixo x , no caso específico ilustrado na Figura 12.

Figura 12: Campo Magnético e campo elétrico a combinação destes vai gerar ondas eletromagnéticas.



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/ondas.htm>

Quando diferentes ondas eletromagnéticas se propagam no espaço sem matéria, suas velocidades são todas iguais (aproximadamente 300.000 km/s), o máximo valor possível para elas. Matematicamente esta velocidade pode ser expressa como $v_{\text{máx}} = \lambda f$, onde o símbolo λ representa o comprimento de onda de uma onda, definido como a distância entre dois pontos equivalentes da mesma, e f é a taxa de oscilação temporal (ou frequência temporal) dos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ no mesmo ponto do espaço. Estas definições serão estudadas com detalhes na seção 4.2.1. No espaço vazio de matéria nem λ e nem f são alterados durante a propagação da onda. A partir do início do século XX passou-se a usar a letra c (do latim celeritas = celeridade, ligeireza) para representar a máxima velocidade das ondas eletromagnéticas ($v_{\text{máx}} \equiv c$, sendo que é mais comum encontrar na literatura a expressão:

$$c = \lambda f \quad (2)$$

Quando diferentes ondas eletromagnéticas se propagam no espaço contendo partículas materiais, entretanto, suas velocidades não se mantêm mais as mesmas em relação às outras. Além disso, todos os valores das velocidades são reduzidos quando comparados àqueles da propagação no espaço livre. A relação (2) deve ser adaptada para incluir a influência da matéria sobre as velocidades e sobre os comprimentos de onda. A frequência da onda eletromagnética é uma propriedade interna dos campos elétrico e magnético, sem nenhuma relação com o meio externo. Portanto, esta é a única propriedade da onda que não é alterada com o ambiente do

espaço no qual ela se propaga. Com estas informações, a Equação (2) pode ser reescrita na forma:

$$v_{mat} = \lambda_{mat} f \quad (3)$$

sendo v_{mat} a velocidade da onda dentro da matéria e λ_{mat} o comprimento de onda alterado por ela.

Deve-se ter claro em mente o que de fato significa esta alteração na velocidade de uma onda eletromagnética. Segundo a teoria eletromagnética de Maxwell, que resultou na descoberta de que uma onda eletromagnética viaja com velocidade constante máxima no espaço vazio. Isto é precisamente o conteúdo da Equação (2), já que λ e f não mudam. Então, o que a Equação (3) realmente significa? Que a onda luminosa é freada quando entra em uma região do espaço contendo matéria e é acelerada após atravessá-la? Que tipo de interação seria responsável por tal redução e posterior aumento na velocidade da onda, e como ela poderia ser quantificada? A resposta deve ser considerada à luz do fato de que a matéria pode ser considerada um meio contínuo na escala macroscópica, mas discreta na escala microscópica.

É fato consolidado na física experimental que a velocidade da onda eletromagnética é reduzida quando ela penetra a matéria, de modo que vale a relação:

$$c = n v_{mat} \quad (4)$$

onde n é um número que representa a influência da matéria na redução da velocidade, conhecido como índice de refração. O termo refração (inclinação, quebra, mudança de direção) vem do fato de que as ondas ao entrarem na matéria inclinam-se na direção da superfície de incidência em razão da mudança de sua velocidade. No vácuo $n = 1$, dentro da matéria $n > 1$. Sem entrar em detalhes do cálculo matemático que leva à dependência do fator n com as propriedades da matéria, pode-se mostrar que [Richard Feynman, vol. 1, equação 31.19]:

$$n = 1 + \frac{N e^2}{2 \varepsilon_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (5)$$

sendo N a densidade de cargas do material, e é o valor da carga do elétron, ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo, m é a massa do elétron, ω_0 é a frequência de ressonância do elétron dentro do átomo e ω é a frequência angular da onda eletromagnética. Das Equações (4) e (5), tem-se

a expressão da velocidade da onda na matéria v_{mat} em função das propriedades dos átomos e da onda no vácuo:

$$v_{mat} = \frac{c}{1 + \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2)}} \quad (6)$$

Observa-se que na ausência de matéria ($N = 0$), o denominador torna-se igual à unidade e v_{mat} é igual a c . Dentro da matéria $N \neq 0$, o denominador torna-se maior que a unidade e a velocidade da luz é menor do que c .

A discussão feita até aqui mostrou apenas o fator de redução da velocidade da onda eletromagnética na matéria, mas não ficou claro como isso acontece. Classicamente, esta redução na velocidade pode ser explicada de forma relativamente simples. Quando o campo elétrico oscilante da onda eletromagnética interage com os elétrons de valência dentro dos átomos, estes oscilam na mesma frequência, perpendicularmente à direção de propagação da onda, ou seja, na mesma direção de seu campo elétrico.

Os elétrons oscilantes juntamente com o restante do átomo formam um dipolo elétrico induzido que, por sua vez, produz uma onda eletromagnética perpendicular ao seu eixo de polarização. Ou seja, a direção da onda dipolar emitida coincide com a direção de propagação da onda original que induziu o dipolo. Em razão da massa inercial dos dipolos, a onda produzida por estes é defasada em relação àquela que os induziu, e se propaga com velocidade v_d . Como resultado da superposição espacial destas ondas com fases diferentes, tem-se o fenômeno do batimento, o que leva à percepção pelo observador de uma terceira onda que viaja no mesmo sentido das ondas que a originou, com velocidade v_{total} , cujo valor é a média aritmética das velocidades das duas ondas, ou seja, $v_{total} = (c + v_d)/2$. Portanto, $v_{total} < c$.

4.1.1.3 Ondas Quânticas

São ondas que se manifestam quando observadas em escala muito pequena, tipicamente na dimensão dos átomos e moléculas. Este tipo de onda é muito diferente das ondas mecânicas e eletromagnéticas quanto à sua origem. Enquanto a primeira é originada na oscilação de partículas da matéria e a segunda na oscilação dos valores dos campos elétricos e magnéticos, as ondas quânticas (ou ondas de matéria), representadas pelo símbolo $\psi(x, t)$, estão associadas às mudanças nos valores da possibilidade da existência de uma partícula material em um local

do espaço em certo instante de tempo. Estas ondas são estudadas pela teoria quântica, desenvolvida por vários cientistas, dentre eles Louis de Broglie, o seu principal proponente, e Erwin Schrödinger, que descobriu a equação correta para as ondas de probabilidades.

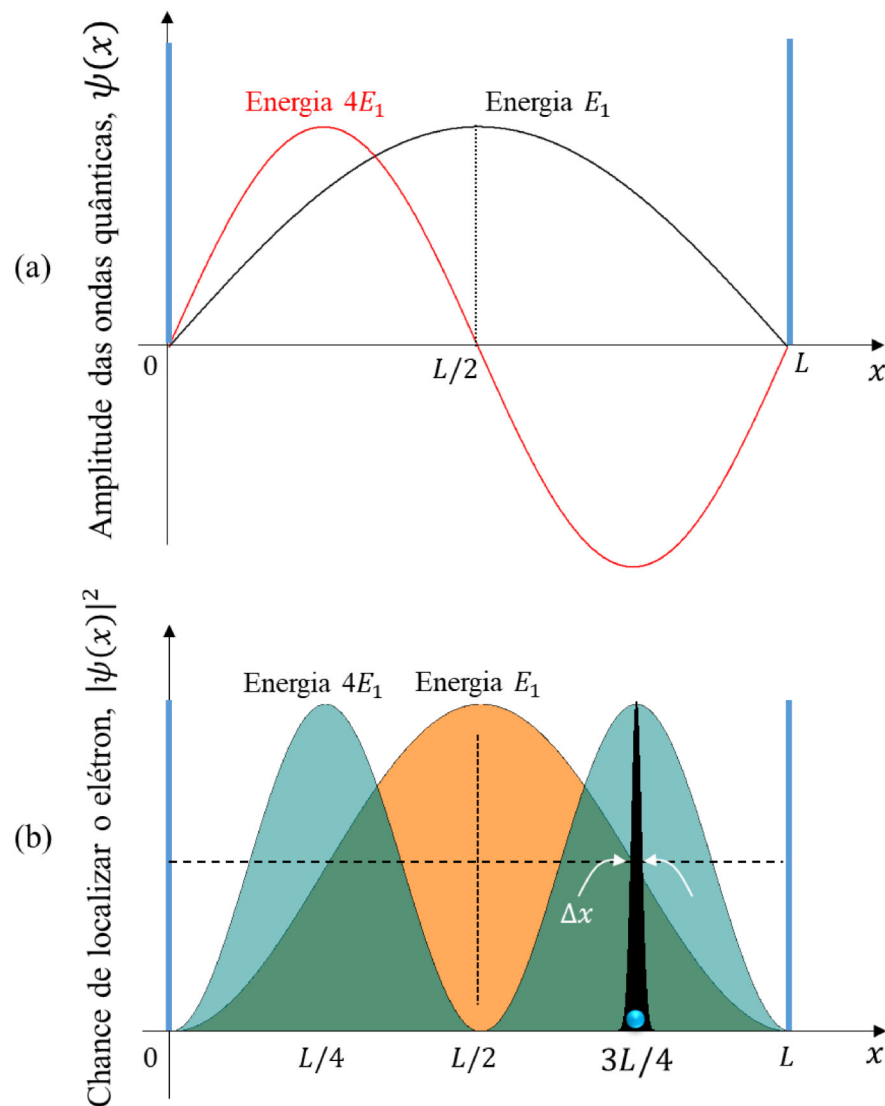
De todas as formas de onda essa é a mais difícil de ser estudada, do ponto de vista experimental, pelas distâncias muito pequenas nas quais ela se manifesta, e do ponto de vista teórico, pela complexidade matemática e conceitos físicos envolvidos. Isto ocorre pela impossibilidade de separar completamente as características da onda e da partícula de massa m à qual ela está associada de forma explícita, conforme será descrito na seção 2.2.2. Conforme já foi mostrado, a velocidade de uma onda mecânica depende do valor da força que une as partes do meio e da inércia dessas partes ($v = \sqrt{T/\mu}$), sendo que as partes do meio não viajam juntamente com a onda. Também foi apresentado que a velocidade de uma onda eletromagnética pode ser descrita em função das características da própria onda ($v = \lambda f$). No caso das ondas quânticas, descreve-se a velocidade da partícula em conexão com as suas ondas pela relação:

$$v = \frac{h}{m\lambda} \quad (7)$$

sendo h um número constante, conhecido como constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$).

Para facilitar o entendimento deste tipo de onda, a Figura 13a ilustra a onda quântica estática no tempo, $\psi(x)$ (probabilidade encontrar o elétron), para um elétron livre que está limitado a se mover em linha reta ao longo da região entre duas paredes localizadas em $x = 0$ e $x = L$. Detalhes deste tipo de onda serão estudados na seção 4.2.2. O elétron muda bruscamente o sentido de seu movimento quando se choca com as paredes. Denomina-se este cenário de ‘poço de potencial infinito’. Quando o elétron se encontra no estado de menor energia) sua onda quântica tem comprimento de onda duas vezes maior que a largura do poço L (curva identificada como energia E_1 na figura); no primeiro nível excitado sua energia é $E_2 = 4E_1$, e o comprimento de onda de sua onda é igual a L (curva identificada como Energia $4E_1$ na figura), de modo que pode-se escrever $\lambda = 2L/n$, sendo n um número inteiro e positivo.

Figura 13:(a) Ilustração para as ondas quânticas de um elétron dentro de um poço de potencial infinito para o nível de energia fundamental (Energia E_1) e primeiro nível excitado (Energia $4E_1$). (b) Probabilidade de achar o elétron dentro do poço de largura L no nível fundamental e primeiro nível excitado.



Fonte: Próprio Autor.

Este resultado contrasta muito com as ondas mecânicas e eletromagnéticas. Considerando-se o conjunto de todas as ondas quânticas possíveis, apenas algumas delas podem representar fisicamente o elétron dentro deste poço. Consequentemente, sua velocidade só pode assumir determinados valores $v_n = n \cdot [h/(2mL)]$. A restrição para alguns valores da velocidade do elétron surge em decorrência de sua descrição como uma onda estacionária dentro do poço, e estas restrições são uma imposição da interferência destrutiva, fenômeno inerente às ondas.

A Figura 13b mostra o quadrado do módulo das ondas da Figura 13a, $|\psi(x)|^2$, com o elétron nos níveis de Energia E_1 e Energia $4E_1$. Somente as informações contidas em

$|\psi(x)|^2$ tem significado físico para a descrição ondulatória das partículas materiais. Isso tem origem no fato de que a função de onda $\psi(x)$ em geral é um número complexo, e assim deve-se tomar o quadrado do módulo para que se extraia dela informações reais.

Classicamente, o elétron ocupa apenas um ponto do espaço dentro do poço, e possui a mesma chance de ser encontrado em qualquer local dentro dele, já que possui velocidade constante. Isto está ilustrado pela linha horizontal tracejada na figura. Mas as previsões da teoria das ondas quânticas não mostram este fato, mas sim o que está ilustrado na Figura 13b (dois picos, localizados em $L/3$ e $3L/4$). No estado de mais baixa energia o elétron ocupa toda extensão do poço ao mesmo tempo, antes de ser observado (pico centrado em $L/2$). Entretanto, a chance de observá-lo dentro do poço não é mais a mesma ao longo dele, mas apresenta maior valor na região central ($x = L/2$). No primeiro nível excitado o elétron também ocuparia toda a região do poço, mas sendo encontrado preferencialmente nas regiões próximas $x = L/4$ e $x = 3L/4$, e jamais seria ocuparia a posição $x = L/2$.

A natureza em pequena escala apresenta comportamento contraintuitivo. Segundo a teoria quântica da matéria, uma partícula é representada por um pacote de ondas na forma de um pico que está distribuído ao longo de todo o espaço, ou seja, é algo deslocalizado. Entretanto, quando se usa algum tipo de equipamento para observar tal partícula, ou seja, quando ela sofre uma interação como o meio, instantaneamente altera sua distribuição espacial e passar a se apresentar como algo bem localizado no espaço. Portanto, a descrição feita acima é para um elétron não observado ainda.

Este é o resultado previsto por uma das interpretações da teoria quântica, elaborada por Niels Bohr e Werner Heisenberg em 1927. A própria teoria prevê que se o elétron for observado e encontrado na posição $x = 3L/4$, sua representação ondulatória não seria mais a dos dois picos largos, mas sim o pico muito estreito de largura Δx , representado sobre o ponto localizado em $x = 3L/4$

na figura. A largura deste pico está limitada pelo fenômeno da difração das ondas que formam o pacote, e jamais pode ser igual a zero, conforme prevê a teoria das partículas clássicas. Esta limitação é comumente expressa na literatura como o princípio de incerteza de Heisenberg.

Para evitar confusão no entendimento acerca destas ondas, deve-se esclarecer que, diferente das outras ondas, nas quais temos uma entidade física oscilando, as ondas quânticas não são uma onda no sentido anterior, na qual se tem uma entidade física oscilando dando origem à onda. Ou seja, a onda quântica não é proveniente da oscilação dos elétrons. Onda aqui significa tão somente a “oscilação na chance de se observar a partícula em determinada posição e instante de tempo”. Em outras palavras, a ondulação é a probabilidade de localização encontrar a partícula.

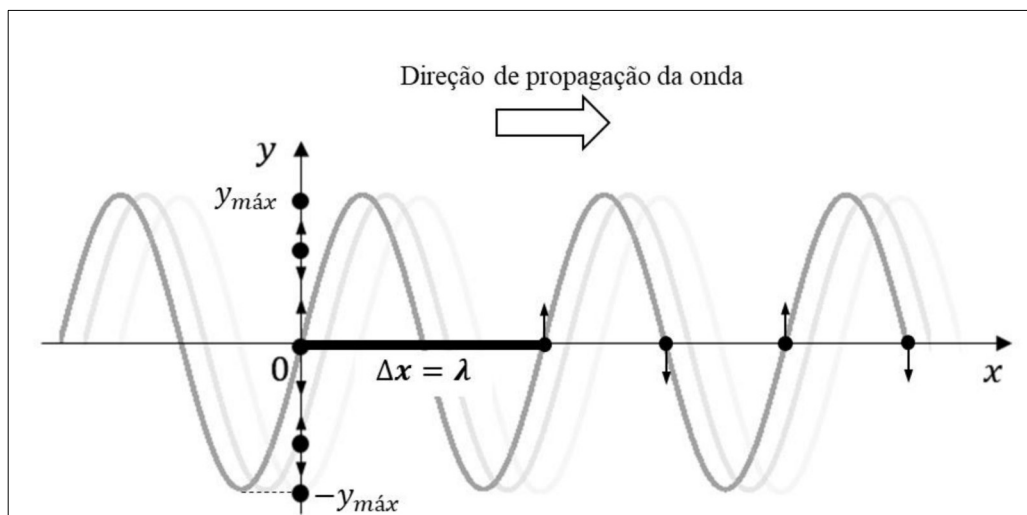
4.1.2 As Ondas e os Entes Oscilatórios

É possível fazer outra análise acerca das ondas observando-se a direção do movimento oscilatório de alguma grandeza em relação à direção de propagação da própria onda. Elas podem ser:

4.1.2.1 Ondas Transversais

São aquelas em que a direção das oscilações é perpendicular à direção de propagação da onda. A Figura 14 ilustra uma onda transversal em uma corda. Enquanto um ponto fixo na corda oscila apenas ao longo do eixo y , dentro do intervalo $\pm y_{\text{máx}}$, a onda se desloca na direção positiva do eixo x , sendo que a cada distância $\Delta x = \lambda$ a partícula se encontra na mesma posição e se movendo ou tendendo a se mover no mesmo sentido. Esta foi precisamente a definição de comprimento de onda, conforme descrito na seção 4.1.1.2. As ondas eletromagnéticas ilustradas na Figura 12 também são longitudinais. Os campos elétrico e magnético sempre oscilam perpendicularmente ao eixo de propagação da onda.

Figura 14: Ilustração para uma onda do tipo transversal em uma corda.

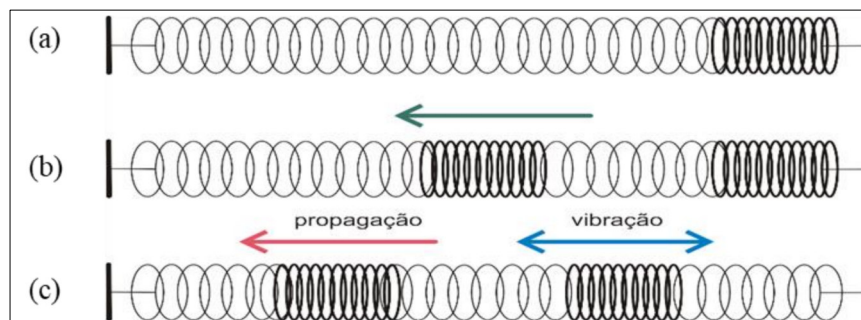


Fonte: Próprio autor.

4.1.2.2 Ondas Longitudinais

São aquelas em que a direção de oscilação ocorre na mesma direção do movimento. A Figura 15 ilustra uma onda longitudinal em uma mola. Um impulso é dado na extremidade direita da mola ao longo de seu eixo fazendo-a comprimir-se localmente (Figura 15a). Ao se descomprimir, este setor da mola comprime a região vizinha mais à esquerda e isso se repete até à extremidade esquerda da mola (Figuras 15b e 15c). Esse movimento regular de compressão e descompressão dos setores da mola é o que se denomina onda longitudinal. Não existe um nome especial para este tipo de onda mecânica, sendo denominada apenas onda de pressão. Este mesmo efeito ocorre nas rochas, sendo popularmente denominado de terremoto.

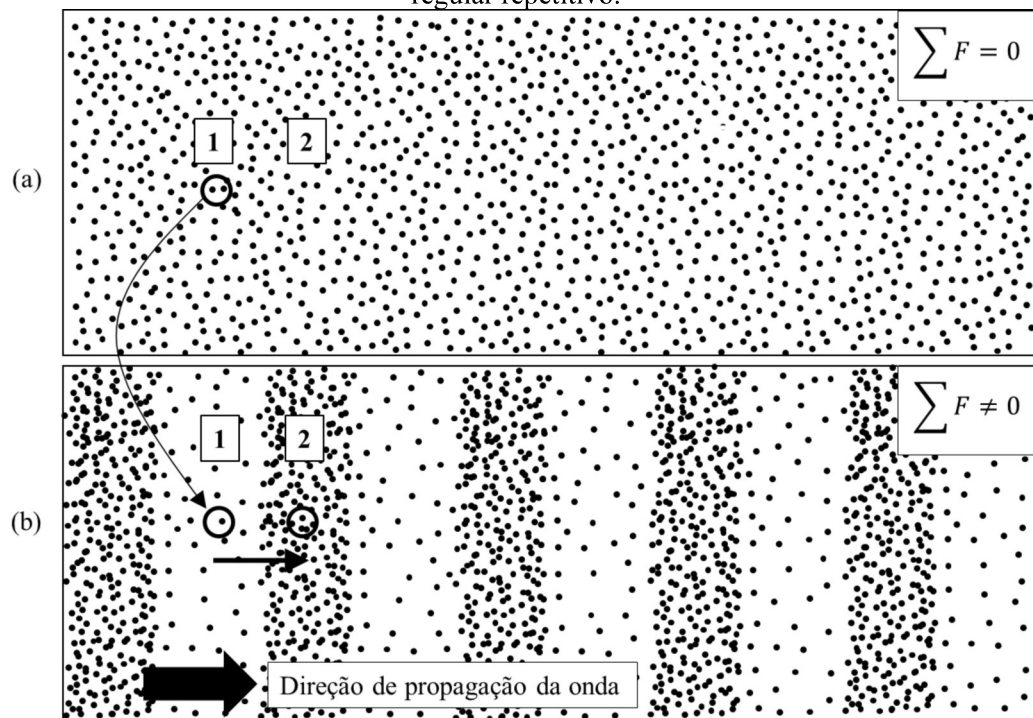
Figura 15: Ilustração para uma onda do tipo longitudinal em uma mola.



Fonte: <http://3.bp.blogspot.com/>

Movimento semelhante pode ser observado com as partículas do ar. Neste caso, a onda recebe um nome especial de som. A Figura 16a ilustra uma região do espaço na qual as moléculas estão dispostas na sua configuração de equilíbrio dinâmico, mantendo distâncias regulares. A densidade de moléculas nas regiões 1 e 2 destacadas na figura são iguais. Não há um estímulo para que elas se movam para longe de suas posições, mas por conta da agitação térmica elas apenas oscilam no entorno de suas posições. Existem forças sobre cada molécula devido à agitação térmica; mas se por estarem todas com a mesma energia as forças se cancelam mutuamente.

Figura 16: Ilustração para uma onda do tipo longitudinal no ar. Na Figura (a) as moléculas estão uniformemente distribuídas. Na Figura (b) elas estão organizadas de forma a evidenciar um padrão regular repetitivo.



Fonte: Próprio autor.

Acompanhe o caso da molécula destacada pelo círculo na região 1 na Figura 16a. A Figura 16b ilustra o cenário no qual uma onda sonora é transportada por estas moléculas de ar, da esquerda para a direita, conforme indicado na figura. Veja que sob uma força impulsiva as moléculas que se encontravam na região 1 são deslocadas para a região 2. Quando a onda se move para a direita, as forças sobre as moléculas estão no mesmo sentido e elas se acumulam, diminuindo as distâncias entre elas. Por estarem ligadas umas às outras, as moléculas reagem com uma força contrária, na tentativa restaurar a configuração de equilíbrio anterior. Sob ação desta força restauradora, e por conta da inércia das moléculas, estas ultrapassam o ponto de equilíbrio e reduzem novamente suas distâncias. Esse processo continua indefinidamente, desde que a força externa seja mantida. Para o caso das ondas longitudinais, a variável dinâmica é a pressão do meio, que aumenta e diminui conforme se dá o ajuntamento e a separação das partículas.

Deve-se analisar a Figura 16 com cuidado, pois se trata de um equilíbrio dinâmico. Ele ocorre quando a força impulsiva externa se mantém atuando sobre as moléculas da esquerda da figura (não mostrada na figura). O que vemos na Figura 16b é uma representação de como estariam distribuídas as moléculas em um certo instante de tempo. Essa distribuição não é estática, mas oscila com o tempo, segundo a passagem do pulso de energia.

As ondas quânticas não são nem transversais e nem longitudinais. Essa classificação é adequada apenas para ondas cujos entes oscilantes possuem características vetoriais (deslocamentos espaciais de partículas materiais ou campos elétricos e magnéticos). Conforme mencionado o final da seção 4.1.1.3, a entidade que oscila para formar o padrão denominado onda quântica é a probabilidade de localização de uma partícula mediante interação com ela, sendo a probabilidade uma grandeza escalar. A onda quântica associada à partícula existe quer ela se mova em linha reta ou oscile em torno de um ponto fixo.

4.2 Descrição Matemática do Problema

Nas seções anteriores fez-se uma descrição física sobre as ondas considerando apenas seus aspectos qualitativos. Entretanto, para um entendimento mais aprofundado do assunto é necessário obter-se previsões quantitativas que possam ser comparadas com a observação da natureza. Isto será feito a partir da derivação da equação das ondas e posterior análise de sua solução.

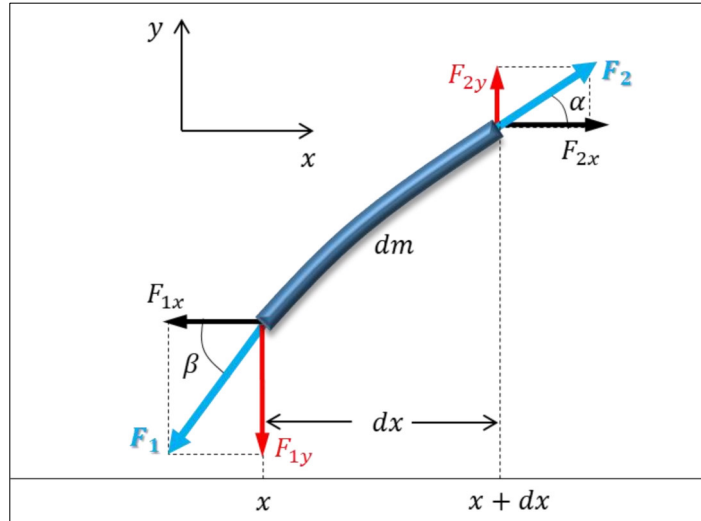
4.2.1 Ondas Mecânicas e Eletromagnéticas

Por motivos de simplicidade matemática, uma corda tensionada será usada como cenário para o estudo das ondas mecânicas e eletromagnéticas. Não há restrição na demonstração que será feita, visto que as ondas mecânicas e eletromagnéticas possuem uma estrutura matemática semelhante, sendo a única diferença entre elas a entidade que está oscilando no tempo e no espaço – o deslocamento de uma partícula ou o valor do campo eletromagnético.

A Figura 17 mostra o pequeno setor de uma corda que se encontra sobre o eixo x , na qual uma onda viaja com velocidade v_x da esquerda para a direita. O setor da corda ilustrado está sob a ação das forças de tensão F_1 e F_2 em suas extremidades. Ambas são forças tangentes ao setor da corda nos seus pontos de aplicação. No momento em que o pulso de energia passa pelo elemento da corda ele se move perpendicularmente à direção de propagação do pulso, ou seja, na direção do eixo y . Utilizando a segunda lei de Newton pode-se encontrar a equação diferencial geral para a onda. As componentes F_x das forças se cancelam, pois não há movimento da corda nesta direção ($F_{1x} = F_{2x} = F_x$). A partir da geometria da figura pode-se encontrar a força F_y :

$$F_y = F_{2y} - F_{1y} \quad (8)$$

Figura 17 – Elemento de uma corda com massa dm na qual uma onda se propaga. As forças sobre os elementos da corda estão mostradas.



Fonte: Próprio autor.

As componentes F_{1y} e F_{2y} podem ser relacionadas às componentes F_{1x} e F_{2x} pelos ângulos mostrados na figura, cujos valores absolutos podem ser escritos como:

$$tg\beta = \frac{F_{1y}}{F_{1x}} \equiv \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_x \quad et \quad tg\alpha = \frac{F_{2y}}{F_{2x}} \equiv \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x+dx} \quad (9)$$

O símbolo ∂ representa a derivada parcial. Como exemplo, $\partial y / \partial x$, significa a variação da grandeza y em relação à grandeza x . Geometricamente, o símbolo $\partial y / \partial x$ representa a inclinação da curva y em torno de um certo valor de x . Algebricamente, $\partial y / \partial x$ é denominado de derivada de y em relação a x . Quando a grandeza em estudo depende apenas de uma varável, ou seja, $y = f(x)$, costuma-se usar o símbolo d no lugar de ∂ , e a derivada é escrita como dy/dx . Substituindo estas definições na equação (8), encontra-se:

$$F_y = F_x \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x+dx} - \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_x \right] \quad (10)$$

Considerando que a massa do elemento dx da corda seja $dm = \mu dx$, sendo μ a densidade linear de massa da corda, da segunda lei de Newton para a força F_y ($F_y = dm \cdot a_y$), tem-se:

$$F_y = \mu dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (11)$$

Igualando as Equações (10) e (11),

$$F_x \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x+dx} - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_x \right] = \mu dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (12)$$

Dividindo os dois membros da Equação (12) por $F_x dx$:

$$\frac{\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x+dx} - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_x}{dx} = \frac{\mu}{F_x} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (13)$$

Um leitor que possui familiaridade com o cálculo diferencial reconhecerá que o lado esquerdo da Equação (13) é a definição da derivada de uma função $y = f(x)$, quando o denominador. Como a função da definição acima é uma derivada primeira de y em relação a x , tomando o limite $dx \rightarrow 0$ tem-se que o lado esquerdo se torna uma derivada segunda de y em relação a x . Assim,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\mu}{F_x} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (14)$$

Fazendo uma rápida análise dimensional verifica-se que μ/F_x tem unidades de $(kg/m)/(kg \cdot m/s^2) = (s/m)^2$. Portanto, o coeficiente μ/F_x equivale ao inverso do quadrado da velocidade. Como a força que aparece no coeficiente está na direção do eixo x , conclui-se que esta velocidade também estará nesta mesma direção, e será interpretada como a velocidade da própria onda:

$$\frac{\mu}{F_x} = \frac{1}{v_x^2} \quad (15)$$

Com estas definições a equação da onda pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v_x^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \quad (16)$$

A Equação (16) representa todos os tipos de ondas mecânicas. A adaptação para o caso de ondas eletromagnéticas é imediata. Basta substituir a posição vertical y de oscilação das partículas do meio pelos valores dos campos elétrico e magnético na mesma posição do espaço. Além disso, v_x de ser substituído por c , símbolo utilizado para a velocidade da luz no vácuo.

$$\frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E(x, t)}{\partial t^2} \quad e \quad \frac{\partial^2 B(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B(x, t)}{\partial t^2} \quad (17)$$

As ondas eletromagnéticas são diferentes das ondas mecânicas no que tange àquilo que oscila para dar origem às ondas. Enquanto nas ondas mecânicas o parâmetro de oscilação é o deslocamento da partícula, no caso das ondas eletromagnéticas temos dois entes oscilantes, o campo elétrico E e magnético B . A variação do campo E ao longo do espaço em virtude do movimento do pulso de energia dá origem ao campo B , e vice-versa. Esta é a razão porque precisamos de duas equações para descrever completamente uma onda eletromagnética, conforme demonstrado pelas Equações (17).

Como as Equações (16) e (17) descrevem fenômenos oscilatórios, suas soluções devem ser representadas por funções matemáticas oscilatórias no tempo e no espaço. Sem entrar nos detalhes da matemática, pode-se encontrar a forma das soluções com argumentos relativamente simples. Para facilitar, considere a onda ilustrada na Figura 14. A função que representa esta onda pode ser escrita como:

$$y(x') = y_{máx} \text{sen}(kx') \quad (18)$$

O símbolo $y_{máx}$ é o máximo valor para a função $y(x')$, denominado de amplitude da onda. x' , representa qualquer ponto da onda. A constante k foi inserida no argumento da função seno porque, por definição, este não deve ter unidade física, uma vez que o seno corresponde à razão entre dois comprimentos. A constante k é conhecida na literatura como o número de propagação, e é definida considerando-se que a cada distância $\Delta x = \lambda$ a função volta a representar a mesma configuração física. Como isso ocorre a cada 2π radianos, pode-se definir $k\lambda = 2\pi$, de onde obtém-se $k = 2\pi/\lambda$. Baseado neste resultado, k é interpretado como o número de ondas dentro da distância de 2π radianos. O comprimento de onda λ representa o

período espacial da onda. Na espectroscopia encontra-se a definição para o número de ondas, ou frequência espacial, dado por $k = 1/\lambda$, e representa o número de ondas por unidade de comprimento, geralmente dado em m^{-1} ou cm^{-1} .

A Equação (18) não está completa, pois ela ainda não representa uma onda se movendo para a direita, conforme indicado na Figura 17. Veja que a velocidade não está presente na equação. Mas ela pode ser interpretada como uma fotografia da onda em um instante de tempo constante, ou seja, obtida a partir de um referencial S' em relação ao qual a onda não se desloca. Isso ocorre quando o referencial S' se desloca para a direita com a mesma velocidade da onda. Para um referencial Sestático em relação à onda, a posição x' de um ponto dela se encontra a uma distância $x = x' + vt$ após um instante de tempo t . Assim, do ponto de vista do referencial S' , a onda se desloca de $x' = x - vt$. Portanto, substituindo este valor de x' na Equação (18) tem-se:

$$y(x, t) = y_{máx} \text{sen}(k(x - vt)) = y_{máx} \text{sen}(kx - kvt) \quad (19)$$

Verificou-se que um observador no referencial S' observa um padrão periódico espacial, definido pela condição $k\lambda = 2\pi$. Do ponto de vista de um observador no referencial S em relação ao qual a onda se move, este verá um padrão periódico temporal, porquanto um ponto específico da onda se afasta dele para a direita. Após um intervalo de tempo τ a onda terá se deslocado do valor λ . Como isto ocorre a cada 2π radianos, pode-se definir $k v \tau = 2\pi$, de onde obtém-se $(2\pi/\lambda) v \tau = 2\pi$ e $\tau = \lambda/v$. Daqui fica fácil ver que τ representa o tempo para um comprimento λ passar por um ponto fixo no espaço, e por isso é denominado de período temporal, ou apenas período. A taxa com que ondas passam por esse ponto no tempo é denominada de frequência temporal, definida por $f = 1/\tau$. Usando este resultado e a definição do período, $1/f = \lambda/v$, encontra-se a equação para a velocidade da onda definida pela Equação (2): $v = \lambda f$.

É comum encontrar na literatura a definição de frequência temporal angular, escrita na forma $\omega = 2\pi/\tau = kv = 2\pi f$, cuja unidade é rad/s . Com esta definição para a frequência angular, a Equação (19) pode ser escrita na forma mais familiar:

$$y(x, t) = y_{máx} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (20)$$

para ondas mecânicas, e

$$E(x, t) = E_{\text{máx}} \text{sen}(kx - \omega t) \text{ e} \quad (21a)$$

$$B(x, t) = B_{\text{máx}} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (21b)$$

para ondas eletromagnéticas.

4.2.2 Ondas Quânticas

A equação para as ondas quânticas não pode ser demonstrada a partir de princípios fundamentais, como a 2ª Lei de Newton. Ela é deduzida a partir de dois princípios que se julgam verdadeiros sem, no entanto, ser passível de demonstração anterior. Com isso, queremos dizer que a equação é construída sobre dois postulados. O primeiro relaciona a quantidade de movimento linear $\vec{p}$ da partícula com o vetor de onda $\vec{k}$ da onda quântica associada a ela ($\vec{p} = \hbar \vec{k}$, sendo $\hbar = h/2\pi$ a constante de Planck normalizada ($\hbar = 1,054 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$). O módulo do vetor de onda $\vec{k}$ é o número de propagação, k . O segundo princípio relaciona a energia total E da partícula com a frequência angular ω da onda associada a ela ($E = \hbar\omega$). Considerando a definição clássica para a energia total de uma partícula, sendo $V(x)$ a interação, pode-se escrever a equação para a onda de matéria para o caso independente do tempo. Sem entrar em detalhes da demonstração, tem-se:

$$\left(\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right) \psi(x) = E\psi(x) \quad (22)$$

Não é objetivo deste trabalho discutir os detalhes das soluções para este tipo de equação. Apenas como ilustração, pode-se mostrar que a solução para o caso de uma partícula limitada a se mover ao longo de uma linha de comprimento L (ilustrado na Figura 13) é escrita como:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen}\left(n\pi \frac{x}{L}\right), \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (23)$$

e a energia da partícula é dada por:

$$E_n = n^2 E_1, \quad \text{com} \quad E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2mL^2} \quad (24)$$

A Figura 13a é uma representação da Equação (23) para o caso $n = 1$ e $n = 2$, enquanto na Figura 13b estão representadas curvas do quadrado do módulo da função $\psi_n(x)$:

$$|\psi_n(x, t)|^2 = \frac{2}{L} \text{sen}^2 \left(n\pi \frac{x}{L} \right) \quad (25)$$

A Equação (25) não representa a trajetória do movimento de uma partícula no espaço. Ela descreve apenas a chance de encontrar a partícula em uma posição x sem, contudo, mostrar como a partícula chega a esta posição.

4.3 O Fenômeno da Difração de Ondas

Nas seções anteriores fez-se uma descrição detalhada acerca das ondas, como forma de dar suporte ao tema principal deste trabalho, que é o desenvolvimento de uma estratégia para ensinar o fenômeno da Difração a estudantes de Ensino Médio. A motivação para esse tema está na sua importância, tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico. A difração é de grande importância para a explicação de vários fenômenos da natureza. Como exemplo, tem-se as luzes coloridas que são observadas na superfície de um CD ou DVD quando iluminados com luz branca; o avermelhado na cor da atmosfera nos períodos do início da manhã e final do entardecer; a formação de sombras de contornos não nítidos; iluminação das áreas atrás de portas entreabertas etc. Além disso, a difração é de fundamental importância em muitas aplicações de grande relevância na tecnologia atual. Ela é utilizada na formação de imagens holográficas tridimensionais e na construção de equipamentos denominados espectrômetros, utilizados em dezenas de diferentes técnicas de laboratórios na indústria e centros de pesquisa.

É sabido que as principais metodologias disponíveis para a observação da natureza em pequena escala usam as ondas como sua principal ferramenta de aferição. E é exatamente por esse motivo que o estudo da difração se torna tão importante, pois ela tanto pode ser positiva, como no processo de separação de luzes com diferentes cores em um feixe policromático, quanto negativa, enquanto limitadora do tamanho da região a ser observada. A difração desempenha papel fundamental no poder de resolução de todos os instrumentos ópticos, como câmeras, binóculos, microscópios, telescópios, e até o próprio olho humano.

Técnicas que fazem uso de ondas eletromagnéticas, como a microscopia óptica na região do infravermelho, visível, ultravioleta, a difração de raios-x e raios-gama, assim como as

técnicas que usam as ondas sonoras, como os ultrassons em hospitais e indústrias, possuem suas aplicações limitadas pela difração das ondas. Semelhantemente, as técnicas que fazem uso das ondas quânticas, como as microscopias eletrônica de transmissão e de varredura, têm seus limites impostos pelo fenômeno da difração.

Do ponto de vista conceitual, a difração está associada à mudança na direção de propagação das ondas quando elas encontram obstáculo sem sua trajetória que bloqueiam apenas parte dela, ou permitem a passagem de apenas parte dela. Esse espalhamento observado tem origem nos fenômenos da interferência construtiva e destrutiva. Por esta razão, é conveniente o estudo da interferência antes do estudo da difração.

4.3.1 Interferência de Ondas

A interferência é um dos fenômenos ondulatórios mais intrigantes e de maior relevância, não apenas porque ele leva ao entendimento de vários outros fenômenos ondulatórios, mas porque ela é fundamental em muitas aplicações tecnológicas. Expressando de uma forma simples, a interferência diz respeito ao efeito da superposição de duas ou mais ondas no mesmo local do espaço e no mesmo instante de tempo. Quando se trata de partículas materiais estáveis, ao se adicionarem duas delas a um recipiente vazio tem-se no final duas partículas, sendo impossível uma anular a existência da outra a uma observação. Esse resultado é tão óbvio que faz parte do sendo comum. Entretanto, o número de partículas é uma grandeza escalar positiva, de modo que a soma de várias parcelas sempre resulta em um valor maior do que qualquer uma das parcelas isoladas.

Quando se trata de grandezas vetoriais, como deslocamentos e campos eletromagnéticos, a realidade pode ser bem diferente. Entende-se como onda a propagação de perturbações em um sistema de partículas que interagem entre si ou em um campo eletromagnético. Nesse cenário, a superposição de duas ondas com amplitudes A_1 e A_2 no mesmo local do espaço resulta na observação de apenas uma única onda cuja amplitude pode variar de 0 a $A_1 + A_2$.

Do ponto de vista qualitativo, a superposição de duas ondas pode ser facilmente entendida geometricamente. A Figura 9 ilustra dois vetores $\vec{A}_1$ e $\vec{A}_2$ e suas projeções sobre o eixo y , $\vec{y}_1$ e $\vec{y}_2$. Os valores absolutos dos vetores $\vec{A}_1$ e $\vec{A}_2$ representam as amplitudes das duas ondas. Estes vetores não estão fixos, mas giram no sentido anti-horário, ambos com a mesma velocidade ω . No momento observado ($t = 0$), os vetores formam ângulos θ_1 e θ_2 em relação

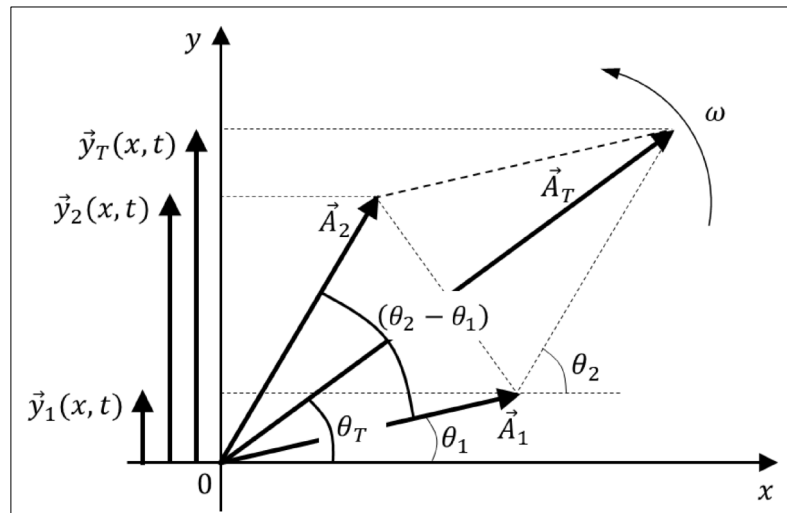
ao eixo x , de modo que o ângulo entre eles é $\theta_2 - \theta_1$ constante. Usando a regra do paralelogramo, encontra-se diretamente:

$$A_T^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (26)$$

Em geral, em vez de descrever uma onda pela sua amplitude, como na Equação (26), é mais útil descrevê-la em função de sua intensidade I , que representa a quantidade de energia por unidade de área e tempo, ou seja, é a potência por unidade da área atingida pela onda. Por definição, a intensidade é descrita como o quadrado da amplitude da onda, $I_T = A^2$. Assim, a Equação (26) se pode ser escrita na forma:

$$I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (27)$$

Figura 18 – Ilustração para a soma de dois vetores girando com velocidades constantes.



Fonte: Próprio autor.

A soma dos dois efeitos tem a intensidade I_1 que se obteria com apenas um deles, mais a intensidade I_2 que se teria com apenas o outro, mais um termo de correção, proporcional a $\sqrt{I_1I_2}$. Essa correção é chamada de interferência. Este termo é denominado interferência quer ele seja positivo ou negativo, diferentemente da conotação deste termo no cotidiano. Se o termo de interferência é positivo ($\theta_2 - \theta_1 < \pi/2$) ele é denominado interferência construtiva. É o que ocorre quando duas ondas se reforçam numa região do espaço. O caso oposto é denominado de interferência destrutiva ($\theta_2 - \theta_1 > \pi/2$), que ocorre quando uma onda anula parcialmente o

efeito causada por outra. No cenário em que $\theta_2 = \theta_1$, $\cos(\theta_2 - \theta_1) = 1$, as ondas estão em fase e a interferência será a máxima possível e $I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$. Quando $\cos(\theta_2 - \theta_1) = -1$, as ondas estão totalmente fora de fase, e a interferência será mínima e $I_T = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$.

Um caso particular de grande importância ocorre quando as duas ondas possuem a mesma amplitude ($A_1 = A_2 = A$). Os ângulos entre os vetores $\vec{A}_T$, $\vec{A}_1$ e $\vec{A}_2$ da Figura 18 são iguais a $(\theta_2 - \theta_1)/2$. Assim, a amplitude total equivale à soma das duas projeções dos vetores $\vec{A}_1$ e $\vec{A}_2$ na direção do vetor $\vec{A}_T$. Tomando apenas o módulo da soma, tem-se:

$$A_T = 2A \cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) \quad (28)$$

Considerando as amplitudes das duas ondas iguais ($I_1 = I_2 = I_0$), a equação (27) pode ser reescrita na forma:

$$I_T = 2I_0[1 + \cos(\theta_2 - \theta_1)] = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) \quad (29)$$

Observe que a Equação (29) é equivalente ao quadrado da Equação (28). Uma análise direta mostra que apenas a fase relativa $(\theta_2 - \theta_1)$ entre as ondas é determinante para a amplitude ou intensidade da onda resultante. Quando as ondas estão em fase ($\theta_2 = \theta_1$) a onda resultante tem a maior amplitude possível, igual a $2A$, o que equivale a uma intensidade quatro vezes maior, $I_T = 4I_0$. Tomando o valor médio da Equação (29) sobre todos as diferenças de fase possíveis o resultado é $I_T = 4I_0 \times \frac{1}{2} = 2I_0$, como era esperado. A energia total contida nas duas ondas originais não é alterada pelo efeito da interferência, mas apenas redistribuída no espaço. Esse é um resultado bastante interessante, e será explorado na demonstração do aplicativo sobre interferência e difração.

Quando a diferença entre as fases for de 180° ($\theta_2 = \theta_1 + 180^\circ$) a intensidade resultante será nula. Isto significa que a interferência é totalmente destrutiva, e o resultado é equivalente ao de não ter ondas presentes. Quando se trata de uma superposição de dois feixes luminosos de mesma intensidade, incidindo os dois numa tela pode resultar em completa escuridão, ou seja, um feixe de luz anula completamente o efeito causado pelo outro sobre o observador. Este comportamento é muito diferente do que se espera para partículas. Portanto, não foi sem razão

que muitos cientistas nos anos de 1920 se mostraram céticos com relação à teoria das ondas quânticas, que previa a interferência construtiva e destrutiva para partículas materiais.

A Equação (28) não apresenta uma descrição completa da superposição, pois ela contém apenas a amplitude da onda resultante. Para achar o termo oscilante no tempo usa-se o método algébrico. Para facilitar os cálculos, considere duas ondas com mesma amplitude, mesma frequência angular, se movendo no mesmo sentido positivo do eixo x , e defasadas no espaço por um valor Δx ($\theta_2 - \theta_1 \equiv k\Delta x$):

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad e \quad y_2(x, t) = A \sin(k(x + \Delta x) - \omega t) \quad (30)$$

A operação de soma algébrica é direta:

$$y_T(x, t) = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \varphi - \omega t) \quad (31)$$

Usando a relação trigonométrica $\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{1}{2}(A + B) \cos \frac{1}{2}(A - B)$ e fazendo os cálculos necessários, encontra-se:

$$y_T(x, t) = \left\{ 2A \cos \left(\frac{k\Delta x}{2} \right) \right\} \sin \left[(kx - \omega t) + \frac{k\Delta x}{2} \right] \quad (32)$$

E a intensidade da onda resultante em qualquer posição x e instante de tempo t dada por:

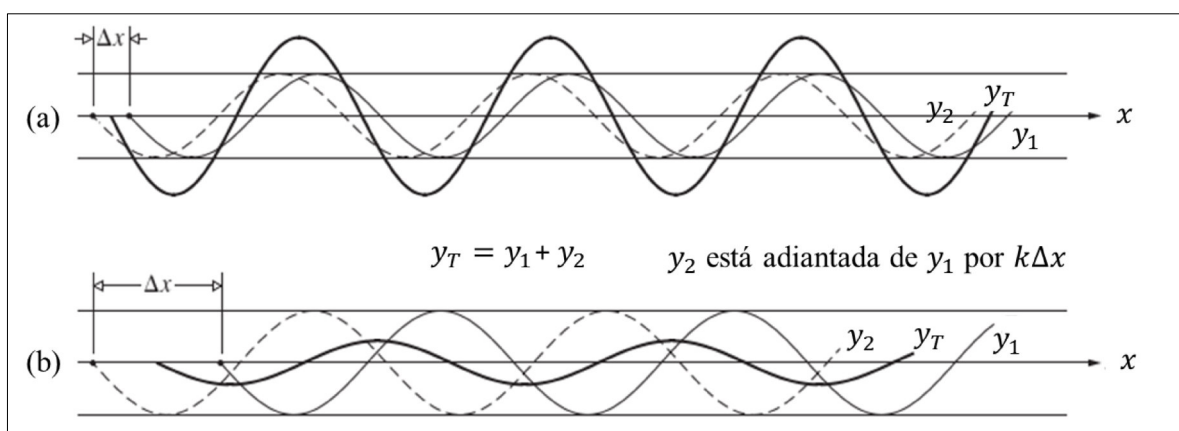
$$I_T(x, t) = \left\{ 4I_0 \cos^2 \left(\frac{k\Delta x}{2} \right) \right\} \sin^2 \left[(kx - \omega t) + \frac{k\Delta x}{2} \right] \quad (33)$$

A Equação (33) descreve completamente a onda resultante da superposição, e mostra que ela possui a mesma frequência das ondas originárias, mas tem fase diferente por uma quantidade $k\Delta x/2$. O termo entre chaves é a intensidade da onda resultante, conforme demonstrado pela Equação (29). Ele também depende da diferença de caminho Δx , um parâmetro facilmente controlado quando se quer produzir ondas com maior ou menor intensidade em aplicações tecnológicas. Além disso, o modelo é adequado para descobrir a defasagem de ondas, a partir da intensidade da onda resultante, em muitos processos físicos. Como $k = 2\pi/\lambda$, do argumento da função cosseno tem-se $k\Delta x/2 = \pi\Delta x/\lambda$. Para $\Delta x \ll \lambda$, a amplitude resultante é aproximadamente igual a $2A$; se $\Delta x = 0, \pm\lambda, \pm2\lambda, \pm3\lambda, \dots$, a amplitude terá valor absoluto igual a $2A$ e a interferência é construtiva, um número inteiro para comprimento de ondas. Para $\Delta x = \pm\lambda/2, \pm3\lambda/2, \pm5\lambda/2, \dots$, um número semi-inteiro de

comprimentos de ondas, a amplitude é zero e a interferência será destrutiva. Este fato será melhor discutido na seção 4.3.2.

A Figura 19 é uma representação das Equações (30) e (32) ao longo do eixo x . Ela ilustra como a fase relativa entre as ondas $k\Delta x$ controla comportamento da onda resultante. Compatível com a descrição do texto acima, para $\Delta x \ll \lambda$ a interferência é construtiva (maior amplitude), enquanto que para distâncias $\Delta x \approx \lambda/2$ a interferência se torna destrutiva (menor amplitude).

Figura 19 – Interferência de ondas fora de fase por $k\Delta x$ radianos.



Fonte: Eugene Hetch.

Todos os resultados discutidos nesta seção foram feitos considerando que os dois vetores da Figura 18 giram com a mesma velocidade angular ω . Em outras palavras, a diferença de fase $\theta_2 - \theta_1 \equiv k\Delta x$ entre as duas ondas permanece constante com o tempo. Quando este é o caso, diz-se que as ondas são coerentes. Isso ocorre com fontes de luz monocromática, ou com luz do tipo laser. A consequência disso é que o padrão de interferência permanece por um tempo muito longo a ponto de parecer infinito ao olho humano, sendo facilmente observado. Entretanto, muitas fontes emitem ondas cujas diferenças de fases mudam rapidamente com o tempo; assim, o termo $k\Delta x$ oscila muito rápido.

Para fontes de luz comuns, como lâmpadas, chamas, ou mesmo a luz do Sol, o tempo de coerência é de apenas 10^{-8} s. Quando observadas em instantes superiores estas as ondas já estão defasadas (incoerentes), e a interferência não pode ser mais observada diretamente com o olho humano, mas apenas detectores adequados a esse intervalo de tempo. Matematicamente, isso pode ser entendido a partir da equação (27) da seguinte forma. Quando todas as ondas

possuem o mesmo valor de $\theta_2 - \theta_1$ o valor médio do termo $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta_2 - \theta_1)$ é igual a ele próprio e, portanto, diferente de zero. Mas quando o termo $(\theta_2 - \theta_1)$ é diferente para cada par de ondas, podendo variar de 0 a 360° , o valor médio de $\cos(\theta_2 - \theta_1)$ passa a ser nulo. Nesse caso, apenas os termos $I_1 + I_2$ permanecem não nulos. Essa é a razão porque não se vê manchas claras e escuras nas paredes de uma sala quando uma lâmpada é acesa no seu teto, mas sim uma iluminação uniforme em todo o ambiente.

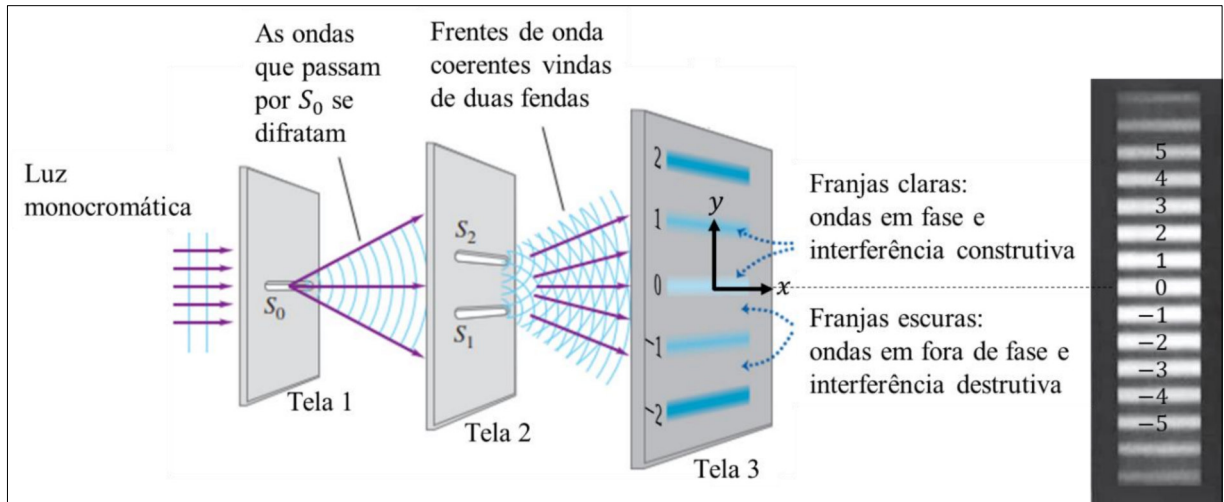
A análise da interferência feita até aqui se concentrou no efeito da superposição de duas ondas que se supõem coerentes. Quando se trata de ondas mecânicas, como ondas na água ou ondas sonoras, é fácil produzir ondas coerentes, pois as dimensões das fontes podem ser muito menores do que os comprimentos de onda destas. No entanto, quando se trata de ondas eletromagnéticas a situação é bem diferente. Nas fontes de luz comuns, os átomos ganham um excesso de energia por causa da agitação térmica e do impacto com elétrons acelerados. Uma vez energizado, esses átomos começam a irradiar energia até perdê-la completamente, em geral em um intervalo de tempo da ordem de 10^{-8}s . Esse é o tempo de coerência mencionado no parágrafo anterior. Os muitos átomos existentes em uma fonte macroscópica irradiam de modo não sincronizado, e as fases relativas $\theta_2 - \theta_1$ não são mais constantes.

Entretanto, a luz proveniente de uma única fonte macroscópica pode ser dividida de modo que suas partes sejam emergentes de duas ou mais regiões do espaço, formando duas ou mais fontes secundárias. Com isso, qualquer variação de fase da fonte afeta igualmente essas fontes secundárias e isso não altera suas fases relativas. Esse princípio deu origem a uma das experiências mais importantes da história da ciência, haja vista ter sido por intermédio dela que a luz passou a ser considerada uma onda. Trata-se da experiência da dupla fenda, realizada pelo físico inglês Thomas Young nos primeiros anos de 1800.

A Figura 20 ilustra o famoso experimento da dupla fenda. Uma frente de ondas planas monocromáticas atinge a primeira tela contendo uma abertura (ou fenda) estreita, S_0 . Devido à pequenez da fenda, a luz que emerge dela se origina de apenas uma pequena região da fonte. Portanto, a fenda S_0 se comporta quase como se fosse uma fonte ideal ou pontual. Conforme será explicado na próxima seção, frentes das ondas se espalham (difratam) e atingem a segunda tela, contendo duas aberturas também estreitas, S_1 e S_2 . As frentes de ondas que chegam a essas aberturas estão em fase porque percorrem as mesmas distâncias de S_0 . As ondas que emergem delas também estão em fase, de modo que S_1 e S_2 são fontes coerentes. Se houver alguma alteração na fase da luz emitida pela fonte antes da Tela 1, esta manifestará igualmente nestas duas ondas emergentes da segunda tela, de modo que, mesmo assim, as ondas emergentes

permanecem coerentes. As experiências modernas usam lasers, dispositivos que produzem luz monocromática e coerente, em substituição à fenda S_0 .

Figura 20 – Interferência de ondas luminosas passando por duas fendas.



Fonte: Sears/Zemanski.

As duas ondas emergentes das aberturas S_1 e S_2 na Tela 2 difratam e se superpõem, produzindo um padrão de máximos e mínimos (interferência). Entretanto, este efeito só pode ser visualizado se houver uma tela sobre a qual as ondas incidam e sejam refletidas (Tela 3). A tela será mais fortemente iluminada nas regiões onde as ondas provenientes das fendas interferem construtivamente, representadas pelos números $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, denominados ordem de difração; por outro lado, a tela será mais escura nos pontos onde a interferência é destrutiva. À direita da figura está mostrada uma fotografia com um padrão de interferência na qual se vê, nitidamente, faixas claras e escuras.

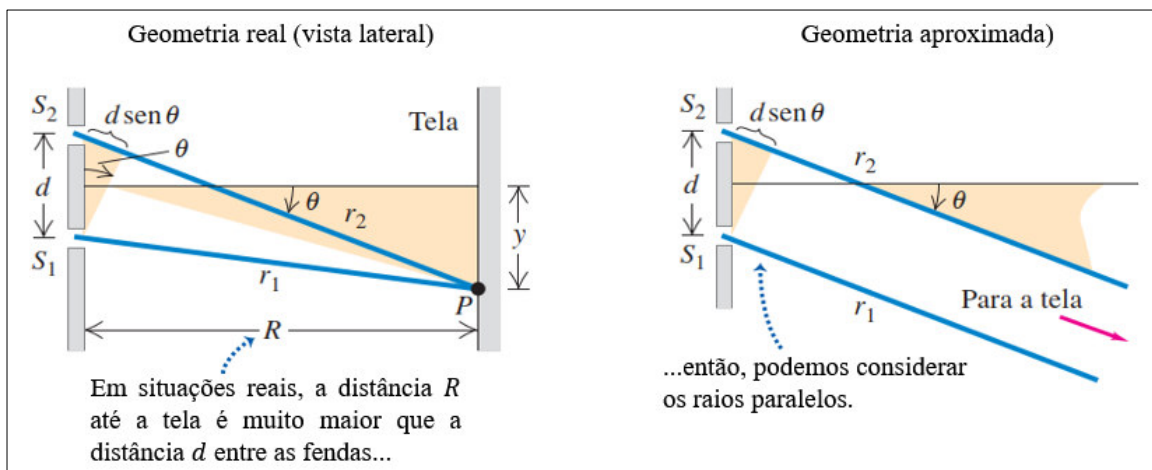
Na Figura 21 (esquerda), a tela de projeção está relativamente próxima às fendas, de modo que os raios que conectam as duas fendas a um ponto da tela não podem ser considerados paralelos. Essa situação é conhecida como difração de campo próximo ou difração de Fresnel. Na Figura 21 (direita) a tela de projeção está longe o suficiente para que os dois raios sejam considerados paralelos, e esse cenário é conhecido como difração de Fraunhofer. As discussões feitas neste trabalho serão restritas ao caso da difração de Fraunhofer, em geral mais fácil de analisar detalhadamente que a difração de Fresnel. Com essas ponderações, para simplificar a análise matemática da experiência de Young, considere a geometria ilustrada na Figura 12, na qual a distância R entre o plano das fendas e a tela de projeção é muito maior que a distância d entre as fendas. Com essa aproximação, as linhas que ligam as fendas ao ponto P são

aproximadamente paralelas, como indica a figura à direita. Portanto, a diferença de caminho é dada por:

$$r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (34)$$

sendo r_1 e r_2 as distâncias entre as fendas e o ponto de superposição das ondas na tela; θ é o ângulo de inclinação das frentes de onda.

Figura 21 – Análise geométrica da experiência de Young.



Fonte: Sears/Zemanski.

Conforme já foi dito, a interferência construtiva ocorre nos pontos da tela em que a diferença de caminho das duas frentes de onda é igual a um número inteiro de comprimentos de onda, $m\lambda$, onde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Portanto, as regiões brilhantes sobre a tela ocorrem para os ângulos θ que satisfazem a relação:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (35)$$

Do mesmo modo, a interferência destrutiva, com a formação de regiões escuras sobre a tela, ocorre nos pontos em que a diferença de caminho é igual a um número semi-inteiro de comprimentos de onda, $(m + \lambda/2, \dots)$. Assim,

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (36)$$

As Equações (35) e (36) mostram os critérios para se ter interferência construtiva e destrutiva. Mas elas não mostram em que local da tela isso ocorre. A dedução de uma expressão para localizar as posições dos centros das franjas brilhantes é bem simples. Na Figura 20 a distância vertical das franjas y é medida a partir do centro da figura de interferência, que corresponde à projeção da fenda S_0 sobre a Tela 3. Seja y_m a distância a partir do centro da figura de interferência ($\theta = 0$) até o centro da franja brilhante de ordem m . Seja θ_m valor correspondente de θ para este y . Então,

$$y_m = R \tan \theta_m \quad (37)$$

Para o caso particular em que $y_m \ll R$, θ_m é muito pequeno e $\tan \theta_m \approx \sin \theta_m$. A Equação (37) pode ser reescrita como:

$$y_m = R \sin \theta_m \quad (38)$$

Combinando as Equações (35) e (38) encontra-se a expressão que mostra a posição das franjas claras:

$$y_m = R \frac{m}{d} \lambda, m = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (39)$$

Este resultado mostra que os centros das franjas claras aparecem a distâncias $y_1 = R\lambda/d$, $y_2 = 2R\lambda/d$, $y_3 = 3R\lambda/d$, ..., a partir da região central entre as fendas ($m = 0$), onde se localiza uma franja clara também. Lembre-se que o ponto central da tela de projeção se encontra à mesma distância das fendas. Neste tipo de experimento os valores de R, d e y_m são facilmente medidos. Portanto, tem-se por meio dele o comprimento de onda λ da luz. A experiência de Young foi a primeira medida direta do comprimento de onda da luz. Por outro lado, conhecendo-se o comprimento de onda pode-se determinar a distância d entre as fendas. Por fim, controlando-se os valores de R e d pode-se escolher em que região do espaço a interferência será construtiva ou não. Observe que a distância entre duas franjas brilhantes adjacentes na figura de interferência ($\Delta y = y_{m+1} - y_m = R\lambda/d$) é inversamente proporcional à distância d entre as fendas. Quanto mais próximas as duas fendas estão, maior é o

espaçamento entre as franjas. Quando a distância entre as fendas é muito grande as franjas ficam muito próximas, e será observada apenas uma distribuição uniforme de intensidade.

4.3.2 A Difração à Luz do Princípio de Huygens-Fresnel

Uma vez que os principais conceitos básicos relativos às ondas e ao fenômeno da interferência já foram apresentados, faremos agora uma breve discussão sobre os aspectos físicos da difração, evidenciando como este conceito pode ser usado para explicar vários fenômenos observados na natureza e como ele pode ser usado em aplicações tecnológicas. A Difração pode ser imaginada como sendo o fenômeno da interferência de uma grande quantidade de ondas, e que se manifesta apenas quando as ondas viajantes encontram um obstáculo que impede parcialmente a sua passagem. Esse fenômeno foi originalmente estudado pelo padre jesuíta Francesco Maria Grimaldi, na década de 1650, sendo o primeiro a denominá-lo Difração. Por meio de seus estudos, Grimaldi demonstrou que o efeito da difração da luz não podia ser conciliado com a versão de que esta fosse formada de partículas que se moviam em linha reta. Essa foi uma das primeiras indicações de que a luz era uma onda.

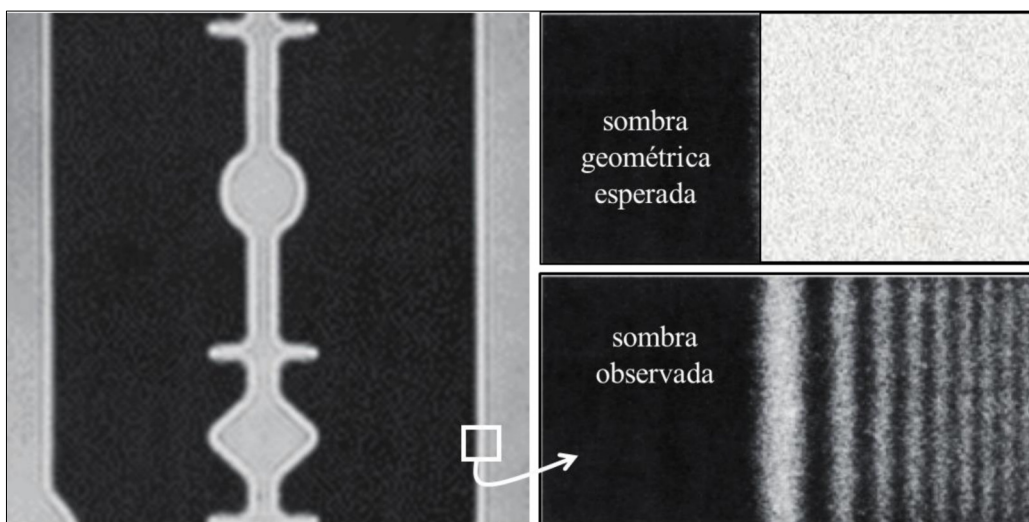
O fenômeno da Difração está presente no cotidiano, e muitas vezes as pessoas não se dão conta dele. O som da sirene de uma ambulância que se encontra em uma rua fora do alcance da visão é ouvido essencialmente por causa da difração do som em casas, carros, árvores etc. Do mesmo modo, quando duas pessoas conversam de costas uma para a outra, elas se ouvem por causa da difração do som. Uma pessoa atenta, observará que as sombras dos objetos nunca têm contornos bem definidos, pelo contrário, a quantidade de luz aumenta gradativamente à medida que se sai da sombra em direção à claridade. Esses efeitos, quando devidamente entendidos, podem ser reproduzidos intencionalmente para a construção de dispositivos de grande importância para a tecnologia atual.

A Figura 22 mostra a fotografia de uma lâmina de barbear, iluminada com luz monocromática a partir de uma pequena abertura para que se obtivesse uma fonte pontual. Percebe-se que a imagem não possui contornos bem definidos, mesmo quando observada de longe. A Figura inserida à direita é uma fotografia ampliada dos limites da sombra. Quando vista de perto, fica claro que a sombra apresenta um padrão de máximos e mínimos, característico da Difração (interferência).

Em geral, na vida cotidiana não se observa Difração nas sombras dos objetos. A razão desta ausência provém do fato de que as fontes de luz não são monocromáticas nem puntiformes. Se na fotografia da Figura 22 tivesse sido usada luz branca, proveniente de uma

lâmpada fluorescente, como exemplo, comprimentos de onda diferentes provenientes da luz de diferentes pontos da lâmpada produziriam suas próprias difrações, e a superposição destas anularia o efeito global.

Figura 22 – Fotografia de uma lâmina de barbear (esquerda) mostrando a difração nos seus contornos. À direita está mostrada uma ampliação da borda da sombra.



Fonte: Sears/Zemanski.

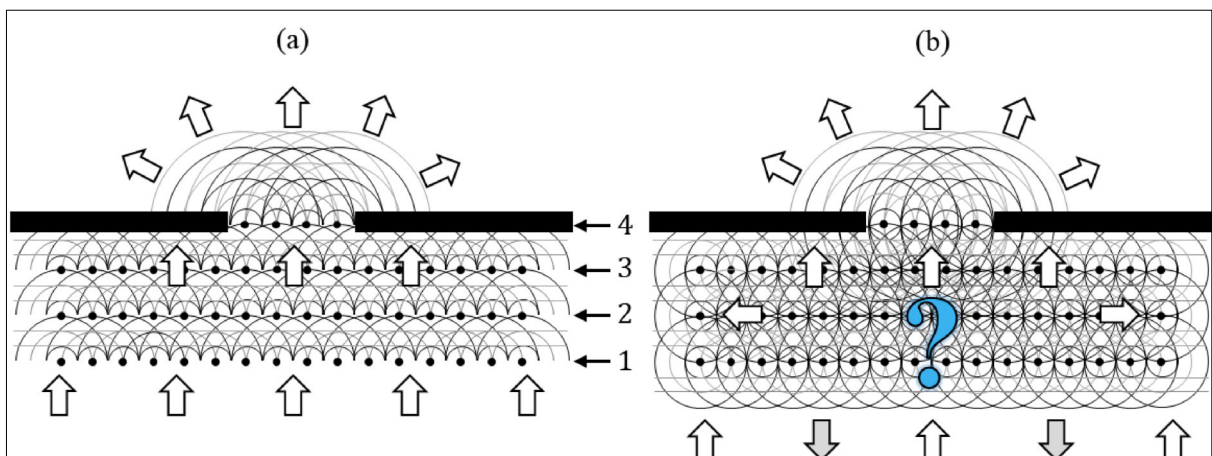
A interferência observada na borda da sombra da figura anterior pode ser explicada evocando-se o denominado princípio de Huygens, segundo o qual cada ponto não obstruído de uma frente de onda atua como se fosse uma fonte de ondas esféricas secundárias. Dizendo de outra forma, cada ponto do espaço alcançado por uma onda age como se fosse uma fonte luminosa pontual que emite luz em todas as direções, na mesma frequência da onda que o atinge. Embora muito utilizado na literatura para explicar a Difração, esse princípio apresenta sérias limitações, sendo incorporado à explicação como uma espécie de postulado, ou seja, uma conjectura sem explicações fundamentais, a não ser a de que se adequa à observação experimental.

A Figura 23 ilustra uma onda plana se deslocando na direção vertical, de baixo para cima, conforme indicado pelas setas grandes. Os pequenos pontinhos representam fontes de ondas esféricas, ou seja, fontes pontuais. A primeira limitação do princípio de Huygens está no fato de que ele só leva em consideração a envoltória (superposição) das frentes de ondas, provenientes das infinitas fontes pontuais (destacadas na Figura 23a pelas linhas numeradas 1, 2 e 3), que se propaga na direção da onda original (diretamente para cima), não levando em

conta o que acontece com o restante das frentes de ondas que se propagam nas outras direções do espaço, inclusive na direção oposta à da onda original, conforme ilustrado na Figura 23b.

Baseado na ideia de Huygens, não é possível explicar porque após a fenda a envoltória das infinitas ondas não viaja mais apenas na direção da onda original, mas se espalha em todas as direções, conforme ilustrado na parte superior da Figura 23. Em outras palavras, o princípio não explica porque as ondas se difratam. Além disso, o princípio de Huygens não leva em conta o comprimento de onda das ondas. Isto significa que o padrão das frentes de ondas é o mesmo para todos os tipos de onda. Mas não é isso o que se observa na natureza. O som da buzina de um carro se difrata facilmente em uma árvore entre o carro e uma pessoa, não projetando nesta a sua “sombra”. Entretanto, a luz proveniente dos faróis possui um padrão de frentes de onda diferente, e a sombra da árvore é projetada na pessoa.

Figura 23 – Ilustração para o princípio de Huygens.



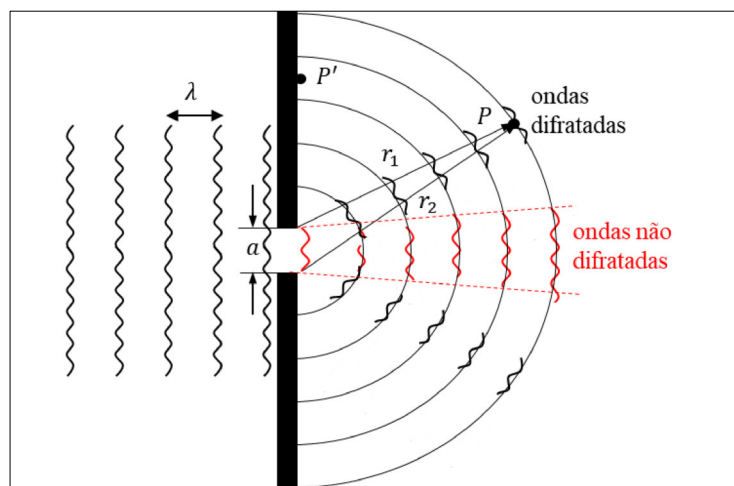
Fonte: Próprio Autor.

Estas dificuldades foram superadas parcialmente por Augustin-Jean Fresnel, na década de 1830, com a adição do efeito de interferência, conceito desenvolvido por Thomas Young durante suas famosas experiências nos primeiros anos de 1800. Um dos grandes achados de Fresnel foi demonstrar matematicamente que a soma de duas funções senoidais de mesma frequência e fases diferentes têm efeito semelhante ao de somar duas forças em diferentes direções. Neste sentido, Fresnel mostrou que duas ondas de mesma amplitude e frequência, defasadas de 180 graus no mesmo local do espaço, é fisicamente equivalente a não ter nenhuma onda presente, assim como ter duas forças de mesmo valor e sentidos contrários atuando sobre uma partícula resulta no mesmo efeito de não ter nenhuma força presente.

Com o auxílio do princípio Huygens-Fresnel pode-se fornecer uma explicação qualitativa do fenômeno da difração. A Figura 24 ilustra uma versão simplificada uma onda plana que atravessa a fenda de diâmetro a em uma tela e é difratada. Apenas a envoltória das frentes de ondas é mostrada. Considere uma envoltória que atinge o ponto P . A diferença entre os caminhos ópticos, descritos pelos raios r_1 e r_2 que partem das bordas da fenda, é dado por $\delta = |r_2 - r_1|$. Se cada ponto não obstruído da onda atua como uma fonte coerente de novas ondas, a maior valor para δ ocorre quando as fontes se encontram exatamente sobre as bordas da fenda, como mostrado na figura. Para este caso tem-se $\delta_{\text{máx}} \leq a$.

No caso particular em que o ponto P está em qualquer local sobre a tela, ilustrado pelo ponto P' , tem-se $\delta_{\text{máx}} = a$. Se $\lambda > a$, então $\lambda > \delta_{\text{máx}}$, e como as ondas partem em fase da abertura, elas vão se interferir construtivamente, independentemente de onde esteja o ponto P . Portanto, se o comprimento de onda da onda é muito maior do que o tamanho da abertura da fenda, as frentes de onda se espalharão para todas as regiões (grandes ângulos) após a fenda. Por outro lado, se o comprimento de onda da onda for muito menor do que a abertura da fenda, as ondas não se difratam, e continuam sua trajetória sem desvio, conforme indicado na parte central da Figura 24. Para um dado comprimento de onda, quando menor a abertura, mais circular se torna a onda difratada. Dito de outra forma, o princípio de Huygens-Fresnel mostra que a difração é uma manifestação da interferência construtiva. Este resultado está em pleno acordo com a Equação (33) e as discussões que se seguiram a esta.

Figura 24 – Ilustração para a difração usando o princípio de Huygens-Fresnel.



Fonte: Próprio Autor.

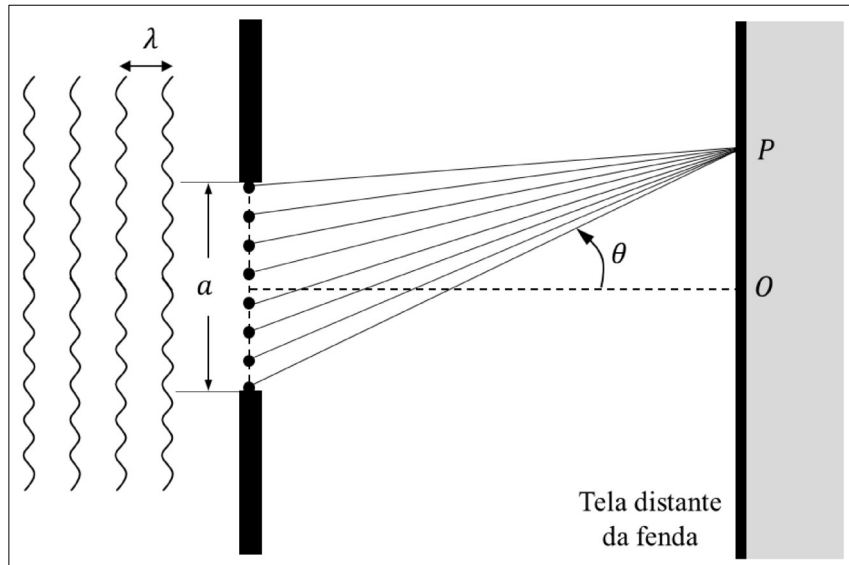
4.3.3 Intensidade das Ondas Difractadas

Na seção 4.3.1 discutiu-se como as ondas se superpõem em um ponto P do espaço sem, contudo, levar em conta de onde estas ondas vieram, ou qual a distribuição espacial resultante no entorno de P . A Equação (33) mostra apenas as características da onda resultante da superposição de duas ondas que chegaram ao ponto P atrasadas por um intervalo de tempo equivalente a $\Delta t = \Delta x/c$, conforme mostrado na Figura 19. Mas a análise da Difração requer que se conheça os detalhes da distribuição espacial da intensidade resultante em todas as regiões em volta do ponto P . Uma descrição qualitativa desta distribuição foi feita na seção 4.3.2, culminando com os comentários da Figura 23. Na presente seção, a distribuição de intensidades será demonstrada de forma quantitativa usando uma ferramenta matemática simples, porém muito poderosa.

O método mais simples para se deduzir uma expressão para a distribuição da intensidade na Difração produzida por uma fenda única é o da soma de vetores. Como esses vetores representam ondas, eles são chamados de fasores. O fasor é um vetor cujo comprimento representa a amplitude da onda, e cuja direção, em relação a uma direção escolhida, representa o ângulo de fase da onda. Na representação de fasores, quando a amplitude da onda varia no tempo, sua variação pode ser expressa pela rotação do fasor. Os fasores já foram usados na Figura 18 para demonstrar a intensidade total da superposição, resumida na Equação (33).

A Figura 25 ilustra uma onda plana que se desloca para a direita e encontra uma fenda com abertura a . Evocando o princípio de Huygens-Fresnel, considere que a frente de onda plana possa ser representada por 8 fontes pontuais, alinhadas com a fenda (representadas pelos pontos dentro da fenda). Elas emitem ondas secundárias que se superpõem sobre toda a tela, que se encontra a grande distância da fenda, para satisfazer o critério de Fraunhofer. Para fins de demonstração, considere as frentes de ondas (representadas pelas linhas) que se dirigem para o ponto P . Embora não pareça claro na figura, como a tela está muito distante da fenda, todos os ângulos θ_i entre as frentes de onda e a linha tracejada (referência no centro da fenda) são considerados iguais a θ . O objetivo é encontrar um padrão para a distribuição da intensidade das ondas superpostas na tela em função dos parâmetros geométricos a , λ e θ mostrados na Figura 25, já que todo são facilmente obtidos experimentalmente.

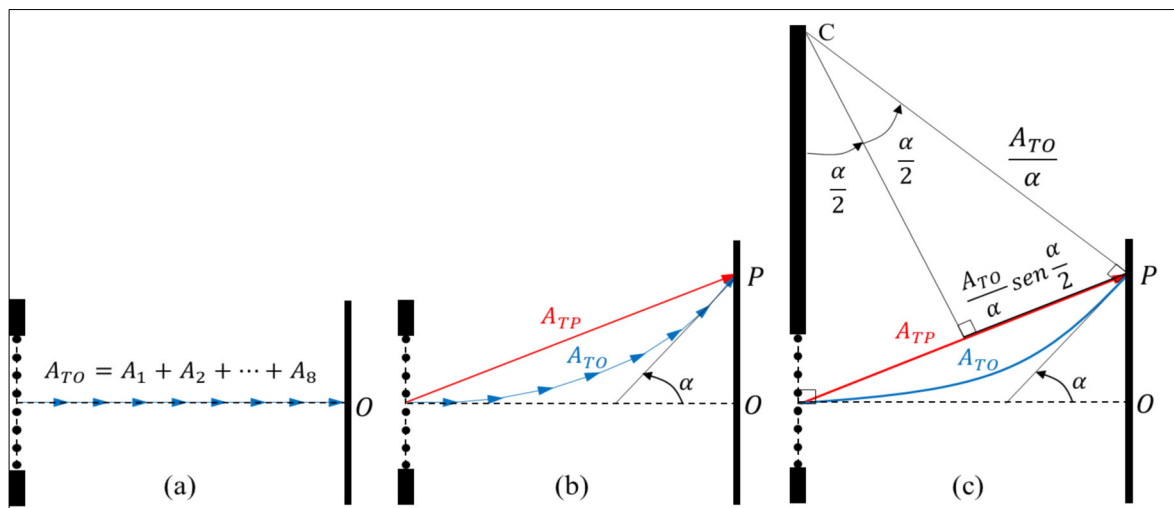
Figura 25 – Ilustração para a difração no limite de Fraunhofer



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 26 ilustra o que ocorre com as ondas da Figura 25, do ponto de vista de fasores. Agora, em vez de linhas, cada onda é representada por um fasor de magnitude A_i e ângulo de fase α_i . O módulo da soma vetorial dos fasores em cada ponto da tela é A_T . Quando se observa o ponto O da tela (Figura 25a), a soma das amplitudes das ondas é $A_{TO} = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_8$. Como o ponto O é simétrico em relação ao centro da fenda, todos os fasores estão em fase (possuem a mesma direção e o mesmo sentido). Observando-se o ponto P da tela (Figura 26b), a amplitude das ondas que chegam a este ponto da tela é A_{TP} . Como P não é simétrico em relação à fenda, os fasores que chegam a ele estão defasados por um ângulo α em razão das diferentes distâncias às fontes.

Figura 26 – Ilustração para a soma de fasores.



Fonte: Próprio Autor.

A soma vetorial dos fasores é indicada pelo perímetro de um setor circular poligonal de 8 lados, associados às 8 fontes. A amplitude A_{TP} é dada pelo comprimento da reta que une as extremidades do setor poligonal. Baseado no princípio de Huygens-Fresnel, tem-se de fato muitas ondas (conceitualmente infinitas delas) dentro da fenda e isso está ilustrado na Figura 17c. Neste limite, a linha poligonal de fasores transforma-se em um arco de circunferência, cujo comprimento é igual a A_{To} . Traçando-se perpendiculares às extremidades do arco encontra-se o centro de curvatura, C. Da definição de setor circular, $s = R\theta$, encontra-se o raio do círculo, $R = A_{To}/\alpha$. Associando a amplitude das ondas superpostas ao comprimento A_{TP} , da Figura 26c, tem-se:

$$A_{TP} = A_{To} \frac{\text{sen}(\alpha/2)}{\alpha/2} \quad (40)$$

A Equação (40) fornece a amplitude das ondas superpostas em todos pontos da tela. Lembrando que a intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado de sua amplitude, a equação acima torna-se:

$$I(\alpha) = I_0 \left[\frac{\text{sen}(\alpha/2)}{\alpha/2} \right]^2 \quad (41)$$

onde $I(\alpha) = A_{TP}^2$ e $I_0 = A_{To}^2$.

A Equação (41) não é muito útil do ponto de vista prático porque o ângulo α não faz parte dos parâmetros do aparato experimental (Figura 25). Entretanto, pode-se reescrevê-la facilmente em função de a, λ e θ . Adaptando o resultado da Equação (34) para o contexto da Figura 16, a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas é $r_2 - r_1 \equiv \Delta x = a \text{sen} \theta$. Por outro lado, a diferença de fase pode ser escrita como $\theta_2 - \theta_1 \equiv \alpha = k \Delta x$. Daqui,

$$\alpha = k a \text{sen} \theta = \frac{2\pi}{\lambda} a \text{sen} \theta \quad (42)$$

Substituindo este último resultado na Equação (41), tem-se o resultado desejado:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a (\text{sen} \theta)/\lambda]}{\pi a (\text{sen} \theta)/\lambda} \right]^2 \quad (43)$$

Existem três maneiras de apresentar o conteúdo discutido até aqui sobre a intensidade da onda difratada a um grupo de estudantes do Ensino Médio. A primeira e mais abstrata é por meio da Equação (43). Apenas observando essa equação é muito difícil um estudante ter noção clara sobre como a energia transportada por uma onda que atravessa a fenda se distribui no espaço após a fenda. Mas é precisamente o que mostra essa equação. A segunda maneira é por meio do desenho da função $I(\theta)$ para diferentes direções α após a fenda, mantendo o comprimento de onda λ e a largura a da fenda constantes. A terceira forma é a partir de simulações computacionais, conforme será discutido na seção 4.4.2.

A Figura 27 representa três formas diferentes de expressar a Equação (43). Ela fornece o padrão da intensidade normalizada da onda na região após a fenda. Inicialmente, ondas planas se movem da esquerda para a direita, conforme indicado na figura. Para descrever a primeira forma, considere que as estas ondas tenham comprimento de onda $\lambda_1 = a/10$, ou seja, um comprimento de onda muito menor do que a abertura da fenda. Neste caso, a Equação (43) mostra que as frentes de onda que atravessam a fenda não se espalham muito (difratam), e essencialmente seguem seu sentido normal de propagação.

Na Figura 24 essa ideia foi representada desenhando as ondas diretamente no alinhamento da fenda. Aqui tem-se a intensidade das ondas após a fenda. Isso pode ser visto pelo pico estreito que se encontra na frente da fenda. Como o comprimento de onda é muito pequeno, a envoltória difratada revela a inversão na direção da oscilação das ondas difratadas e os pequenos picos de amplitude negativa são observados. Pelo fato de $I(\theta)$ ser proporcional ao quadrado da amplitude, os pequenos picos aparecem para cima.

Para entender melhor, imagine que um detector de luz gire ao longo da linha circular pontilhada, começando em $\theta = +90^\circ$ e indo até $\theta = -90^\circ$. A leitura desse detector seria zero, com exceção na região na frente da fenda. Esta é a razão porque se afirmou que a luz não se espalhou após a fenda. Tão logo o detector sai da frente da fenda, a intensidade cai rapidamente a zero. Para tornar isso mais claro, imagine que estas ondas sejam do tipo sonora e estejam dentro do limite de audição humana. Se a fenda representa a porta de uma sala com 1 m de largura, uma pessoa junto à parede a 2 m de distância da porta (representada pelo ponto 1 na figura) não ouviria o som proveniente de dentro da sala.

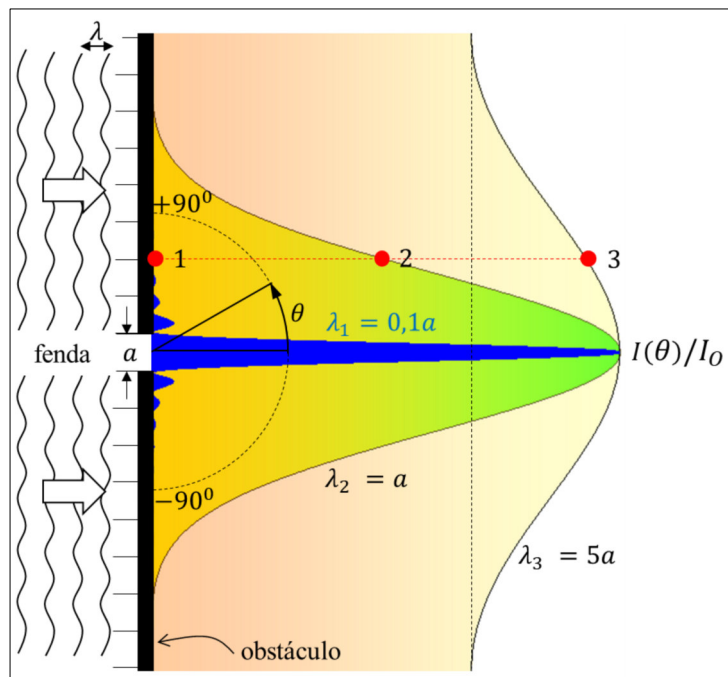
Considere agora que as ondas tenham comprimento de onda $\lambda_2 = a$. Isso está representado na figura pelo segundo pico mais largo. O sinal do detector seria não nulo em toda extensão do círculo de um raio até aproximadamente 6 vezes a largura da fenda, a partir de seu centro. Retornando ao caso das ondas sonoras, a pessoa junto à parede a 2 m da porta (representada pelo ponto 2 na figura) ouviria sem muitas dificuldades o som proveniente da

sala. Para $\lambda \geq a$ não ocorre a inversão de fase nas ondas difratadas, e os picos laterais não são mais observados.

Como último cenário, considere agora que as ondas tenham comprimento de onda $\lambda_3 = 5a$, logo, muito maior do que a largura da fenda. Neste caso, as ondas se espalham em todas as direções com muito mais facilidade após a fenda, ou seja, a interferência é construtiva em uma região muito maior do que nos casos anteriores. Em outras palavras, o pico central se alarga de modo a tomar toda a região após a fenda. Pela Figura 18, observa-se que a intensidade das ondas difratadas a uma distância de 8 vezes larguras da fenda sobre a parede do obstáculo tem intensidade que corresponde a cerca de 70% da intensidade na frente da fenda. Considerando novamente o caso das ondas sonoras, a pessoa junto à parede - a 2 m da porta (representada pelo ponto 3 na figura), ouviria muito melhor o som proveniente da sala.

Resumindo, a Figura 27 mostra como a energia da onda se distribui após a fenda. Para $\lambda \ll a$, toda energia que passa pela fenda se concentra à sua frente em um feixe da largura da própria fenda. No outro limite, para $\lambda \gg a$, a energia que passa pela fenda se espalha em uma grande região atrás dela. Deve-se deixar claro que a interferência apenas redistribui a energia no espaço. Se duas ondas possuem energia total E_T , quando separadas espacialmente, esta quantidade de energia permanecerá a mesma, independente da forma que o padrão de interferência possa vir a ter, quer exista ou não difração.

Figura 27 – Distribuição de intensidade para ondas difratadas.



Fonte: Próprio Autor.

4.4 Uso do Software Ripple Tank Simulation Como Mediador para o Ensino da Difração

Uma vez que o fenômeno da Difração foi discutido por meio de argumentos físicos e matemáticos, é importante que ele seja mostrado também na forma de imagens, seja via experimentos em laboratório ou virtuais, por meio de simulações computacionais. Tem sido amplamente mostrado na literatura esse tipo de intervenção, uma vez que estas facilitam a obtenção de conceitos que, via de regra, estão embutidos em equações matemáticas abstratas. Com esse propósito, agora será feito uso do programa de computador Ripple Tank Simulation (RTS), uma versão em WebGL escrito em Java Script, uma linguagem de programação que permite a execução do software diretamente da página da internet.

A escolha desse programa se deu em função da sua simplicidade operacional, por estar disponível on-line (<https://www.falstad.com/ripple/>) e ainda por ser gratuito. Existem outros programas de simulação disponíveis on-line, como exemplo o conhecido PhysicsEducation Technology – PhET, da Universidade do Colorado, EUA (https://phet.colorado.edu/pt_BR/), que possui simulações em quase todas as áreas da ciência. O programa RPS foi escolhido porque ele apresenta grande quantidade de simulações especificamente voltadas para o estudo da interferência e difração, evitando que o estudante divague por outras áreas que não são foco do estudo durante as atividades em sala de aula.

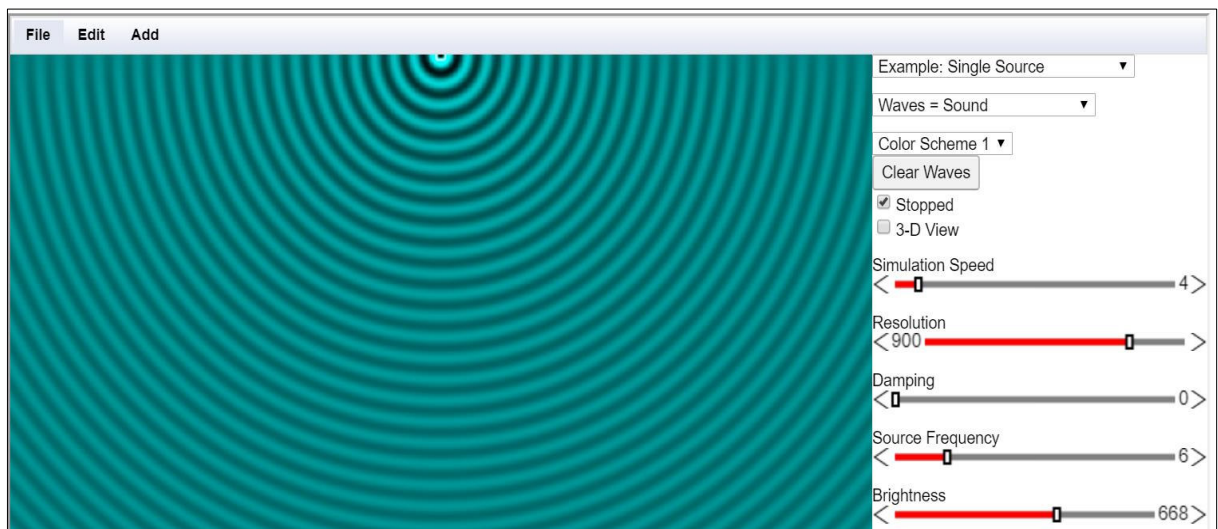
Um dos objetivos centrais dessa aplicação é fazer o professor focar sua atenção em representações mentais alternativas, que os estudantes possam conceber dos conteúdos estudados antes e após cada intervenção em sala de aula, com a finalidade de melhorar o grau de aprendizado dos conceitos. Em geral, os estudantes possuem muitos conhecimentos antes de se envolverem com discussões sobre novos conteúdos em sala de aula e também aprendem novos saberes durante essas discussões. Entretanto, por causa do senso comum ou por equívocos conceituais, nem sempre o que é aprendido corresponde ao que o professor realmente quis ensinar.

Isso ocorre, sobretudo, com a disciplina Física, na qual os conceitos são passados geralmente através de equações matemáticas abstratas, e os estudantes quase sempre não têm a oportunidade de visualizar esses conceitos por meio de experiências, sejam reais ou virtuais. O resultado deste modelo educacional é a falta de um aprendizado crítico, por meio do qual o estudante possa entender e transformar situações do seu cotidiano. Na realidade do modelo educacional brasileiro, os estudantes ficam expostos a uma quantidade enorme de informações, absorvida de forma parcial e distorcida, resultando em aprendizado notadamente mecânico e, portanto, desprovido de qualquer sentido de utilidade prática.

4.4.1 Instruções básicas sobre a operação do RTS

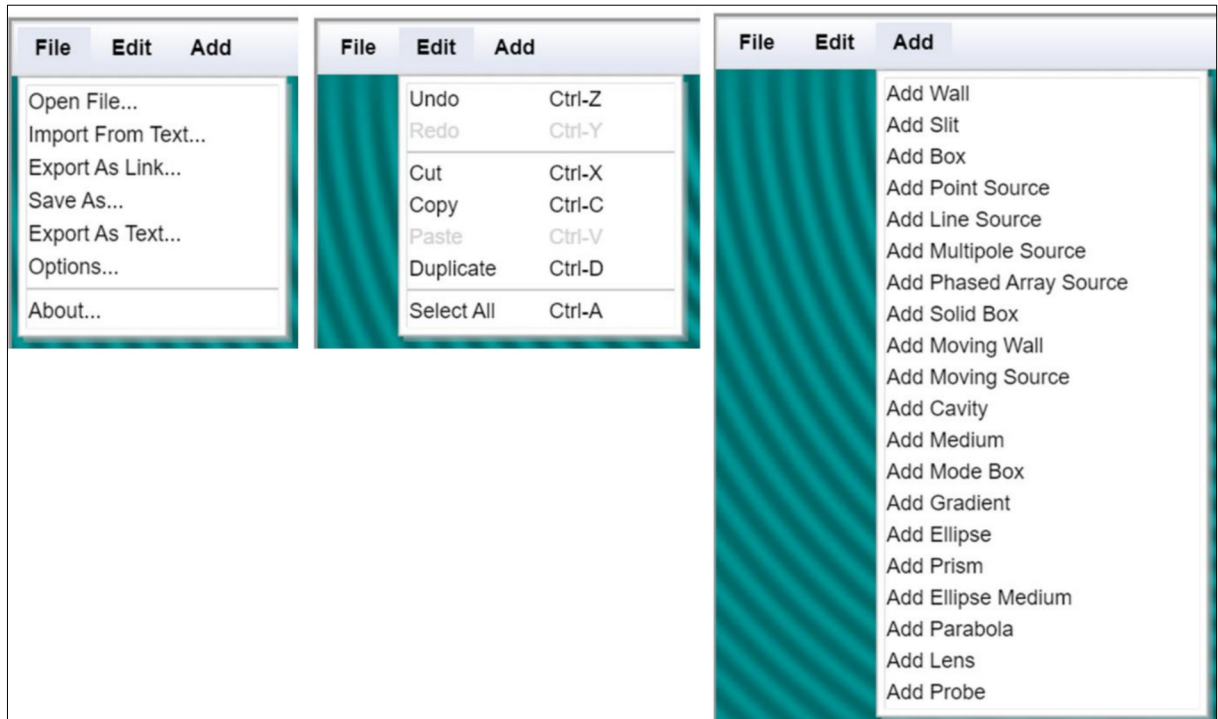
A Figura 28 mostra a tela inicial (ou de trabalho) do programa de simulação RTS, na qual uma fonte pontual emite uma onda para dentro da região retangular de trabalho. Esta tela inicial é simples e de fácil identificação das instruções. Na aba superior existem apenas três funções: Arquivo (File), Editar (Edit) e Adicionar (Add). A Figura 29 mostra as opções dentro de cada uma destas funções. Na função Arquivo tem-se a opção de salvar as simulações e abrir os arquivos salvos. O programa não permite salvar as simulações no formato de imagens ou filmes, mas pode-se salvar um arquivo no formato de texto. Ao ser aberto, o RPS automaticamente reproduz a simulação salva. A função Editar serve para copiar, duplicar, colar e recortar figuras de objetos que pode ser colocados na área de interação das ondas, bem como incluir fontes de ondas nesta região da tela. Estes objetos são incluídos a partir da função Adicionar, dentro da qual existem 20 (vinte) subfunções diferentes, cada uma explorando um aspecto da física das ondas no que diz respeito à interferência e difração. O conteúdo da função Adicionar também pode ser acessada clicando o botão direito do mouse em qualquer local do retângulo de trabalho.

Figura 28 – Tela de trabalho do programa Ripple Tank Simulation.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 29 – Conteúdo das funções Arquivo, Editar e Adicionar.



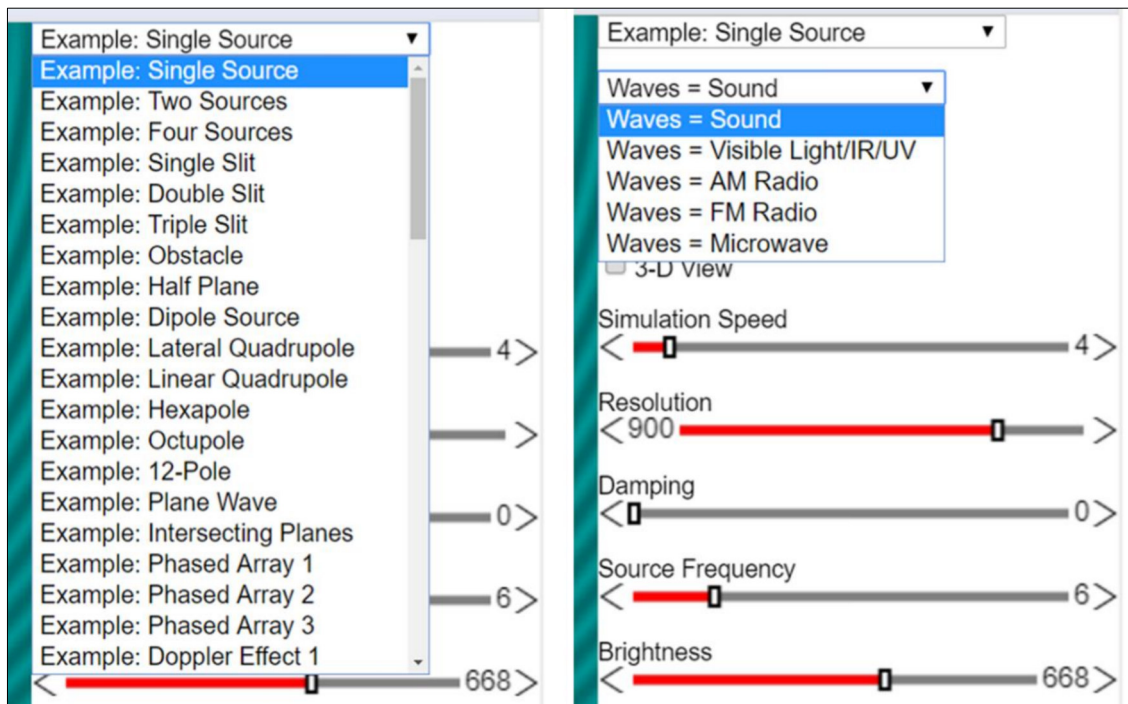
Fonte: Próprio Autor.

O lado direito da tela de trabalho do RTS (Figura 28) apresenta opções para escolher o tipo de fonte das ondas (aproximadamente 70 cenários diferentes), opção entre ondas mecânicas ou eletromagnéticas, opção de apresentação da simulação em duas ou três dimensões. Além disso, permite o controle de alguns parâmetros da simulação, como a velocidade da simulação, a resolução da imagem, frequência e a intensidade (brilho) das ondas, e alguns padrões de cores das imagens. Também fornece a opção de parar a simulação para uma análise mais detalhada dos padrões de interferência obtidos. Lembrando que cada ponto da imagem é obtido a partir de um cálculo computacional, a escolha de uma resolução muito elevada implica em uma grande quantidade de cálculos, o que pode comprometer a velocidade da simulação, dependendo da capacidade de processamento da máquina em uso e da qualidade da rede de internet.

Para fins de ilustração, a Figura 30 (lado esquerdo) mostra algumas fontes de ondas disponíveis, bem como obstáculos que podem ser incluídos. Como exemplo, pode-se ter apenas uma fonte pontual (usada na Figura 28) ou várias, que podem ser colocadas em qualquer ponto da tela. Para adicionar uma fonte pontual (ou qualquer outra disponível) basta usar a função Adicionar na aba superior. Também pode-se usar o mouse para incluir os mesmos objetos, bastando clicar com o botão direito em qualquer ponto da tela de trabalho, e um menu com as

mesmas opções estará disponível. Uma vez inserido, qualquer objeto pode ser deslocado sobre a tela de trabalho, bastando clicar com o botão esquerdo do mouse, arrastar e soltar no local desejado. Nesta tela também tem as funções Editar (oferece várias opções de controle sobre a fonte da onda), bem como as opções Deletar e Duplicar as fontes inseridas. Outras instruções sobre o programa RTS serão dadas diretamente aos estudantes durante as aulas presenciais.

Figura 30 – Tipos de fontes de ondas e seus ajustes.



Fonte: Próprio Autor.

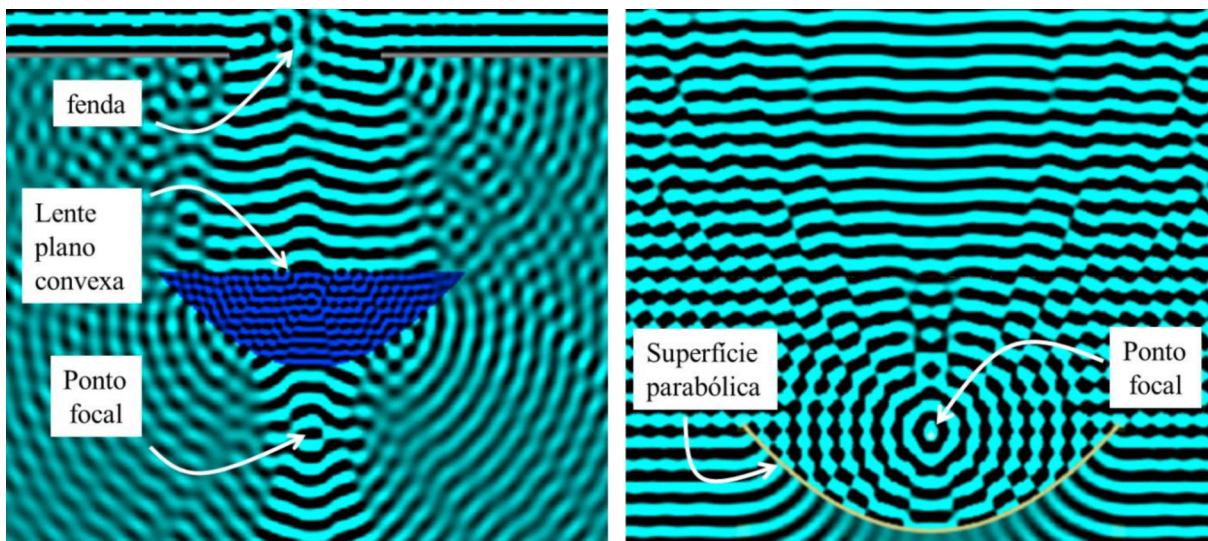
4.4.2 Aplicações do RTS

A Figura 31 ilustra como o RTS pode ser utilizado para mostrar como as ondas interagem com diferentes objetos. Na parte superior à esquerda da figura foi introduzida uma fenda com abertura muito maior do que o comprimento de onda, para evitar a Difração das ondas planas incidentes sobre ela, conforme previsto pela Equação (43). Na verdade, é impossível não ter Difração quando uma onda encontra um obstáculo, independente da relação entre comprimento de onda e dimensão do obstáculo. O que acontece de fato, conforme ilustrado nesta figura, é que a intensidade da onda não difratada é muito maior do que a intensidade da onda difratada. Após a fenda, foi adicionada uma lente plano convexa. Após atravessar a fenda, as frentes de onda se dirigem para a região central à frente da lente, em

resposta ao fenômeno da refração. Esta simulação serve para mostrar ao estudante a existência de pontos focais de lentes e espelhos curvos.

A Figura 30 (à direita) também está ilustrado como a presença de um objeto parabólico afeta o padrão de frentes de onda planas que se movem de cima para baixo. O padrão de ondas planas acima da parábola está distorcido por causa da interferência das ondas que descem e as que são refletidas pelo objeto parabólico. Na parte inferior da parábola tem-se claramente o efeito de difração das ondas, enquanto acima dela tem-se as frentes de onda sendo dirigidas para um ponto do espaço, o foco da parábola. Esta simulação serve para explicar vários dispositivos durante as aulas de ondulatória, sendo o foco da parábola um conceito importante a ser explorado. Seja para explicar um espelho para luz visível, seja uma antena parabólica para sinais de TV ou mesmo uma concha acústica para grandes concertos musicais, essa simulação padrão apresenta grande potencial dentro da sala de aula. E existem dezenas de outras aplicações interessantes como estas disponíveis no RTS.

Figura 31 – Ilustração para pontos focais de uma lente e de uma superfície parabólica.



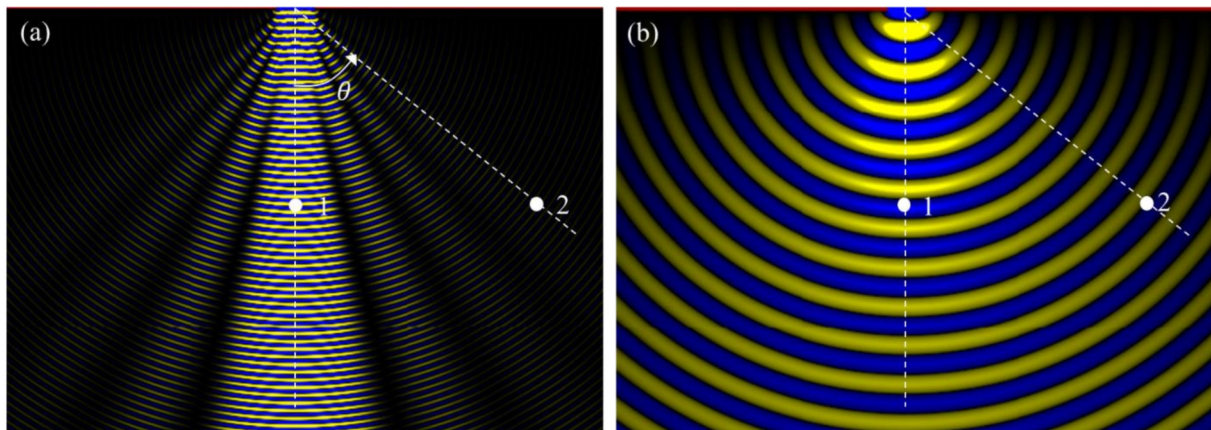
Fonte: Próprio Autor.

Para concluir, a Figura 31 ilustra como as discussões feitas na seção 4.3.3, sobre a intensidade das ondas difratadas, pode ser visualizada com o auxílio do programa RTS. A intensidade da difração já foi mostrada algebricamente por meio da Equação (43) e graficamente por meio da Figura 27. Cada um desses métodos possui informações próprias, e o estudante deve combiná-las para ter um entendimento completo do fenômeno. Contudo, por mais que as explicações sejam didáticas e as palavras bem articuladas, o entendimento desses

conceitos exige certa capacidade de abstração que a maioria dos estudantes de Ensino Médio ainda não possui.

Provavelmente, a maneira mais apropriada de discutir tais conteúdos com um grupo de estudantes fosse através de filmes didáticos, cujas imagens pudessem ser repetidas de várias maneiras diferentes, com velocidades diversas, com tipos de ondas e fendas diferentes. Todas essas informações estão contidas na Equação (43), mas de forma escondida e abstrata, o que torna o entendimento difícil. O objetivo do uso do RTS na próxima simulação é mostrar método alternativo aos dois já mostrados para discutir a forma como a intensidade das ondas se distribui após uma fenda.

Figura 32 – Ilustração para a difração usando o princípio de Huygens-Fresnel para uma fenda com 500 nm. (a) comprimento de onda de 100 nm. (b) comprimento de onda de 1000 nm.



Fonte: Próprio Autor.

Nas duas simulações da Figura 32 tem-se uma onda plana atingindo uma fenda com abertura de 500 nm, sendo o comprimento de onda igual a 50 nm (Figura 32a) e 500 nm (Figura 32b). Isto foi feito assim para comparar com os resultados mostrados na Figura 30 para $\lambda_1 = 0,1a$ e $\lambda_2 = a$. Conforme evidenciado nas discussões da Figura 18, para $\lambda < a$ a fase das ondas difratadas se inverte e as amplitudes se tornam negativas. Isso pode ser observado claramente na Figura 32a, na qual a faixa de intensidade central é ladeada por faixas laterais menos intensas, entre as quais a amplitude é zero.

Conforme foi discutido no contexto da Equação (43), quando a onda encontra uma fenda (ou objeto) cujas dimensões sejam maiores do que seu comprimento de onda, os efeitos da difração são pequenos. Caso contrário, o efeito da difração é determinante. Embora não seja tão direto, isso pode ser observado diretamente da Equação (43), que será reproduzida aqui:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a (\text{sen}\theta)/\lambda]}{\pi a (\text{sen}\theta)/\lambda} \right]^2 \quad (43)$$

Considere primeiro o que acontece na região à frente da fenda (θ é pequeno). Para pequenos valores de θ , a função $\text{sen}\theta \approx \theta$. O símbolo $\approx$ significa ‘aproximadamente igual a’. Neste caso, a Equação (43) se torna:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\text{sen} \left[\frac{\pi a \theta}{\lambda} \right]}{\frac{\pi a \theta}{\lambda}} \right]^2 \approx I_0 \left[\frac{\frac{\pi a \theta}{\lambda}}{\frac{\pi a \theta}{\lambda}} \right]^2 \approx I_0 \quad (44)$$

Este resultado mostra que independente das características da fenda e da onda, na região do espaço à frente da fenda (pontos 1 nas Figuras 32 a,b) a interferência sempre será construtiva e terá seu máximo valor. Considere agora o que acontece na região lateral à fenda, atrás do obstáculo. Para $\theta \approx \pi/2$, a função $\text{sen}(\theta) \approx 1$. Neste caso, a Equação (43) se torna:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a/\lambda]}{\pi a/\lambda} \right]^2 \quad (45)$$

Considere agora que uma relação entre o comprimento de onda e a largura da fenda seja dada por $\lambda = Na$, onde N é um número que diz quantas vezes λ é menor ($N < 1$) ou maior ($N > 1$) do que a . Substituindo na Equação (45), tem-se:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a/Na]}{\pi a/Na} \right]^2 \approx I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi/N]}{\pi/N} \right]^2 \quad (46)$$

Agora considere $N \ll 1$. O numerador desta fração $\text{sen}[\pi/N]$ varia entre 0 e 1, dependendo do valor de N , mas nunca é superior a 1. Já o denominador π/N se torna um número muito grande. Portanto, a divisão de um número inferior 1 por outro muito maior do que 1 resulta em um valor muito pequeno, e $I(\theta) \rightarrow 0$. Isto está mostrado com o ponto 2 na Figura 23a. O símbolo $\rightarrow$ significa ‘se aproxima de’ ou ‘tende a’. Isto está de acordo com o pico estreito da Figura 27 para $\lambda_1 = 0,1a$. Finalmente, considere o caso $N \gg 1$. O termo π/N é muito pequeno e $\text{sen}(\pi/N) \approx \pi/N$. Logo, a Equação (46) se reduz a:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\pi/N}{\pi/N} \right]^2 \approx I_0 \quad (47)$$

Esse resultado está de acordo com as discussões para $\lambda_3 = 5a$ na Figura 27, e está ilustrado com o ponto 2 na Figura 31b. Para valores intermediários de θ , a intensidade das ondas difratadas $I(\theta)$ varia entre 0 e I_0 , dependendo do valor de N .

Do ponto de vista de um estudante do Ensino Médio, que tem pouca capacidade de abstração, um cenário de aprendizagem é aquele encontrado nas equações abstratas e na fala igualmente abstrata do professor, quando estas estão desconectadas da observação real ou virtual de um fenômeno. Um outro cenário diferente é aquele em que, associado aos conceitos explicados pelo professor, o estudante tem diante de si a oportunidade de manipular, visualizar, e ele mesmo ter o controle dos parâmetros da simulação, como se estivesse em um ambiente real de laboratório, somando-se às explicações do professor. Certamente esse hipotético segundo cenário é mais consistente com um, no qual, se espera uma aprendizagem muito mais significativa dos conceitos ensinados.

5 SEQUÊNCIA DIDÁTICA CONSTRUTIVISTA

Professor: Aldo Alberto Câmara Marques
Componente curricular: Física
Número de Sequências didáticas: 01 Número de encontros: 08 Período de aplicação: novembro e dezembro de 2020
Tema gerador: Ondas
Subtema: Difração
O que o aluno pode aprender com estas intervenções? (metas) Consultar, analisar e interpretar textos e comunicações de ciência e tecnologia veiculadas por diferentes meios. Elaborar comunicações orais ou escritas para relatar, analisar e sistematizar eventos, fenômenos, experimentos, questões, entrevistas, visitas e correspondências. Analisar, argumentar e posicionar-se criticamente em relação a temas de ciência e tecnologia. Identificar, em dada situação-problema, as informações ou variáveis relevantes e possíveis estratégias para entendê-las. Identificar a classificação das ondas. Diferenciar os processos físicos relacionados com as ondas. Aplicar os conteúdos de ondas ao cotidiano.
Conhecimentos prévios trabalhados pelo professor (identificação de subsunçores dos estudantes) Levantar conceitos e definições sobre ondas. Instigar hipóteses, questionamentos e críticas sobre a história, definição e aplicação das ondas. Explicação de possíveis indagações provenientes das discussões durante as aulas. Explicação de possíveis dúvidas sobre as equações matemáticas e exercícios sobre os fenômenos ondulatórios e da difração. Entender o significado da difração.
Estratégias e recursos da aula: Data show Livro didático Pesquisa na internet

Quadro branco Pincéis e apagador Softwares
Recursos complementares: Demonstração de simulações sobre experimentos envolvendo ondas.
Sobre a execução da sequência didática: 1º momento (04 aulas): Esta é a etapa da construção do conhecimento do estudante. O professor vai ministrar aulas sobre o conteúdo de ondas. Nesta etapa da aplicação do produto educacional será ministrado o conteúdo sobre ondulatória. Nesta fase será trabalhado o conteúdo com qual os alunos precisam saber para poder assimilar o assunto sobre difração. Esta fase será trabalhada de forma teórica, por meio de aula expositiva e dialogada da forma tradicional, para auxiliar na aprendizagem do conteúdo. A avaliação será por meio de uma lista de questões sobre o assunto de ondas, a qual tem o intuito de verificar a aprendizagem dos alunos, para que estes assimilem esses conceitos iniciais. Nessa avaliação terão apenas questões fundamentais sobre o conteúdo de ondas, pois eles serão muito úteis no momento da utilização do simulador. 2º momento (02 aulas): Aqui será apresentado o programa de simulação e os conteúdos deverão ser melhor consolidados. A forma de avaliação será realizada da seguinte maneira: será pedido aos alunos que façam algumas simulações com ondas no programa, cada aluno vai reproduzir algum tipo de fenômeno ondulatório utilizando o software educacional. 3º momento (01 aulas): Aplicação de questionários de verificação de aprendizagem. 4º momento (01 aula): Aplicação do questionário de satisfação para verificar o nível de satisfação de cada aluno, para saber se o objetivo da aprendizagem foi alcançado. Objetivos: Entender conceito de onda. Compreender a classificação das ondas (mecânica e eletromagnética, transversal e longitudinal).

Compreender a propagação das ondas.

Compreender os fenômenos da refração, difração e interferência das ondas.

Realizar simulações com softwares livres para consolidar o conhecimento sobre o assunto investigado.

Identificar em quais situações a difração ocorre com mais intensidade.

Conteúdos

Ondas e suas propriedades.

Noções gerais de ondulatória.

Noções gerais de onda mecânica longitudinal e transversal.

Noções gerais de onda sonora.

Noções gerais de onda eletromagnética.

Noções gerais sobre refração, difração e interferência.

Metodologia de aplicação da sequência didática:

Antes de iniciar a aula, orientar os(as) alunos(as) sobre a importância da participação coletiva durante as atividades propostas, explicando que isso conduz a uma maior integração e a um diálogo mais amplo sobre os temas abordados.

Iniciar perguntando aos alunos: “O que é difração?” Partindo da pressuposição que eles não sabem a resposta, será sugerido que eles respondam o que acham que pode ser e em qual parte da Física se estuda este assunto. Para melhorar a interação dos estudantes sobre o assunto, o professor pode usar um exemplar de CD ou DVD, iluminá-lo com a lanterna do celular e mostrar a decomposição de cores para eles. Ao verem as cores do arco-íris, os estudantes se sentirão estimulados a darem explicações. Em seguida será feita uma explanação sobre o que são ondas, suas características, equações e algumas aplicações.

Após esta etapa, voltarão a ser questionados: “O que vem a ser difração? Qual é a ideia que devemos ter sobre esse assunto? Como podemos saber que é a difração?” Sempre partindo do empirismo dos discentes quanto ao assunto e aos questionamentos levantados.

Em seguida, a partir da prévia discussão, serão demonstrados os princípios básicos, as ideias centrais e como surgiu o conceito de difração e como identificá-la no cotidiano. Demonstrando as aplicações de difração e suas especificidades, explicando:

O estudo da difração, desde a primeira vez que vem sendo analisando, foi com o objetivo de desvendar a natureza ondulatória da luz. A luz desperta muitas curiosidades e mistérios na comunidade científica e sempre levantou muitos questionamentos acerca da sua natureza.

6 PROPOSTA PARA DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Metodologia de aplicação deste Produto Educacional

Após a aplicação da Sequência Didática, será apresentada um cronograma de atividades a serem desenvolvidas e a forma como estas serão implementadas durante a aplicação do Produto Educacional. Para verificar o nível de conhecimento dos conteúdos, será proposta uma avaliação diagnóstica sobre o conteúdo estudado. Essa avaliação é para verificação dos conhecimentos prévios do estudante, e tem por finalidade verificar o seu nível de entendimento sobre o assunto de ondas. Desta forma, durante a aplicação do Produto Educacional, pode-se trabalhar com uma abordagem coerente ao nível de conhecimento de cada aluno.

A ferramenta utilizada como o produto educacional é o software RIPPLE TANK SIMULATION. Trata-se de um software de fácil uso, que não precisa ser instalado. Com apenas uma conexão estável de internet o aluno pode executar simulações de ondas de qualquer natureza. As aplicações desse programa para reprodução de fenômenos ondulatórios são inúmeras e o aluno poderá executar e reproduzir diversos cenários ondulatórios. Como vimos no capítulo 4, temos uma descrição completa deste software e suas funcionalidades. O objetivo do uso desse programa na execução desse Produto Educacional é que ele possa ser um auxiliar na compreensão do tema da difração e também como ferramenta pedagógica para facilitar o ensino da difração. Desta forma, criando um ambiente onde o aluno se sinta mais participativo na criação deste processo, o aluno será mais ativo e terá oportunidade de criar e desenvolver.

A proposta é levar ao aluno uma forma de ensino diferenciada, na qual o educando vai poder colocar em prática o conteúdo desenvolvido durante as aulas, vai se desvincular da forma mais abstrata de ensino e ter mais autonomia para desenvolver o conteúdo aprendido durante as aulas. Poderá, assim, visualizar de forma mais concreta o acontecimento dos fenômenos ondulatórios, em especial o fenômeno das ondas se difratando e também conhecer quando esse fenômeno da Física acontece na natureza e a aplicação dela voltadas para a área tecnológica.

6.1 Descrição das etapas de aplicação do Produto Educacional

O presente trabalho foi condicionado a 16 alunos do 2º ano do Ensino Médio da Escola CEM São Cristóvão - anexo III/São Bernardo. No turno matutino, a faixa etária dos alunos é entre 15 e 17 anos. Esta escola pertence à rede estadual de Ensino do Maranhão SEDUC-MA, localizada no Bairro São Bernardo, na Cidade de São Luís-Maranhão.

Este trabalho tem como objetivo proporcionar ao aluno do Ensino Médio um melhor entendimento sobre assuntos pouco explorados, como o tema da difração. Esse assunto é de total relevância para compreensão do funcionamento de aparatos tecnológicos e também fenômenos naturais com bastante ocorrência no nosso dia a dia. A proposta deste produto educacional tem por fim se tornar um material complementar aos livros textos usados nas escolas para o ensino de Física, no tocante ao conteúdo ondas e com foco na difração.

As atividades da escola estão divididas em períodos bimestrais, já incluídas suas avaliações. As aulas de Física são distribuídas em dois períodos semanais, cada aula com duração de 50 minutos. Tendo em vista essa carga horária reduzida, serão utilizados os dias da semana para aplicação do Produto Educacional, juntamente com a aplicação de questionário de satisfação para cada aluno e, também, outro questionário com perguntas sobre o assunto tema da aplicação do projeto. Estes questionários funcionarão como instrumentos para se ter uma noção se os objetivos do ensino foram alcançados ou não. O desenvolvimento desse projeto se deu em 4 etapas, que foram divididas conforme descrito a seguir.

Devido à pandemia do novo Coronavírus, a partir do dia 17 de março de 2020 as aulas em toda a rede Estadual do Maranhão foram suspensas. Durante todo o ano de 2020 não ocorreram aulas na forma presencial e sim remota. Diante disso, a aplicação desde Produto Educacional teve que seguir normas de distanciamento social. As aulas foram ministradas por meio do programa de videochamadas, pelo aplicativo Google Meet. A maioria dos alunos não pôde acompanhar as aulas, por não terem acesso à internet de qualidade. Por causa disso, foi criado um grupo no programa WhatsApp para a turma, no qual foram disponibilizados vídeos com o conteúdo referente às aulas. Os alunos que não acompanharam as aulas em tempo real podiam assistir as aulas em outro momento. Para aplicação de atividades e do questionário de satisfação foi utilizado o programa Google Forms.

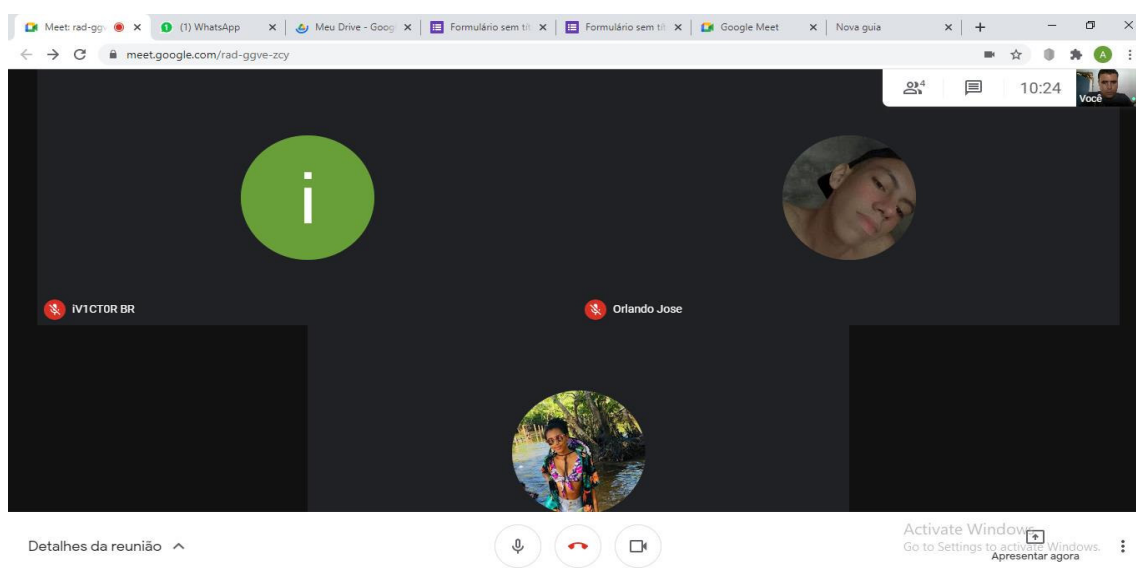
>>>> 1º etapa

Nessa etapa vamos trabalhar os conteúdos que são a base para o desenvolvimento da aplicação do Produto Educacional para que, na fase seguinte, cada aluno possa desenvolver seu aprendizado fazendo as simulações de ondas e difração utilizando o software em cada semana

na escola. Trabalhamos o conteúdo de forma expositiva, utilizando o programa Power Point para exposição das aulas. Tendo em vista que o assunto em discussão é a difração, teremos que trabalhar inicialmente como o conteúdo de ondas: conceitos fundamentais, natureza, propagação. Essa fase de aplicação teve duração de 3 semanas. Durante essa etapa foi verificado como cada aluno reagia ao ter contato com esse conteúdo, para poder saber se estava achando muito complexo, ou se o estava assimilando de maneira clara.

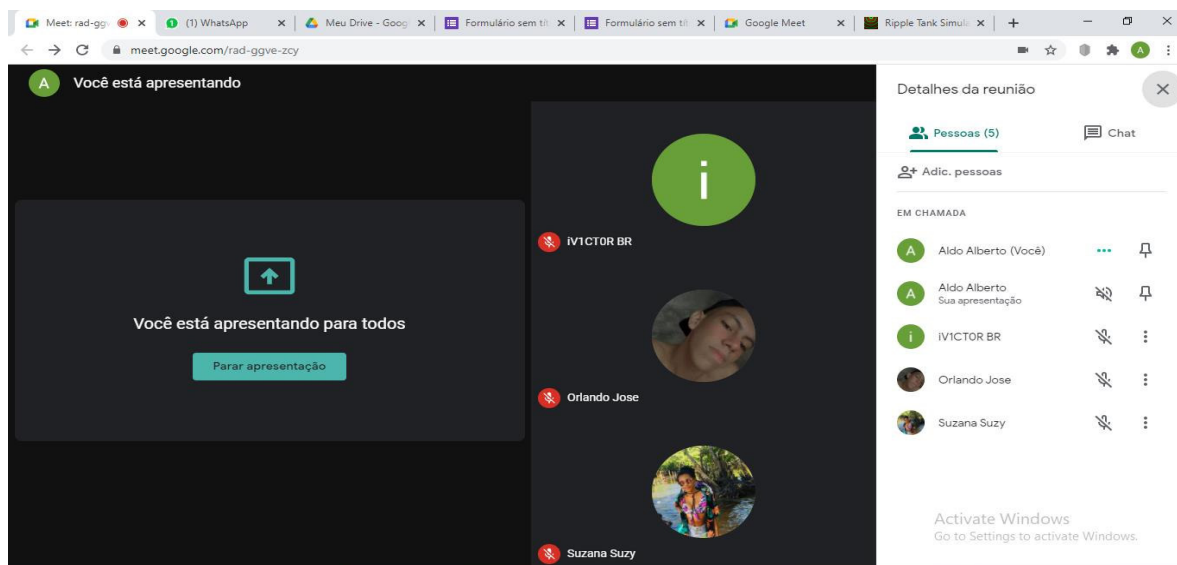
O primeiro momento foi desenvolvido entre os dias 03 de novembro de 2020 a 18 de dezembro de 2020. Logo no início desta fase de aplicação do produto educacional foi feita uma sondagem com os alunos acerca dos seus conhecimentos prévios (subsunçores), com os conteúdos que são a base para um bom entendimento do assunto da difração, que são os conhecimentos sobre ondas. Foram ministradas aulas sobre ondas, conceitos fundamentais, natureza, propagação e vibração, e também fenômenos ondulatórios (refração, reflexão e difração). Foram necessárias 4 aulas para aplicação desse conteúdo. Logo após, na aula 5, foi iniciado o assunto chave para desenvolvimento do Produto Educacional. Em seguida após ter sido trabalhado todo o conteúdo necessário para a compressão do tema difração, os alunos tiveram a oportunidade de ter contato com o programa computacional RIPPER TANK SIMULATION. Lembrando que toda essa fase de desenvolvimento desta Proposta Educacional foi feita de forma remota. Na Figura 33 temos o registro do momento no qual a aula foi desenvolvida, ministrada por meio do programa Google Meet.

Figura 33: 1º Momento da ministração da aula, pelo software Google Meet



Fonte dados da pesquisa 2020

Figura 34: 2º Momento da ministração da aula, utilizando software Google Meet

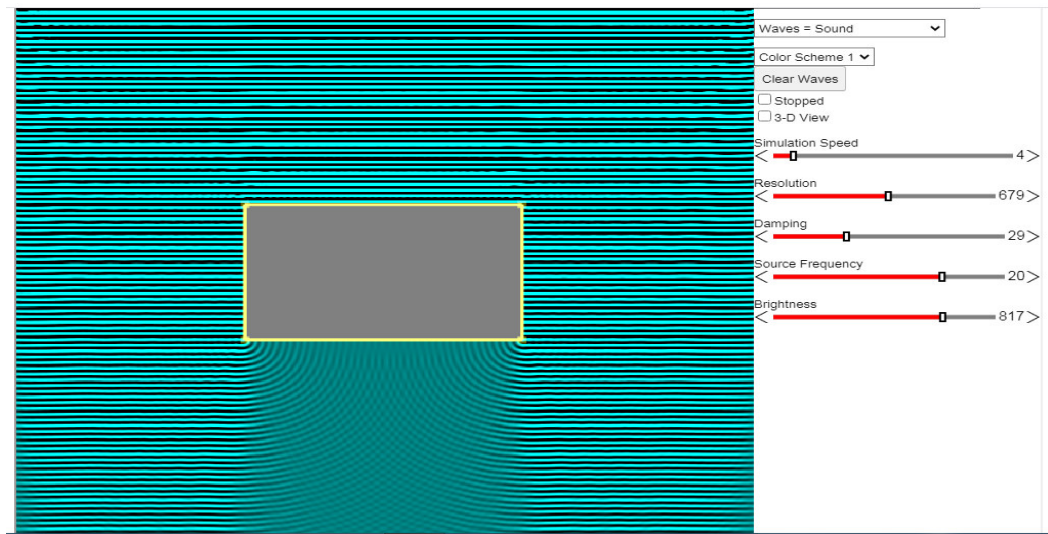


Fonte dados da pesquisa 2020

»»» 2º Etapa

A participação na aula foi baixa. Para contornar este problema foi disponibilizado o link do simulador, para que os demais alunos acessassem em outro momento. Após ter sido trabalhado todo o conteúdo necessário para a compreensão do fenômeno da difração, iremos agora para o uso do simulador. Nesta fase de aplicação do produto foram demonstradas simulações referentes à propagação de ondas, mais especificamente, à ocorrência da difração. Nesta aula foram feitas simulações com ondas, cuja finalidade era que cada aluno pudesse entender onde estão presentes os fenômenos ondulatórios e, dessa maneira, poder acompanhar de forma detalhada como e por que a difração ocorre, em quais casos ela ocorrerá de forma mais intensa e também quando será muito pouco perceptível. Foi demonstrado também o experimento da fenda dupla, muito importante para Física quântica, porque é por meio dele que é mostrada a dupla natureza onda-partícula. Os alunos ficaram ambientados ao simulador RIPPLE TANK SIMULATION, e com o auxílio desse software puderam acompanhar os fenômenos ondulatórios de uma forma mais concreta, e não abstrata, como se tivessem apenas visto nas aulas expositivas - e tiveram a oportunidade de manusear este software. Conseguiram, através desta aplicação educacional, reproduzir diversos acontecimentos ondulatórios e visualizaram a forma na qual ocorrem esses acontecimentos e suas causas.

Figura 35: Simulação realizada com o software RIPPLE TANK SIMULATION



Fonte: Dados da pesquisa 2020

»»»3º Etapa

Nesta fase, após os alunos terem visto todo o conteúdo de ondas, se familiarizarem com os fenômenos ondulatórios e observá-los de forma virtual utilizando o simulador, serão submetidos a 2 questionários para verificação da aprendizagem. Esses questionários contêm somente perguntas referentes aos assuntos debatidos durante a aplicação do Produto Educacional. Um questionário possui perguntas objetivas de múltipla escolha e outro contém perguntas subjetivas. Em ambos foi analisado o percentual de erros e acertos de cada aluno.

»» 4º Etapa

Submissão do questionário para avaliação do grau de satisfação referente ao desenvolvimento do Produto Educacional

Nesta fase final de aplicação do Produto Educacional os alunos foram submetidos a dar sua opinião em um Questionário de Satisfação. A intenção da aplicação foi verificar o nível de satisfação de cada aluno sobre a aplicação e metodologia desenvolvidas nesta pesquisa e também saber se os objetivos foram alcançados.

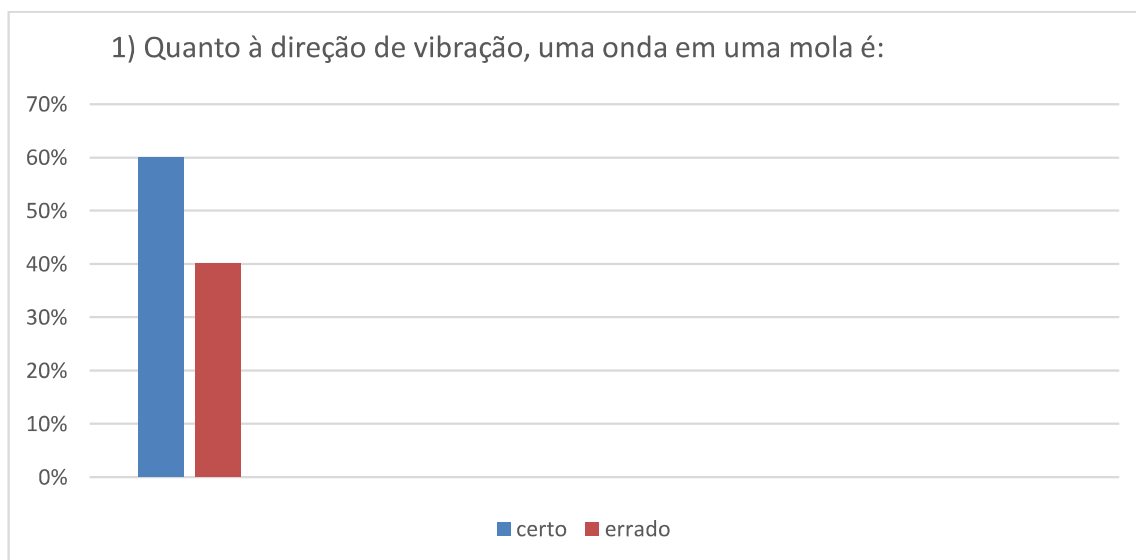
7 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta seção é destinada à apresentação dos resultados da aplicação do Produto Educacional. Foram analisados os resultados dos seguintes questionários: os percentuais de erros e acertos de 4 questões objetivas. Em seguida os alunos foram submetidos a responderem 5 questões na forma subjetiva e, por fim, o questionário de satisfação sobre a dinâmica utilizada para execução para desenvolvimento de aplicação do produto educação.

Devido à pandemia de Covid-19, as aulas só puderam acontecer de forma totalmente remota, em cumprimento as regras de distanciamento social. Desta forma, como muitos alunos não tinham acesso à internet, ou não dispõem de computadores ou tablet, a participação nesta modalidade de aula foi muito baixa. Os encontros foram feitos por meio do programa Google Meet a frequência era de 3 estudantes por aula. Para as respostas dos questionários foi utilizado o google forms, 9 alunos responderam cada um dos 3 questionários.

1) Quanto à direção de vibração, uma onda em uma mola é:

Gráfico 1- percentual de erros e acertos da questão 1



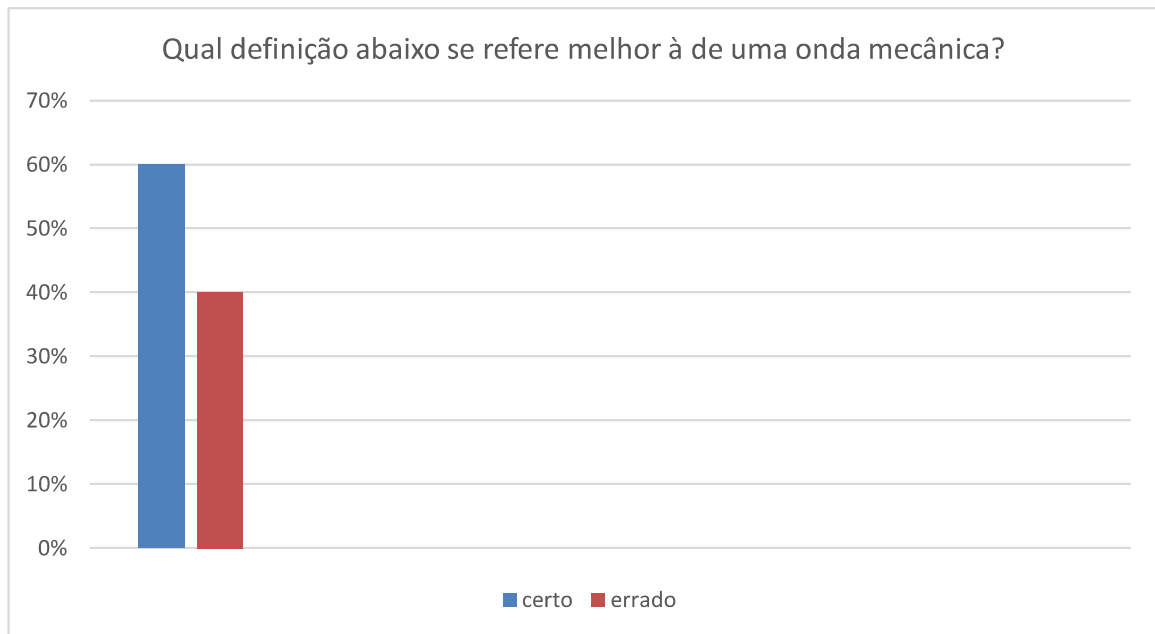
Fonte: Dados da pesquisa 2020

Na questão (1), 60% dos alunos acertaram e 40% erraram. Isso mostra que maioria conseguiu absorver os conceitos fundamentais sobre propagação de ondas. O resultado poderia ser melhor pois 40% ainda não tem embasamento sobre estes conceitos sobre ondulatória. Isso

se deve também pelo fato deste assunto se pouco explorado no Ensino Médio. Nos conteúdos programáticos dos professores se priorizam muitas vezes outros assuntos.

2) Qual a definição abaixo se refere melhor à de uma onda mecânica?

Gráfico 2 - percentual de erro e acertos da questão 2

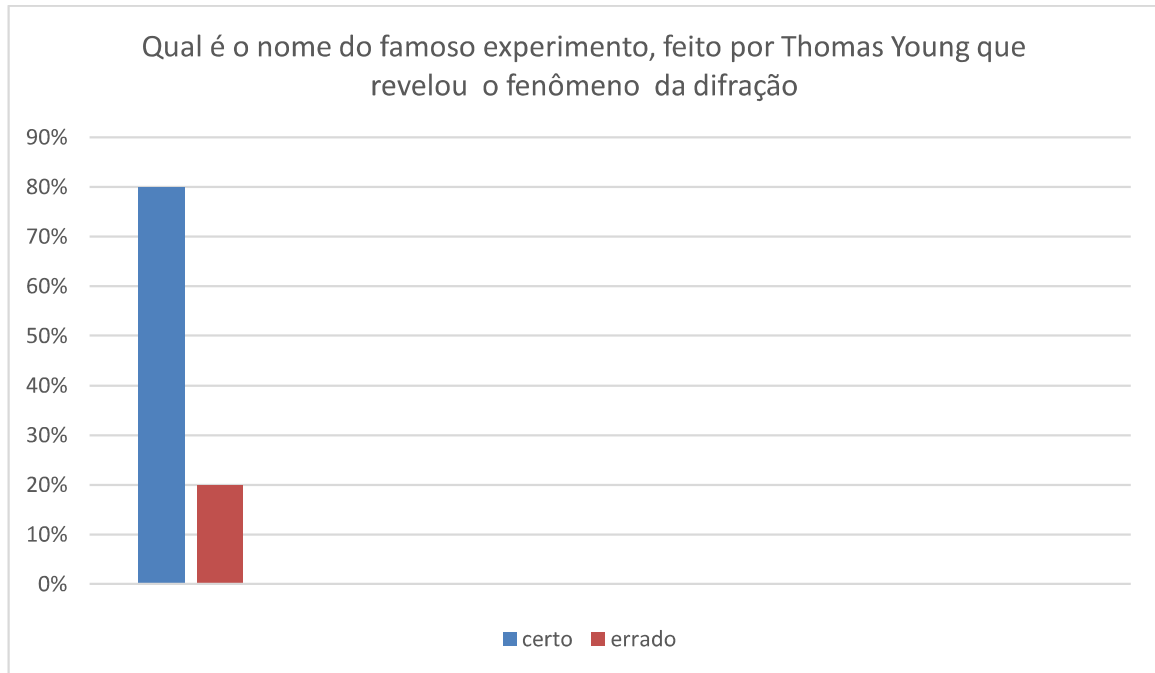


Fonte: Dados da pesquisa 2020

Na questão (2) o percentual de acertos foi 60% e de erros 40%. O problema é bem semelhante ao da questão 1, pois o tema da questão é o mesmo – conceitos fundamentais de ondulatória. Isso mostra que maioria conseguiu absorver os conceitos fundamentais sobre propagação de ondas. O resultado poderia ser melhor pois 40% ainda não tem embasamento sobre estes conceitos sobre ondulatória. Isso se deve também pelo fato deste assunto se pouco explorado no Ensino Médio. Nos conteúdos programáticos dos professores se prioriza muitas vezes outros assuntos, e dessa forma o aluno não consegue abstrair os assuntos mais básicos sobre ondas.

3) Qual é o nome do famoso experimento, feito por Thomas Young que revelou o fenômeno da difração

Gráfico 3 - percentual de erro e acertos da questão 3

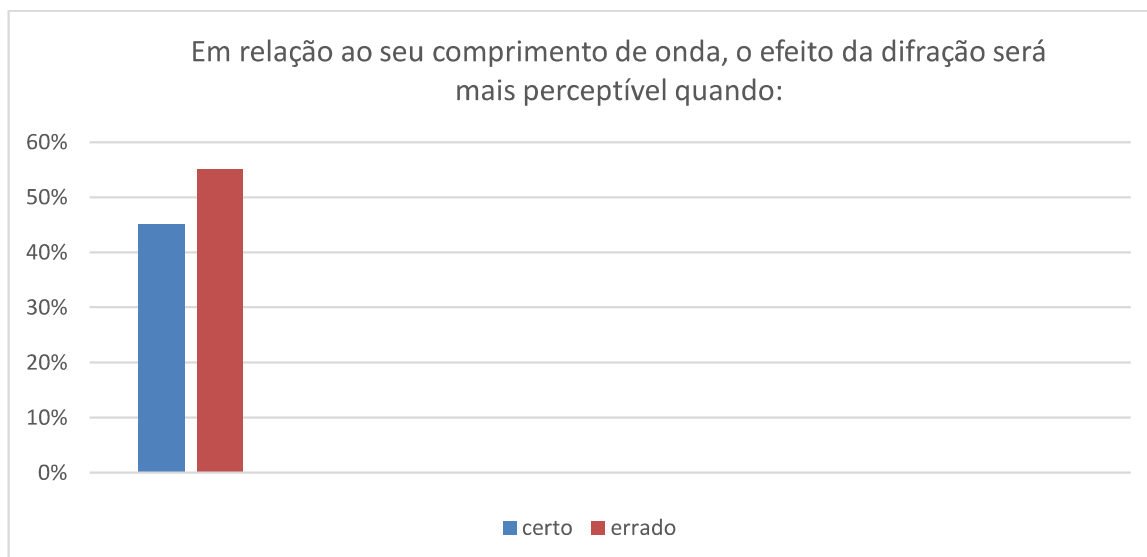


Fonte: Dados da pesquisa 2020

Na questão (3) tivemos um percentual de acertos de 80% e 20%. O percentual de acertos foi bem elevado, pois vemos que se trata de uma pergunta que engloba uma parte mais específica do assunto da difração, com viés de memorização apenas. Vendo este percentual de acertos bem elevado podemos perceber que os alunos começaram a assimilar bem este assunto da difração, tendo em vista que em muitos assuntos da Física os alunos já o encerram de forma muito abstrata e certos conceitos se tornam de difícil assimilação para a maioria. No caso desta aula, podemos observar uma melhora na assimilação destes conceitos, e os alunos conseguiram compreender melhor.

4) Em relação ao seu comprimento de onda, o efeito da difração será mais perceptível quando:

Gráfico 4 - percentual de erros e acertos da questão 4



Fonte: Dados da pesquisa 2020

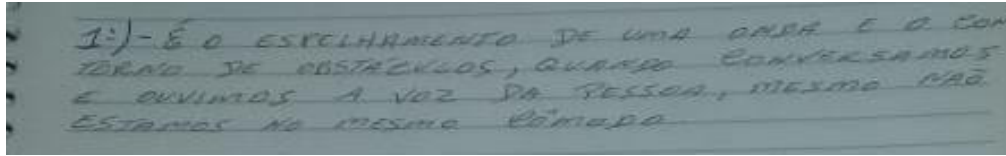
Na questão (4) o percentual de acertos foi de 45% enquanto o de erro foi 55%. Vemos que a maioria dos alunos deu resposta errada. Isto mostra que os estudantes não conseguiram aprender o conteúdo a ponto de responderem questões que exijam o mínimo de raciocínio, diferente do resultado da questão (3), cuja resposta exigia apenas a aprendizagem puramente mecânica. Em geral os estudante não conseguem interpretar as questões e nem dar respostas coerentes quando elas exigem um mínimo de dificuldade. Isso pode levar a várias discussões sobre as razões. Em parte, pode ser a falta de interesse do próprio aluno em aprender. A realidade sociocultural em que esses alunos se encontram torna o “ir à escola” e o “estudar para as avaliações” algo totalmente secundário em relação à busca pela alimentação e moradia minimamente dignas. Muitos são filhos de famílias desestruturadas, o que torna o cenário ainda crítico.

Nas figuras 36 e 37 temos as resoluções das perguntas subjetivas feitas por 2 alunos, cada resolução foi feita de maneira individual, vamos analisar as respostas que cada um deu para as perguntas que foram feitas para cada um deles

Na questão 1 (*Conceitue difração e dê exemplos de sua ocorrência no dia a dia*) foi pedido aos alunos que conceitue difração e mostrassem um exemplo. O aluno conseguiu

desenvolver a resposta da pergunta de forma correta. Por meio das aulas assimilou como a difração ocorre e suas causas.

Figura 36a: respostas das perguntas subjetivas feitas para o aluno.



Fonte: dados da pesquisa 2020

Na questão 2 (*Thomas Young fez a luz de uma fonte passar por duas fendas paralelas antes de atingir um obstáculo e observou no anteparo o surgimento de regiões claras e escuras. O que representam essas regiões?*) temos a resposta correta dada pelo aluno. Apesar de uma pergunta de memorização ou até um pouco intuitiva, ele encontra bastante dificuldade em responder, mas dessa vez por meio das aulas ministradas e a metodologia desenvolvida, conseguiu resolver sem dificuldades.

Figura 36b: respostas das perguntas subjetivas feitas para o aluno.



Fonte: dados da pesquisa 2020

Na questão 3 (*Numa difração em fenda única, após a onda passar pela fenda, qual é a característica que vai ser alterada?*) o aluno respondeu “frentes de onda”. Esta pergunta é importante, pois trata dos conceitos básicos sobre difração. A resposta está correta.

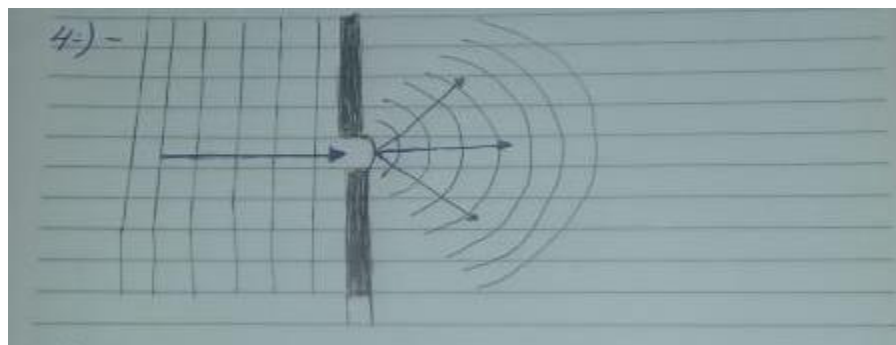
Figura 36c: respostas das perguntas subjetivas feitas para o aluno



Fonte: dados da pesquisa 2020

Na questão 4 (*Faça um desenho de uma figura de difração em uma fenda única, (a) quando o seu comprimento de onda é aproximadamente igual ao tamanho a largura da fenda*) o aluno conseguiu reproduzir o desenho de forma correta, fez as ondas planas batendo em uma barreira com uma fenda em seguida as frentes de ondas mudaram exatamente com ocorre na difração. Podemos constatar que os conceitos trabalhados foram assimilados adequadamente.

Figura 36d: respostas das perguntas subjetivas feitas para o aluno.



Fonte: dados da pesquisa 2020

Na questão 5 (*Quando um feixe de luz incide na superfície de um CD, observa-se a formação de cores na parte gravada, e reflete as cores correspondentes ao espectro da referida luz. Esse fenômeno ocorre por que o CD funciona como:*) o aluno respondeu “rede de difração”. Essa pergunta foi elaborada com a finalidade de mostrar ao aluno aplicações da difração no seu cotidiano.

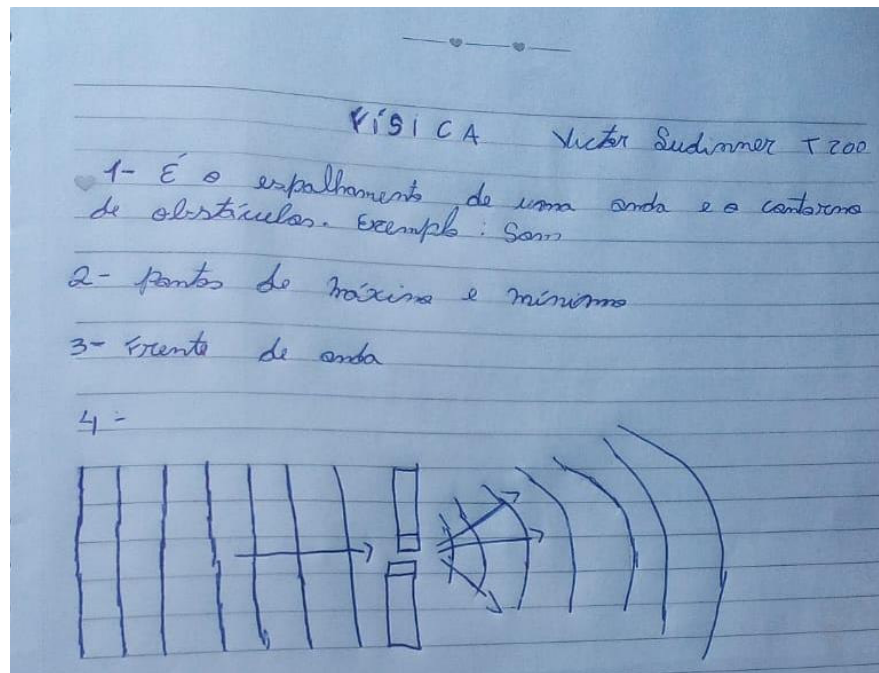
Figura 36e: respostas das perguntas subjetivas feitas para o aluno



Fonte: dados da pesquisa 2020

Na figura 37 temos as respostas do questionário subjetivo. As respostas dadas por este aluno são semelhantes às do aluno na seção anterior forneceu. Ele não a questão 5, talvez por falta de atenção. As respostas dadas por ele estão corretas, o que mostra que os alunos dessa turma conseguiram aprender os conceitos mais importantes sobre a difração.

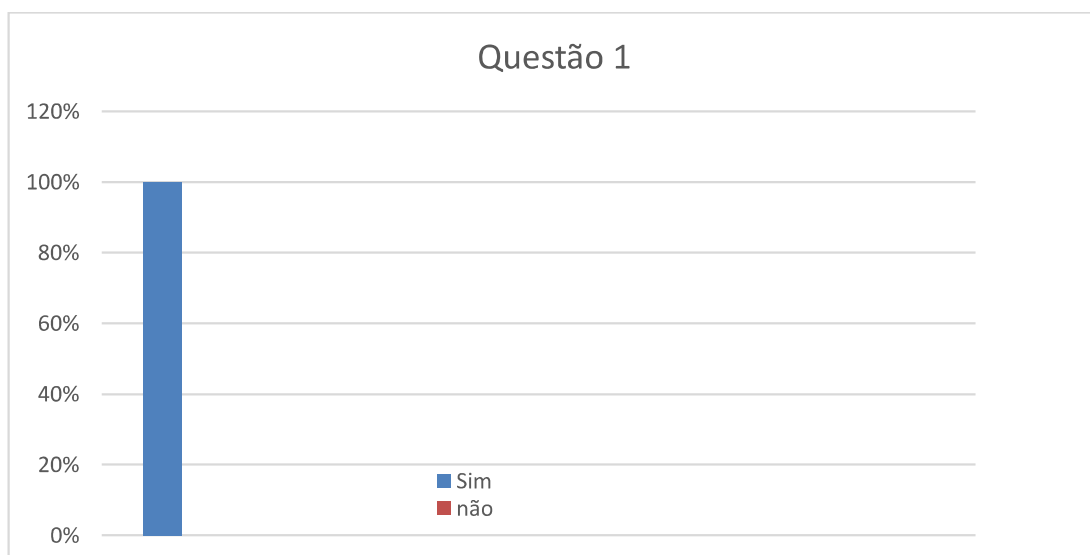
Figura 37: respostas das perguntas feitas para o aluno.



Fonte: dados da pesquisa 2020

1) As aulas ficaram melhores e mais interativas com o uso do simulador?

Gráfico 5: resposta da pergunta 1 do questionário de satisfação



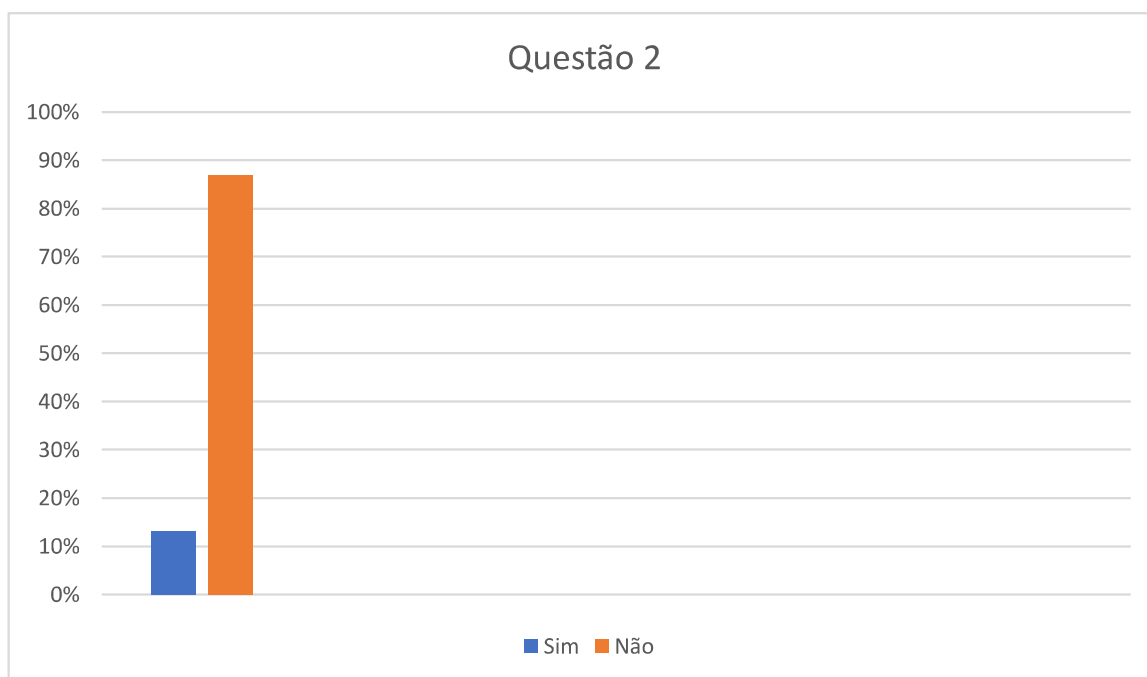
Fonte: Dados da pesquisa 2020

Quando perguntado para os alunos se as aulas ficaram melhores e mais interativas com o uso do simulador, 100% responderam que sim. Vemos que é importante o uso da tecnologia

no ambiente escolar. Com o uso de software o aluno se sente mais livre e com mais autonomia para colocar em prática o assunto abordado de forma teórica.

2) Você encontrou alguma dificuldade em utilizar o simulador?

Gráfico 6: resposta da pergunta 2 do questionário de satisfação

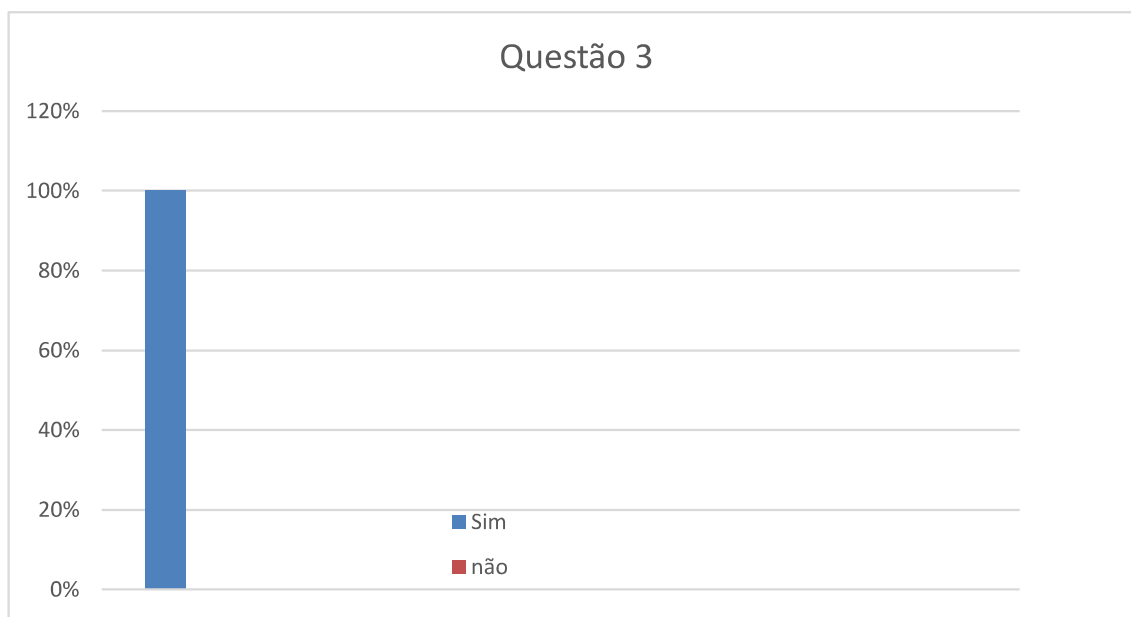


Fonte: Dados da pesquisa 2020

Na questão onde pergunta se o usuário encontrou alguma dificuldade para manusear o software, 87% não encontrou dificuldade, resultado esperado, haja vista o RIPPLER TANK SIMULATION é um programa bem simples de ser utilizado, muito autoexplicativo.

3) Você gostou do método de ensino utilizado para o aprendizado de ondas e difração?

Gráfico 7: resposta da pergunta 3 do questionário de satisfação



Fonte: Dados da pesquisa 2020

Quando perguntado sobre se o aluno gostou do método de ensino utilizado para o aprendizado de ondas e difração, a resposta foi totalmente favorável. Este resultado mostrou que a metodologia é motivadora e agradou a totalidade dos alunos que a utilizaram. Este resultado se deve pelo fato de que o aluno teve liberdade total para desenvolver o conhecimento obtido durante as aulas.

4) Você recomendaria a utilização desse software para o ensino de ondas e difração?

Gráfico 8: resposta da pergunta 4 do questionário de satisfação



Fonte: Dados da pesquisa 2020

Na questão 4, para 87% dos alunos recomendam a utilização desse software para o ensino de ondas e difração. Dessa forma, vemos que o programa RIPPLER TANK SIMULATION foi bem aceito pela maioria. Este resultado se deve ao fato de se tratar de um programa computacional de fácil uso, simples intuitivo, ajuda no entendimento e possui muitas variações das simulações bastando acessar o endereço <https://www.falstad.com/ripple/>.

5) Na sua opinião, as atividades desenvolvidas foram satisfatórias para uma compreensão do conteúdo?

Gráfico 9: resposta da pergunta 5 do questionário de satisfação

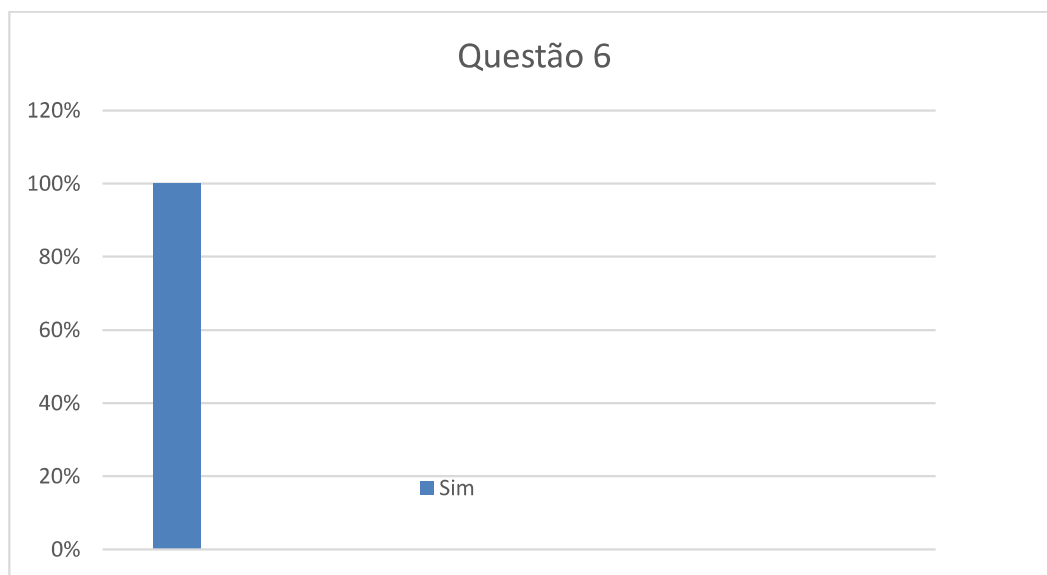


Fonte: Dados da pesquisa 2020

Todos os alunos concordaram que as atividades desenvolvidas foram satisfatórias para uma melhor compreensão do conteúdo. Isso mostra que a metodologia utilizada para aplicação deste produto educacional foi satisfatória.

6) Na sua opinião, as explicações do professor foram suficientes para o entendimento do conteúdo?

Gráfico 10: resposta da pergunta 6 do questionário de satisfação

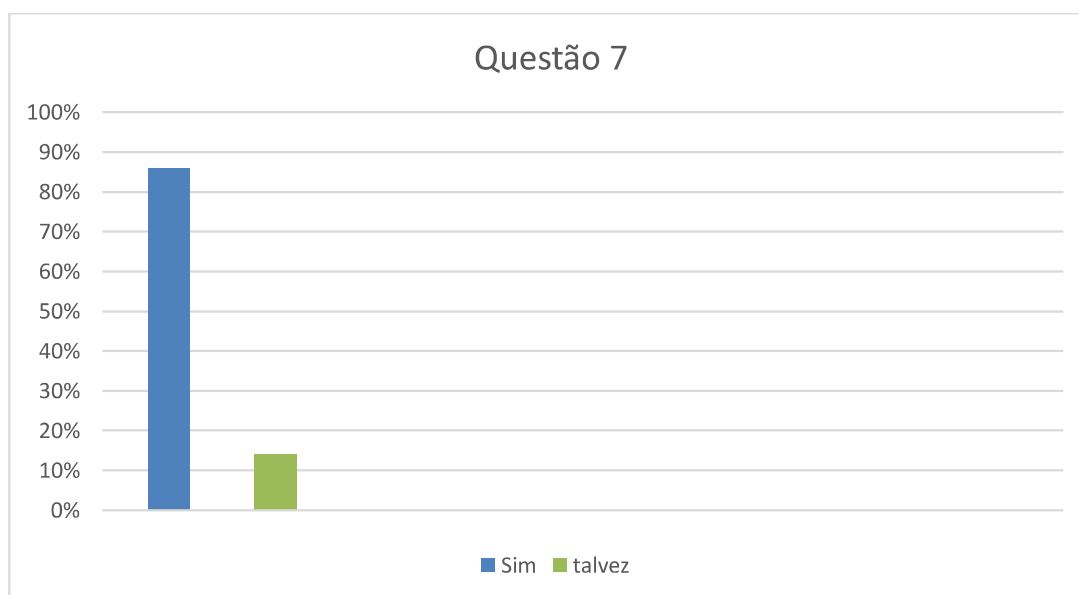


Fonte: Dados da pesquisa 2020

Todos os alunos concordaram que as explicações do professor foram suficientes para a compreensão do conteúdo. Isto mostra que o trabalho desenvolvido foi relevante e agradou o público que estava presente para o desenvolvimento deste trabalho.

7) As simulações feitas com o software têm relação com o conteúdo abordado em sala de aula?

Gráfico 11: resposta da pergunta 7 do questionário de satisfação

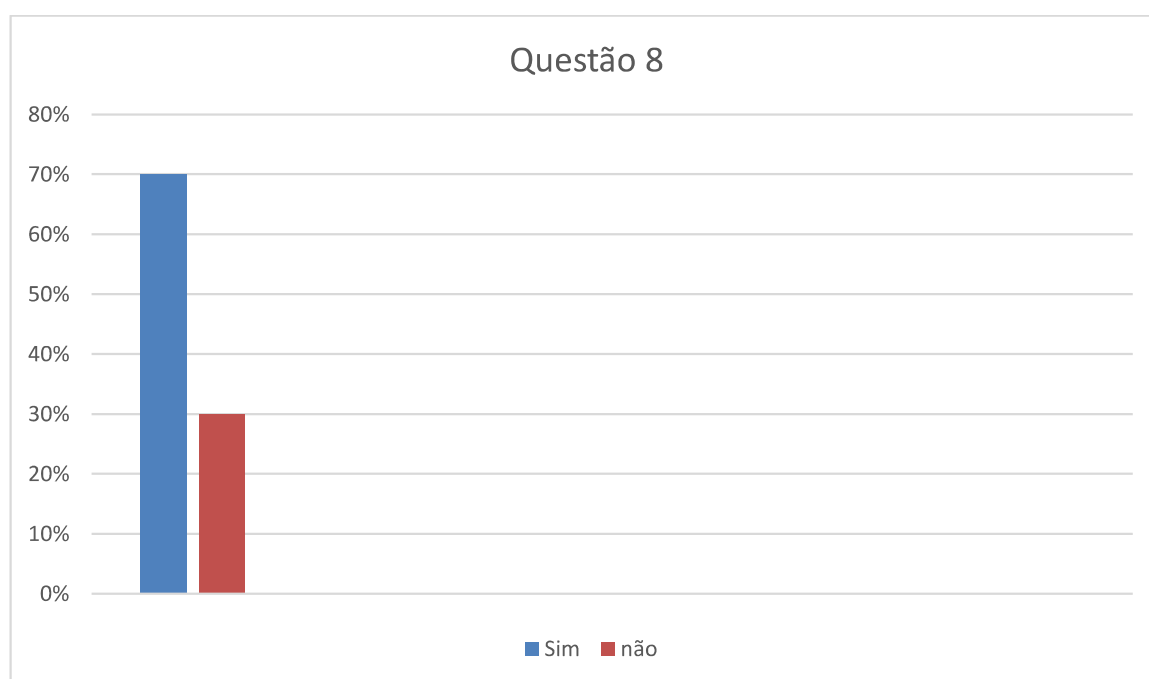


Fonte: dados da pesquisa 2020

O percentual obtido na questão onde se perguntou se as simulações feitas com o software tiveram relação com o conteúdo abordado em sala de aula foi de 87%. Vemos que os alunos estão conseguindo compreender o assunto e também abstraí-lo, estão visualizando os conceitos trabalhados em sala de aula de forma mais adequada.

8) Você acha que estudar por meio de programas ou softwares é uma metodologia eficiente e capaz de despertar o interesse pela física?

Gráfico 12: resposta da pergunta 8 do questionário de satisfação

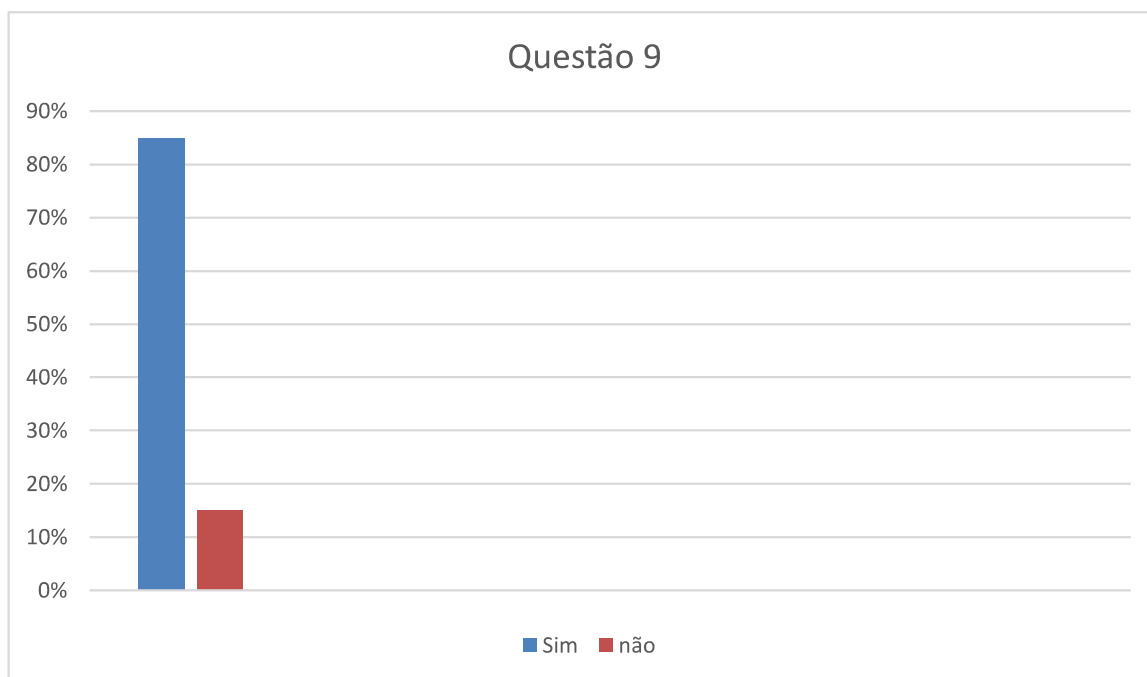


Fonte: Dados da pesquisa 2020

Para 70 % dos alunos estudar por meio de programas ou softwares é uma metodologia eficiente e capaz de despertar o interesse pela Física. Essa metodologia de ensino é comprovadamente mais eficaz e traz também muitos efeitos positivos durante o desenvolvimento do ensino, tanto na física quanto em outras áreas do conhecimento. O público do ensino é composto por adolescentes que têm mais facilidade em manusear aparatos tecnológicos e ficam fascinados quando estão na frente de um computador ou celular.

9) Na sua opinião, a Física se tornou mais fácil, interessante e menos abstrata depois do uso do simulador?

Gráfico 13: resposta da pergunta 9 do questionário de satisfação

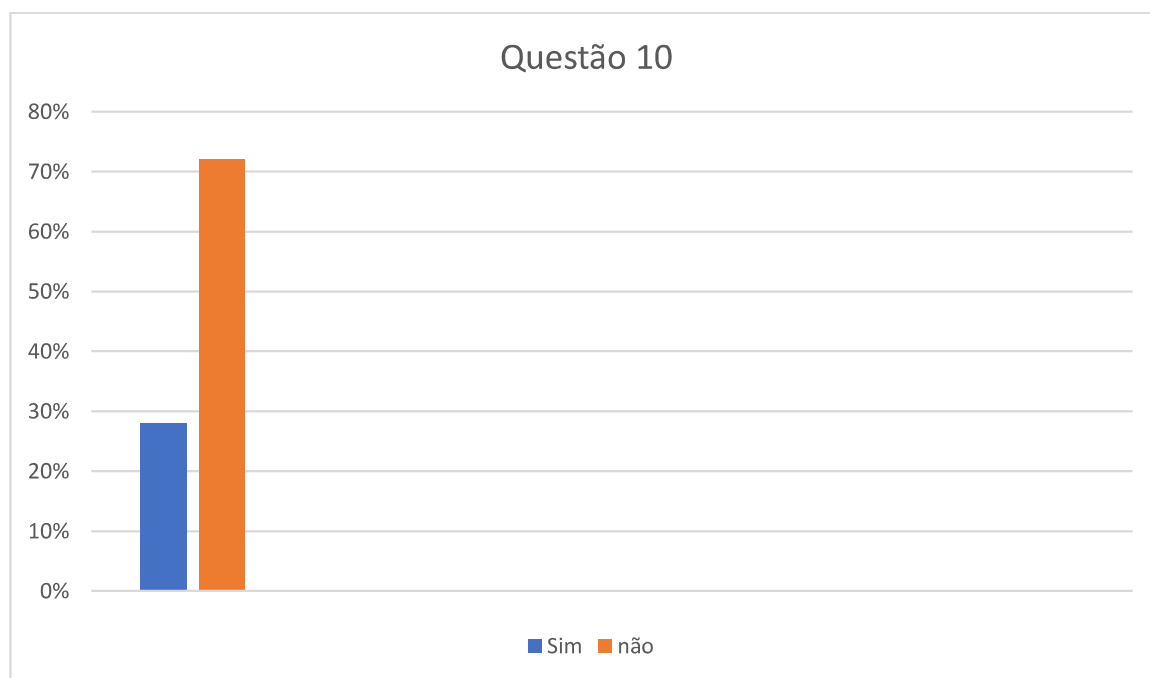


Fonte: dados da pesquisa 2020

Na opinião de 83% dos alunos, com a utilização de um simulador as aulas de Física se tornaram mais interessantes, fáceis e menos abstratas. A obtenção deste resultado é de suma importância. O que presenciamos em outras situações mais rotineiras é bem diferente, como já foi mostrado nas seções anteriores deste trabalho. Para a maioria dos alunos do Ensino Médio a Física não é uma matéria de fácil entendimento e também é muito abstrata e em muitas situações confundida com a Matemática.

10) Outro(s) professor(es) utilizavam algum software ou programa de computador para auxiliar nas aulas de Física?

Gráfico 14: resposta da pergunta 10 do questionário de satisfação



Fonte: Dados da pesquisa 2020

Na questão 10, o percentual maior de respostas foi negativo (72%), ou seja, os outros professores não utilizam programas de computador ou software educacional em sala de aula. Temos mais este quesito mostrando o quanto é importante o uso da tecnologia em sala de aula e também através desse resultado vemos como esta prática deve estar mais presente no dia a dia em sala de aula.

7.1 Análise dos Resultados

Na presente seção vamos fazer uma análise dos resultados dos questionários de verificação de aprendizagem do conteúdo, tanto o questionário com perguntas objetivas e também com o de perguntas subjetiva e por fim o questionário de satisfação para verificação dos objetivos a serem alcançados.

Na questão 1 do questionário de verificação de aprendizagem, tivemos um percentual de acertos de 60% e 40% de erros. Podemos observar que tivemos um percentual de acertos considerado bom, tendo em vista que os alunos muitas vezes apresentam dificuldades em assimilar determinados conteúdos de Física, em especial o assunto acerca das ondas, dentro do qual foi trabalhado o conteúdo de difração. Na questão 2 também obtivemos 60% de acertos e 40% de erros. Temos um percentual bom de acertos, considerando que estamos trabalhando com um assunto pouco explorado em sala de aula. O aluno de Ensino Médio tem uma base pouco consistente acerca de fenômenos. Este fato se deve pelo motivo destes assuntos serem trabalhados de forma muito vaga e superficial, assim muitos alunos concluem o Ensino Médio sem saber o essencial da Física.

Na questão 3 tivemos um percentual de acertos de 80% e 20% erros, com um percentual de acertos bem elevado. O outro fato que se deve chamar a atenção ao resultado obtido é que se trata de uma questão mais complexa, pois já envolve o assunto mais especificamente sobre difração, além de tratar do seu contexto histórico. Geralmente, quando se une a Física ao contexto histórico o aluno tem dificuldade de assimilação. Entretanto, não foi o que presenciamos aqui, já que a maioria dos alunos conseguiu responder de forma correta.

Na questão 4 foram obtidos 45% de acertos e 55% de erros. Embora o percentual de erros tenha sido maior, a discrepância entre estes percentuais não foi tão grande. Esta questão se refere ao tema da difração de forma mais específica. Uma possível justificativa é a complexidade da questão, pois ela tem uma abordagem bem analítica e mais aprofundada, requerendo um pouco mais de conhecimento sobre o assunto. Fazendo um balanço, podemos considerar que temos um resultado satisfatório. Vale ressaltar que todas as questões propostas aos alunos foram tópicos trabalhados durante a aplicação do Produto Educacional. Desta maneira, poderia se ter uma noção mais precisa se a aula estava sendo ou não sendo esclarecedora.

Analisando as questões subjetivas observamos que elas são mais específicas. Elaboramos questões que abordam a difração de forma mais específica e tratam de sua ocorrência no cotidiano. Nas figuras 36 e 37 temos imagens dos questionários respondidos por 2 alunos. Vemos mediante análise destes dados que a maioria dos alunos conseguiu adquirir algum conhecimento acerca dos assuntos de difração e ondas.

7.2 Análise dos resultados obtidos do questionário de satisfação

O resultado obtido na questão 1 mostra que uso do simulador foi 100% proveitoso para a melhora das aulas, pois ele dá uma dinâmica na aprendizagem e desenvolvimento mais eficaz do conteúdo ministrado. Na questão 2 temos um percentual de 87,5% acham que o software é de fácil uso, no que diz respeito à dificuldade encontrada pelo aluno no uso do simulador o percentual de aluno que encontrou dificuldade em utilizá-lo foi bem baixo, levando em consideração que este software é fácil uso. Este foi um dos motivos pelos quais ele foi escolhido para ser a ferramenta pedagógica deste Produto Educacional. Na questão 3 foi uma unanimidade o apreço dos alunos pelo programa utilizado. Acharam o software com uma interface boa e amigável. Na questão 4 quando perguntado se recomendaria o software 87,5% dos entrevistados o recomendariam, mostrando a boa aceitação por parte dos estudantes.

Na questão 5, para 100% dos alunos as atividades desenvolvidas foram satisfatórias para a compreensão do conteúdo. Este percentual obtido está bem coerente, pois nas resoluções das atividades os índices de acertos são bem consideráveis nas questões tanto objetivas e discursivas. De igual modo, na questão 6, 100% aprovaram as aulas ministradas pelo professor. Na questão 7, para 87,5% as simulações feitas com o software tiveram relação com o conteúdo abordado em sala de aula. Este resultado mostra que eles conseguiram abstrair o assunto e puderam visualizar onde a difração pode ser aplicada no dia-a-dia.

Na questão 8, 70% acharam que estudar Física por meio de programas ou softwares é uma metodologia eficiente e capaz de despertar o interesse pela física. Vemos assim o quanto é importante o uso desta tecnologia dentro do ambiente escolar, pois vivemos a era da tecnologia. Além disso, nesta época que estamos vivendo uma pandemia da COVID-19, o uso das tecnologias está sendo de vital importância para que o processo de ensino tenha andamento.

Na questão 9, 85% dos alunos concordaram que com o uso do simulador RTS as aulas se tornaram mais fáceis, interessantes e menos abstratas. Isso mostra que existe uma maior interação entre professor e aluno com o uso do software. As aulas ficam mais dinâmicas e os alunos se tornam mais ativos nas aulas, sendo esta uma das propostas deste Produto Educacional. Na questão 10, quando perguntado se outros professores utilizaram algum software ou programa computacional, 72% responderam que não utilizavam. Desta forma vemos o quanto é importante outros professores colocarem em prática o uso da tecnologia em sala, pois temos ainda um número bem elevado de professores que não utilizam tecnologia para melhorar as atividades pedagógicas.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dado o exposto, podemos constatar como é de grande importância o uso da tecnologia no ambiente escolar. Ficou claro que com o uso de softwares educacionais as aulas se tornam mais dinâmicas e bem mais interessantes, desta forma o aluno pode se desvincular daquela forma de ensino tradicional, na qual não tinha participação e o conteúdo era depositado para apenas o aluno armazenar informações repassadas e não as relacionar com o seu cotidiano.

Por meio dos resultados analisados vimos como os alunos dão grande importância para a utilização dos recursos tecnológicos. Além do mais, ao fazer uso de alguma tecnologia durante o processo ensino-aprendizagem, as aulas se tornam mais atraentes e prazerosas. Durante o desenvolvimento desta pesquisa vimos a necessidade do uso de metodologias para que aproximem o aluno do assunto que está sendo trabalhado na sala de aula, aproximação esta que irá conduzi-lo à verdadeira essência daquele assunto, de maneira a tornar a aprendizagem significativa.

Desse modo, mais especificamente em relação à Física e ao atendimento dos desafios impostos pelo contexto atual, os alunos desenvolveram um perfil diferente do aluno do ensino tradicional dessa disciplina, adquirindo maior compromisso para com a construção de sua aprendizagem, experiências, conhecimentos, capacidades, interesse e compreensão dos conhecimentos. Essas características favorecem o processo, vinculam as experiências à base teórica, e solidificam a aprendizagem. Através da análise dos resultados dos questionários pudemos ter uma visão do alcance dos alunos, que conseguiram responder de forma satisfatória até mesmo perguntas de nível mais complexo e abstrato para eles.

Desejamos que outros professores, não apenas área de Física, como também das demais exatas, venham a aderir ao uso de outras tecnologias para auxiliar na jornada no ambiente escolar. Devemos ressaltar que um dos fatores que tornou a presente pesquisa mais limitada foi a baixa participação dos estudantes, em função da pandemia de COVID-19. A assiduidade ficou muito prejudicada durante este período.

REFERÊNCIAS

ANA FUKUI - Madson de Melo Molina - Venerando Santiago Oliveira. Marca: Ser Protagonista - Física 2º Ano - Ensino Médio - 2ª Ed. 2015 Edições Sm (Brasil)

ALBERTO GASPAR - compreendendo a física, Ondas, Óptica e Termodinâmica-Física 2 ºano -3.ed São Paulo,2017

BENIGNO BARRETO, CLAUDIO XAVIER, Física aula por aula, Termologia-Óptica-Ondulatória, 2ºano,3º edição, São Paulo 2016

BONJORNO CLITON, EDUARDO PRADO, Física ótica, termologia e ondulatória, 2º ano— 3º Ed -São Paulo: FTD 2016- coleção física.

BRASIL. Parâmetros Curriculares Nacionais. Brasília: Ministério da Educação e Cultura/Secretaria de Educação e Cultura, 2017.

CARNEIRO, informática na educação, representação sociais no cotidiano, São Paulo, Cortez.2002

CERQUEIRA, Priscila Mendes. as crenças sobre o ensino e a aprendizagem da matemática e suas interferências no diálogo entre professores e alunos. Anais da XII Conferência Interamericana de Educação Matemática. Blumenau: 2003.

COLL, César; VALLS, Enric. A aprendizagem e o ensino de procedimentos. In: COLL, César, VALLS, Enric. Os conteúdos na reforma: ensino e aprendizagem de conceitos, procedimentos e atitudes. Porto Alegre: Artes Médicas, 2000.

FOSSA, Jonh A. Ensaios sobre a Educação Matemática. Belém: EDUEPA, 2001.

FONT, Vicenç; GODINO, Juan D.; BENCOMO, Delisa. Análisis y valoración de la idoneidad didáctica de procesos de estudio de las ciencias. Paradigma, v. 27, n. 2, dez./2006, p.221-252

FOWLES, GRANT R, introduction to modern option, Reprint Originally Published, 2 nd, New York: Holt, Rineheart and Winston, 1975

FREIRE, F, M, P VALENTE, A; J , Aprendendo para a vida, Os computadores na sala de aula. São Paulo. Cortez 2001.

FUGIMOTO.S.M.A. O computador na sala de aula. O professor da Educação Básica e sua prática Pedagógica. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, Maringá.2010

GARNICA, Antonio Vicente Marafio. As demonstrações em educação: um ensaio. Bolema, a. 18, n. 4, set./2002, p. 91-99.

GASPAR ALBERTO. Compreendo física – volume 2: Ondas, óptica, termodinâmica, 3º --São Paulo :Ática 2016

GONÇALVES FILHO, A. TOSCANO, C. – Física Interação e tecnologia. Ed. Leya, 2013.

HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl, Fundamentos de Física –Ótica e Física Moderna, Volume 4, 9ª Edição, LTC, Rio de Janeiro, 2009

LIBANEO, Jose Carlos didática, são Paulo: Cortez, 2017.

MAURÍCIO PETRECOLA et al. Física em contextos, vol 3 :Ensino médio –1 ed_SãoPaulo:Editora do Brasil 2016.

MUTSCHELE, Marly Santos. Problemas de Aprendizagem da Criança: causas físicas, sensoriais, neurológicas, emocionais, intelectuais, sociais e ambientais. 4 ed. São Paulo: Loyola, 2001.

NEVES, Liliane Ferreira. Um estudo sobre as relações entre a percepção e as expectativas dos professores e dos alunos e o desempenho em Matemática. Dissertação de Mestrado. Campinas: UNICAMP, 2002

POLYA, George. Como resolver problemas. Lisboa: Gradiva, 2003.

PONTE, João Pedro da. Fundamentos de didática da Matemática. Revista Educação Matemática, n. 8, a. 23, set./2005,p. 3-9.

POZO, Juan Ignacio. A solução de problemas: aprender a resolver, resolver para aprender. Porto Alegre: Artmed, 2000.

RODRIGUES, Ronaldo Nogueira. Relação com o saber: um estudo sobre o sentido da Matemática em uma escola pública. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2001.

VERGANI, Teresa. Educação Matemática: um horizonte de possíveis sobre uma educação matemática viva e globalizante. Lisboa: Universidade Aberta, 2003.

MARCO ANTONIO MOREIRA, uma análise crítica do ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142018000300073 , acesso em 22/06/2020

NUSSENZVEIG, H. Moysés. Curso de física básica, Ótica, Relatividade e Física Quântica, Volume 4, São Paulo: Ed. Blücher, 2007.

PARPED. A máquina das crianças. Repensando as Escolas na era da Informática. São Paulo: Bookman, 2007

PARANÁ. Secretária de Estado da Educação. Paraná Digital. Tecnologia de informação e comunicação nas Escolas Públicas Paranaenses. Curitiba, 2010

TIPLER, PAUL.A/MOSCA GENE Física para cientista e engenheiros, Ótica e Física Moderna, volume 3, 6ª edição, ed. LTC, 2009.

TREFIL, HAZEN, R.M. Física viva. Uma introdução a física conceitual.V3.Rio de Janeiro: LTC, 2006.

SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark Waldo; YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física IV Ótica e Física Moderna. Vol 4, 12.ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2008.

SEARWAY , R. A; JEWETT,J,W. Princípios de Física.volume 3.São Paulo:Thomsom e Learning , 2002

WITTER, Geraldina Porto. Psicologia da Aprendizagem /Geraldina Porto Witter, Jose Fernando Bitencourt Lomânco .--- São Paulo:EPU, 1984 (Temas básicos de Psicologia:v.9)

YAMAMOTO, KAZUITO. Física para o Ensino Médio, volume 2, ondas e termodinâmica / Kazuito Yamamoto, 4 ed—São Paulo: Saraiva 2016. 58

APENCIDE A

Atividade para verificação de aprendizagem

Cem anexo São Cristóvão anexo III /São Bernardo

Nome:

1) *Conceitue difração e dê exemplos de sua ocorrência no dia a dia?*

É o espalhamento de uma onda e o contorno de obstáculos, quando conversamos e ouvimos e voz da pessoa, mesmo não estamos no mesmo cômodo

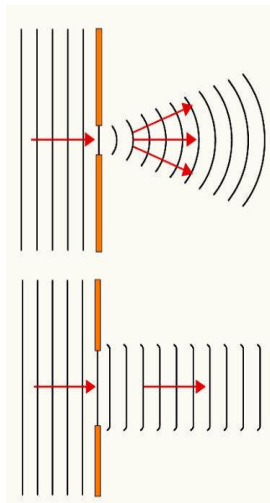
2) *Thomas Young (1773-1829) fez a luz de uma fonte passar por duas fendas paralelas antes de atingir um obstáculo e observou no anteparo o surgimento de regiões claras e escuras. O que representam essas regiões?*

Pontos de máximo e mínimo

3) *Numa difração em fenda única, após a onda passar pela fenda, qual é a característica que vai ser alterada?*

Frentes de onda

4) Faça um desenho de uma figura de difração em uma fenda única, (a) quando o seu comprimento de onda é aproximadamente igual ao tamanho a largura da fenda (b) quando o comprimento de onda é bem menor do que a largura da fenda



5) *Quando um feixe de luz incide na superfície de um CD, observa-se a formação de cores na parte gravada, e reflete as cores correspondentes ao espectro da referida luz. Esse fenômeno ocorre por que o CD funciona?*

Rede Difração

APÊNDICE B

Atividade para verificação de aprendizagem

- 1) Qual definição abaixo se refere melhor à de uma onda mecânica?
 - a) é uma onda que precisa de um meio para se propagar.
 - b) é uma onda que não precisa de um meio para se propagar.
 - c) é um movimento retilíneo.
 - d) é um corpo eletrizado.

- 2) Em relação ao seu comprimento de onda, o efeito da difração será mais perceptível quando:
 - a) o comprimento de onda for muito maior do que a largura da fenda
 - b) o comprimento de onda for muito menor do que a largura da fenda
 - c) o comprimento de onda for aproximadamente do tamanho da largura da fenda
 - d) o comprimento de onda for nulo.

- 3) Quanto à direção de vibração, uma onda em uma mola é:
 - a) longitudinal
 - b) transversal
 - c) gravitacional
 - d) mecânica

- 4) Qual nome o famoso experimento feito por Thomas Young, que revelou o efeito da difração?
 - a) queda livre
 - b) inercia
 - c) lei de ohm
 - d) fenda dupla

APÊNDICE C

Questionário de Satisfação para verificação os objetivos a serem alcançados

1) As aulas ficaram melhores e mais interativas com o uso do simulador?

()sim não()

2) Você encontrou alguma dificuldade em utilizar o simulador?

()sim não()

3) Você gostou do método de ensino para o aprendizado de ondas e difração?

()sim não()

4) Você recomendaria a utilização desse software para o ensino de ondas e difração?

()sim não()

5) Na sua opinião as atividades desenvolvidas em salas foram satisfatórias para uma compressão do conteúdo?

()sim não()

6) Na sua opinião as explicações do professor foram suficientes para o entendimento do conteúdo?

()sim não()

7) As simulações feitas com o software têm relação com o conteúdo abordado em sala de aula?

()sim não()

8) Você acha que estudar Física por meio de programas ou softwares é uma metodologia eficiente e capaz de despertar o interesse pela física?

()sim não()

9) Na sua opinião a Física se tornou mais fácil, interessante e menos abstrata depois do uso do simulador?

()sim não()

10) Outro(s) professore(s) utilizavam algum software ou programa de computador para auxiliar nas aulas de Física?

()sim não()

Produto Educacional

Uso de um simulador como ferramenta Pedagógica para facilitar o ensino de Difração
no Ensino Médio

Aldo Alberto



Autor: Aldo Alberto Câmara Marques

Orientador: Jerias Alves Batista

Capa: <https://kuadro.com.br/>

Apresentação

Prezado(a) professor(a)

O presente material tem por objetivo fornecer ao professor da Educação Básica um material complementar ao livro-texto com uma descrição mais adequada sobre o assunto difração. Neste material, o aluno encontrará uma breve descrição sobre o contexto histórico e observações que levaram à descoberta desse fenômeno, e também a trajetória que cada cientista percorreu para elaboração de suas teorias.

Por meio deste Produto Educacional, o educador terá acesso a uma abordagem mais aprofundada do que a normalmente encontrada nos livros-textos sobre como o fenômeno da difração está presente no nosso cotidiano, devidamente contextualizado. Por meio deste material, o professor verá como a difração é fundamental para o funcionamento de muitos produtos tecnológicos e como sua descoberta deu um salto muito grande no avanço da humanidade. Este Produto Educacional se baseia em uma metodologia na qual o aluno tem autonomia, e pode colocar em prática o conhecimento adquirido durante as aulas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 Descrição Física do Problema.....	9
2.1.1 As Ondas e o Ambiente de Propagação.....	9
2.1.1.1 Ondas Mecânicas	11
2.1.1.2 Ondas Eletromagnéticas.....	12
2.1.2 As Ondas e os Entes Oscilatórios	15
2.1.2.1 Ondas Transversais	16
2.1.2.2 Ondas Longitudinais	17
2.2 Descrição Matemática do Problema	19
2.2.1 Ondas Mecânicas e Eletromagnéticas.....	22
2.3 O Fenômeno da Difração de Ondas	24
2.3.2 A Difração à Luz do Princípio de Huygens-Fresnel	33
2.3.3 Intensidade das Ondas Difractadas.....	37
2.4 Uso do Software <i>Ripple Tank Simulation</i> Como Mediador para o Ensino da Difração	42
2.4.1 Instruções básicas sobre a operação do RTS	44
2.4.2 Aplicações do RTS.....	46
3 SEQUENCIA DIDÁTICA CONSTRUTIVISTA.....	51
3.1 Desenvolvimento das Etapas do Produto Educacional.....	54
Referências.....	60

1 Introdução

Sabe-se que o modelo utilizado para o ensino de Física no Brasil não tem alcançado o nível satisfatório, haja vista os resultados observados nas últimas avaliações do Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA), um programa da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). É fácil comprovar isto a partir da comparação do rendimento escolar dos estudantes brasileiros com o rendimento de estudantes de dezenas de países de todos os continentes, a partir de uma rápida investigação nos resultados da avaliação de 2018. Uma das possíveis razões para este baixo rendimento está no fato de que os conteúdos da área de Física não são vistos com uma abordagem apropriada para o seu entendimento ou, em grande parte, não são trabalhados ao longo do ensino médio.

Neste Produto Educacional será desenvolvida uma proposta de ensino para facilitar o aprendizado do conteúdo da difração e ondas. Este assunto deveria ser explorado de forma mais consistente para que o público do Ensino Médio pudesse ver sua importância e, consequentemente, ter mais interesse pela Física no dia a dia. Quase sempre ela é vista como uma disciplina difícil, estressante, e muitas vezes até confundida com a Matemática, pelo fato de os professores ministrarem seus conteúdos apenas usando fórmulas.

A Física não é trabalhada de forma que a fenomenologia seja bem entendida. Seus conceitos são vistos de maneira muito superficial e abstrata, não sendo possível a seu aprendizado mecanicista se conectar aos subsunçores dos estudantes e, portanto, não levando a uma aprendizagem significativa. Assim como no ensino geral da Física, os conceitos de difração são pouco explorados ou, quando muito, repassados de forma resumida e superficial, tal como se encontram nos livros didáticos. Diante dessa problemática, o presente Produto Educacional tem como objetivo elaborar uma metodologia facilitadora da compreensão do conteúdo da difração utilizando um simulador virtual que reproduz cenários relevantes sobre difração.

Em geral as aulas sobre ondas e suas aplicações são ministradas de maneira expositiva, com ênfase em fórmulas matemáticas, e a resolução de exercícios usando apenas a substituição de letras por números. A aferição do conhecimento nas avaliações é feita de forma mecânica, geralmente abordando questões iguais às já resolvidas em sala de aula. Esta metodologia de ensino é ineficaz à medida em que não forma um estudante com capacidades de investigação crítica de sua realidade. Por meio de uma sequência didática investigativa, neste Produto Educacional serão trabalhados alguns conteúdos na parte de ondulatória que são necessários para a compreensão do assunto difração. Como elemento de motivação, será utilizado o simulador virtual de ondas planas denominado *riper tank simulacion*.

A escolha do assunto difração para a elaboração deste Produto Educacional partiu do pressuposto de que o assunto é pouco explorado nas escolas de ensino médio. Embora seja um conteúdo abstrato para o estudante, ele é a base para muitas explicações e aplicações no cotidiano, de modo que é um tema fundamental da Física a serem ensinado e aprendido. Em geral, os professores encontram dificuldades na execução e transmissão deste conteúdo quando usam apenas o livro texto e o quadro em sala de aula. Entretanto, historicamente este tem sido o método mais utilizado no processo de ensino. Uma matéria da importância da Física - que está presente em quase todos os fenômenos naturais e que nos transmite uma descrição completa do funcionamento do Universo, deveria ser abordada de forma mais contextualizada. Segundo Moreira:

A Física permeia a vida de todos os seres humanos. Ela está na base das Tecnologias de informação e comunicação, da engenharia das técnicas de diagnósticos e tratamentos usados na Medicina. A Física tem modelos e teorias que explicam grande parte do mundo físico que vivemos. Biologia, Química, neurociências e outras áreas científicas usam conceitos, princípios, modelos e teorias derivados da Física. Então, aprender física é um direito humano. (Moreira. 2017)

Desta forma, vemos que a Física é a base de muitas outras áreas do conhecimento. Porém, o que vemos é que os conteúdos da área Física são transmitidos de maneira muito superficial e meramente explicativos, seguindo apenas um roteiro. Podemos ver que o método utilizado para ensinar a Física está pautado em apenas repassar os conteúdos, não tem muito a finalidade de que o aluno aprenda de fato; é meramente com o intuito que ele passe de ano, é um ensino mecanizado, baseado apenas na resolução de problemas, somente o prepara para provas e exames. O aluno apenas coleta aquela informação e ela é processada, o professor apenas leva aquela carga de conteúdo ao aluno. Para Moreira:

Contudo, “mais Física” não significa mais conteúdo a serem decorados, memorizados mecanicamente. É preciso pensar como ensinar esses conteúdos. É preciso dar atenção didática específica, à transferência didática, a como abordar a Física de modo a despertar o interesse, a intencionalidade, a predisposição dos alunos, os sem os quais a aprendizagem não será significativa, apenas mecânica para “passar”. (MOREIRA. 2017)

O professor deve estar nesta busca constante para desenvolver práticas de ensino que estimulem a participação mais ativa dos alunos, deve desenvolver metodologias de ensino mais eficazes que tornem as aulas mais dinâmicas e prazerosas.

Segundo Libâneo (2017), a pedagogia tradicional caracteriza as concepções de educação onde sobressai a educação massificada, repetição, o acúmulo de conhecimentos, e o que importa é a transmissão do saber passado de geração a geração como se fossem verdades absolutas. O professor

é o detentor do saber e o aluno é um ser passivo. Diante dessa problemática, este Produto Educacional tem como propósito levar uma nova perspectiva ao ensino de Física.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o objetivo de subsidiar as discussões sobre o fenômeno da difração de ondas, inicialmente será feita uma análise pormenorizada acerca dos principais conceitos associados aos fenômenos ondulatórios e oscilatórios. De modo geral, pode-se dizer que estes fenômenos são inerentes à natureza e, como tal, se manifestam no nosso cotidiano, do universo macroscópico das galáxias e estrelas até a escala microscópica das partículas subatômicas. Alguns exemplos serão mencionados apenas para demonstrar a grande abrangência destes. Um carro se movendo em uma pista irregular apresenta pequenas oscilações; um barco ao navegar em alto mar oscila lentamente em razão das ondas que o atingem; o som que ouvimos chega aos nossos ouvidos como um padrão ondulatório que se propaga no ar, cujas moléculas oscilam na direção da propagação da onda; terremotos são o resultado de oscilações das camadas de rochas da crosta terrestre.

Do mesmo modo, a informação compartilhada entre dois *smartphones* ocorre via ondas viajantes que são formadas pelas oscilações de campos elétrico e magnético que permeiam todo o Universo. O mesmo ocorre com sinais de TV, rádio, Wi-Fi, radar, etc. Segundo a teoria física denominada Modelo Padrão, as próprias partículas elementares que formam toda a matéria ordinária, tais como elétrons, *quarks up* e *quarks down* (estes últimos formadores de prótons e nêutrons), são oscilações nos campos elétrico e magnético. Sendo assim, fenômenos como a fusão nuclear, que alimenta o brilho das estrelas, e a fissão nuclear, que controla os decaimentos radioativos nos átomos, são todos fenômenos ondulatórios.

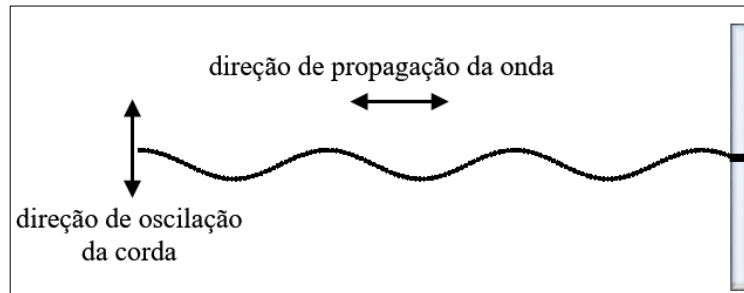
Como se pode verificar, são muitos exemplos da ocorrência de ondas no nosso cotidiano. As ondas também são muito importantes para o desenvolvimento da tecnologia. Através delas foi possível o aperfeiçoamento de muitos aparatos tecnológicos e, graças a essa maravilha da natureza, podemos nos comunicar com pessoas a grandes distâncias quase instantaneamente.

Ficou evidente nos parágrafos acima a importância das ondas e os cenários nos quais elas se manifestam com mais evidência. Entretanto, ainda não foi dada uma definição precisa acerca do que seja uma onda. Mediante uma pesquisa nos livros didáticos aprovados no PNLD podem-se achar vários conceitos, que juntos definem o que é uma onda. Onda é uma perturbação que se propaga no espaço contendo matéria ou não. Elas transportam energia e quantidade de movimento, sem que haja o transporte de matéria propriamente.

A Figura 1 ilustra uma onda que se propaga em uma corda na direção horizontal que se encontra presa a um obstáculo na sua extremidade direita. Esta onda causa apenas movimento oscilatório vertical nos elementos da corda, de modo que estes não se movem na direção de propagação da onda. No caso desta ilustração, a corda oscila verticalmente apenas. As ondas podem ser classificadas em vários tipos, dependendo do meio no qual eles se propagam e da maneira como as oscilações das

partículas do meio ocorrem. Nas próximas seções será feita uma breve discussão sobre os aspectos físicos e matemáticos das ondas.

Figura 1 – Propagação de ondas em uma corda esticada.



Fonte: Próprio autor.

2.1 Descrição Física do Problema

Uma possível maneira de se conhecer um fenômeno que possui um grau de complexidade é mediante a identificação de um grupo de propriedades que sejam comuns dentro de determinados cenários. Com esta proposta, os fenômenos ondulatórios podem ser descritos em conexão com o tipo de ambiente no espaço dentro do qual as ondas se manifestam. Além disso, eles podem ser descritos de acordo com a forma como as oscilações que dão origem às ondas ocorrem, quando comparadas com a direção de propagação da energia da onda. Nas subseções seguintes cada caso será examinado separadamente.

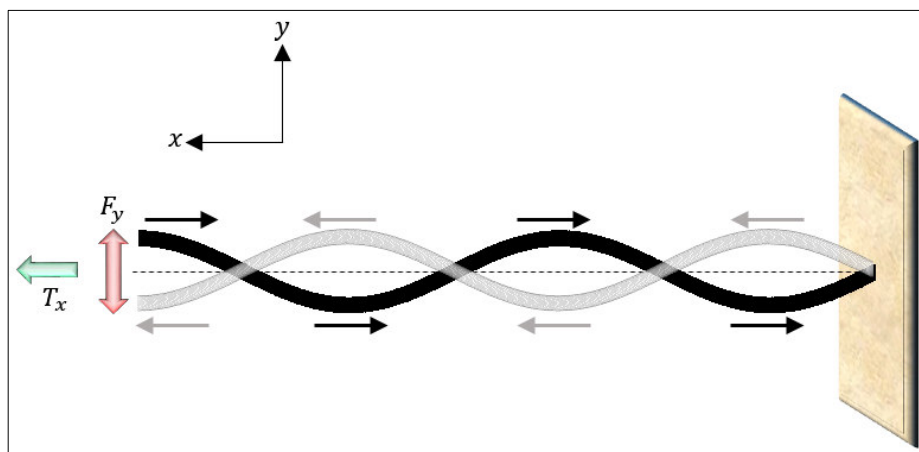
2.1.1 As Ondas e o Ambiente de Propagação

Quanto às características do espaço dentro do qual as ondas existem, elas podem ser classificadas em três grandes grupos, denominados ondas mecânicas, ondas eletromagnéticas e ondas quânticas.

2.1.1.1 Ondas Mecânicas

Ondas mecânicas são ondulações existentes em partículas que possuem massa inercial não nula, ou seja, são ondas que se propagam em meios materiais cujas partes se movem coletivamente. Essas ondas são facilmente encontradas na natureza e, portanto, familiares à nossa percepção. Ondas do mar, ondas sonoras e ondas sísmicas mencionadas anteriormente são exemplos de ondas mecânicas. Com o objetivo de facilitar o entendimento deste tipo de onda, a Figura 2 ilustra uma corda com densidade de massa μ , esticada por uma força de tensão T_x que oscila na direção do eixo vertical y sob ação da força F_y . Enquanto a corda vibra na direção vertical, uma parte da energia fornecida por F_y se propaga para a direita, é refletida pela parede e então se propaga para a esquerda, eventualmente formando um padrão de distribuição de energia em equilíbrio dinâmico ao longo da corda, cujo perfil é conhecido como onda estacionária.

Figura 2: Ilustração para ondas mecânicas.



Fonte: Próprio autor.

Como este tipo de onda depende do movimento de partículas com massa, quanto maior a densidade de massa da corda menor é a velocidade de propagação destas ondas. Pondo na forma de uma equação tem-se:

$$v = \sqrt{\frac{T_x}{\mu}} \quad (1)$$

Observa-se que a velocidade da onda depende das propriedades do meio no qual ela viaja. Estudam-se estas ondas com a teoria de Newton para o movimento de partículas sob ação de forças.

Deve-se ressaltar que, embora a descrição acima seja mecânica, no sentido de que foi usado conceito de força newtoniana, a origem de todas essas forças que promovem a propagação contínua da energia e quantidade de movimento na forma de uma ondulação tem origem no campo eletromagnético. Entretanto, em virtude da necessidade de partículas materiais para a existência de tais ondas, a sua descrição por meio das leis do movimento de Newton é mais simples do ponto de vista intuitivo. A transmissão de energia pelo espaço sem a necessidade de partículas materiais será estudada na próxima seção, com as ondas eletromagnéticas.

2.1.1.2 Ondas Eletromagnéticas

São aquelas cujas oscilações não são produzidas pelo movimento de partículas com massa inercial, mas sim pelas mudanças nos valores de duas grandezas físicas intrínsecas ao espaço conhecidas como campo elétrico $\vec{E}$ e campo magnético $\vec{B}$. Uma vez que estes campos existem em todos os locais do Universo, este tipo de onda se encontra espalhada por todo o espaço. O que denominamos de campo elétrico e magnético são, na verdade, perturbações nos campos elétricos e magnético intrínsecos que preenchem todo o espaço.

Quando as perturbações nos campos intrínsecos são criadas por uma carga elétrica estacionária ou em movimento com velocidade constante, os campos elétrico e magnético gerados são denominamos de campos estáticos. Como exemplo, temos os campos elétricos e magnéticos estudados em eletrostática e magnetostática do 3º. ano do ensino médio, respectivamente. Quando as perturbações nos campos intrínsecos são produzidas pelo movimento da energia através deles, os campos elétrico e magnético gerados são denominamos de campos oscilantes ou ondas eletromagnéticas. Estes últimos formam o que é conhecido como raios-gama e raios-x; luz ultravioleta, visível e infravermelha; ondas de TV e rádio.

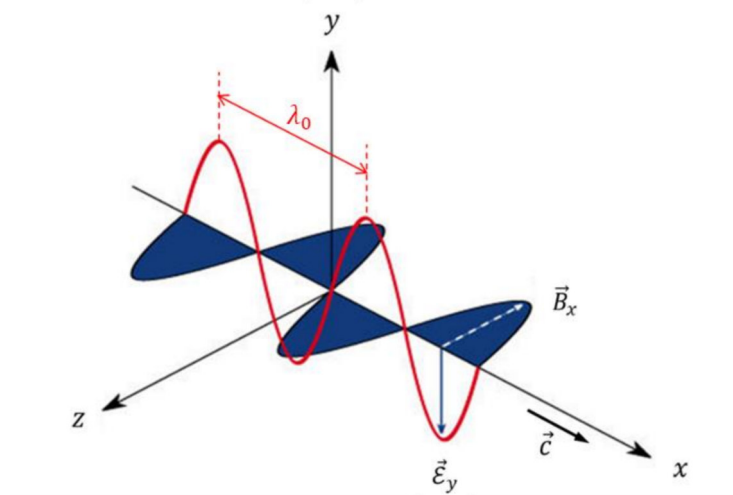
A Figura 3 ilustra como os campos elétrico $\vec{E}_y$, na direção do eixo y e magnético $\vec{B}_z$, na direção do eixo z , se combinam perpendicularmente no espaço formando o padrão conhecido como onda eletromagnética. Deve-se chamar a atenção para o que realmente se move aqui. Observe que os campos representados na figura não se movem ao longo dos eixos, mas apenas alteram seus valores em cada ponto do espaço. São as mudanças nos valores dos campos que se movem na forma de uma ondulação, na direção do eixo x , perpendicular às direções dos campos $\vec{E}_y$ e $\vec{B}_z$.

Quando diferentes ondas eletromagnéticas se propagam no espaço sem que haja partículas materiais presentes suas velocidades são todas iguais (aproximadamente 300.000 km/s), o máximo valor possível para elas. Matematicamente esta velocidade pode ser expressa como $v_{m\acute{a}x} = \lambda_0 f$, onde

o símbolo λ_0 representa o comprimento de onda de uma onda no espaço vazio de matéria (vácuo), definido como a distância entre dois pontos equivalentes da mesma (veja a Figura 3 novamente), e f é a taxa de oscilação temporal (ou frequência temporal) dos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ no mesmo ponto do espaço. Este parâmetro f representa quantas vezes uma variação no valor do campo atinge um máximo, ou outro valor equivalente, dentro de um intervalo de tempo de 1 segundo. Estas definições serão estudadas com detalhes na seção 2.2.1. No espaço vazio de matéria nem λ_0 e nem f são alterados durante a propagação da onda. A partir do início do século XX passou-se a usar a letra c (do latim *celeritas* = celeridade, ligeireza) para representar a máxima velocidade das ondas eletromagnéticas. É por esta razão que os livros-textos usam $v_{m\acute{a}x} \equiv c$, e a velocidade de propagação da onda é expressa como:

$$c = \lambda_0 f \quad (2)$$

Figura 3: Campo Magnético e campo elétrico a combinação destes vai gerar ondas eletromagnéticas.



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/ondas.htm>

Quando diferentes ondas eletromagnéticas se propagam no espaço contendo partículas materiais suas velocidades não se mantêm mais as mesmas uma em relação às outras. Além disso, todos os valores das velocidades são reduzidos quando comparados àqueles da propagação no espaço livre de partículas. A Equação (2) deve ser adaptada para incluir a influência da matéria sobre as velocidades e sobre os comprimentos de onda. A frequência f da onda eletromagnética é uma propriedade intrínseca dos campos elétrico e magnético, sem nenhuma relação com o meio externo. Portanto, esta é a única propriedade da onda que não é afetada pela matéria dentro do espaço no qual ela se propaga. Com estas informações, a Equação (2) pode ser reescrita na forma:

$$v_{mat} = \lambda_{mat} f \quad (3)$$

sendo v_{mat} a velocidade da onda dentro da matéria e λ_{mat} o comprimento de onda alterado por ela. Dividindo a Equação (3) pela Equação (2), encontra-se

$$\frac{v_{mat}}{c} = \frac{\lambda_{mat} f}{\lambda_0 f} = \frac{\lambda_{mat}}{\lambda_0} \rightarrow v_{mat} = \frac{\lambda_{mat} c}{\lambda_0} \quad (4)$$

Quando a onda viaja no vácuo, seu comprimento de onda λ_0 é maior do que a mesma onda viajando dentro da matéria ($\lambda_0 > \lambda_{mat}$), de modo na Equação (4) temos $v_{mat} < c$. Deve-se ter claro em mente o que de fato significa esta alteração na velocidade de uma onda eletromagnética. Segundo a teoria eletromagnética de Maxwell, que resultou na descoberta de tais ondas, uma onda eletromagnética viaja com velocidade constante máxima no espaço vazio. Isto é precisamente o conteúdo da Equação (2), já que λ_0 e f não mudam. Então, o que a Equação (3) realmente significa? Que a onda luminosa é freada quando entra em uma região do espaço contendo matéria e é acelerada após atravessá-la? Que tipo de interação seria responsável pela desaceleração e posterior aceleração da onda, e como ela poderia ser quantificada?

A resposta deve ser obtida considerando que a matéria pode ser concebida como um meio contínuo na escala macroscópica, mas discreta na escala microscópica. Dito de outra forma, a superfície de um material feito de átomos mantidos a uma certa distância pode ser vista de longe como um contínuo de átomos, já que não é possível observar as pequenas distâncias entre eles na escala macroscópica. Entretanto, se essa mesma superfície fosse observada de uma distância semelhante à que separa um átomo do seu vizinho, os átomos seriam vistos afastados uns dos outros, tendo apenas o vácuo entre eles. É fato consolidado na física experimental que a velocidade de uma onda eletromagnética é reduzida quando ela penetra a matéria, de modo que vale a relação:

$$c = n v_{mat} \quad (5)$$

onde n é um número que representa a influência da matéria na redução da velocidade, conhecido como índice de refração. O termo refração, que significa inclinação, quebra, mudança de direção, vem do fato de que as ondas ao entrarem na matéria mudam a direção de seu movimento em razão da mudança de sua velocidade. No vácuo $n = 1$, dentro da matéria $n > 1$. Sem entrar em detalhes do cálculo matemático que leva à dependência do fator n com as propriedades da matéria, pode-se mostrar que [Richard Feynman, vol. 1, equação 31.19]:

$$n = 1 + \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (6)$$

sendo N a densidade de átomos do material e e é o valor da carga elétrica de um elétron. O símbolo ε_0 representa facilidade com que o campo elétrico intrínseco é alterado pela presença da onda, denominado de permissividade elétrica do vácuo. m é a massa do elétron, ω_0 é a frequência angular com que os elétrons estão se movendo dentro dos átomos, denominada de frequência de ressonância, e ω é a frequência angular das oscilações dos campos da onda eletromagnética. Das Equações (5) e (6) obtemos a expressão da velocidade da onda na matéria v_{mat} em função das propriedades do material e da onda no vácuo:

$$v_{mat} = c \left(1 + \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2)} \right)^{-1} \quad (7)$$

Observa-se que sem a presença da matéria ($N = 0$), v_{mat} torna-se igual a c .

A discussão feita até aqui mostrou apenas o fator de redução da velocidade da onda eletromagnética na matéria, mas não ficou claro como isto acontece. Classicamente, esta redução na velocidade pode ser explicada de forma relativamente simples. Quando o campo elétrico oscilante da onda eletromagnética interage com os elétrons mais externos dos átomos (elétrons de valência) estes são impulsionados a oscilarem na mesma frequência, perpendicularmente à direção de propagação da onda, ou seja, na mesma direção de seu campo elétrico. Os elétrons oscilantes juntamente com o restante do átomo formam um dipolo elétrico induzido que, por sua vez, emitem uma onda eletromagnética perpendicular ao seu eixo de polarização. Ou seja, a direção da onda emitida pelo dipolo coincide com a direção de propagação onda original que o criou. Em razão da massa inercial dos dipolos, a onda produzida por estes é emitida com certo atraso, ou seja, defasada em relação àquela que os induziu, e se propaga com velocidade menor, v_d .

Como resultado da superposição espacial destas ondas temos o fenômeno do batimento, o que leva à percepção pelo observador de uma terceira onda (formada pela mistura das duas ondas) que viaja no mesmo sentido das duas ondas originais, com velocidade v_{total} cujo valor é a média aritmética das velocidades das duas ondas, ou seja, $v_{total} = (c + v_d)/2$. O resultado da superposição é que se percebe uma onda que viaja com velocidade v_{total} inferior à velocidade da luz no vácuo e maior do que a velocidade da onda emitida pelos dipolos.

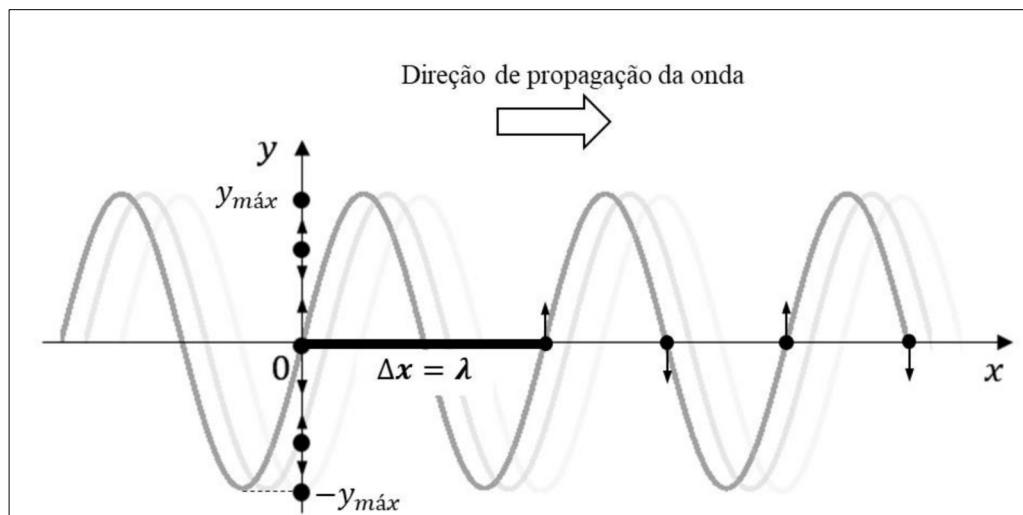
2.1.2 As Ondas e os Entes Oscilatórios

É possível fazer outra análise acerca das ondas observando-se a direção do movimento oscilatório de alguma grandeza em relação à direção de propagação da própria onda. Elas podem ser:

2.1.2.1 Ondas Transversais

São aquelas em que a direção das oscilações é perpendicular à direção de propagação da onda. A Figura 4 ilustra uma onda transversal em uma corda. Enquanto um ponto fixo na corda oscila apenas ao longo do eixo y , dentro do intervalo $\pm y_{m\acute{a}x}$, a onda se desloca na direção positiva do eixo x , sendo que a cada distância $\Delta x = \lambda$ a partícula se encontra na mesma posição e se movendo ou tendendo a se mover no mesmo sentido. Esta foi precisamente a definição de comprimento de onda, conforme descrito na seção 2.1.1.2. As ondas eletromagnéticas ilustradas na Figura 3 também são longitudinais. Os campos elétrico e magnético sempre oscilam perpendicularmente ao eixo de propagação da onda.

Figura 4: Ilustração para uma onda do tipo transversal em uma corda.

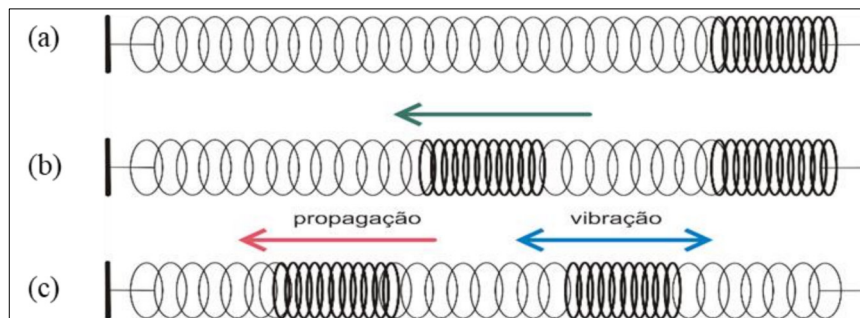


Fonte: Próprio autor.

2.1.2.2 Ondas Longitudinais

São aquelas em que a direção de oscilação ocorre na mesma direção do movimento. A Figura 5 ilustra uma onda longitudinal em uma mola. Um impulso é dado na extremidade direita da mola ao longo de seu eixo fazendo-a comprimir-se localmente (Figura 5a). Ao se descomprimir, este setor da mola comprime a região vizinha mais à esquerda e isso se repete até à extremidade esquerda da mola (Figuras 5b e 5c). Esse movimento regular de compressão e descompressão dos setores da mola é o que se denomina onda longitudinal. Não existe um nome especial para este tipo de onda mecânica, sendo denominada apenas onda de pressão. Este mesmo efeito ocorre nas rochas, sendo popularmente denominado de terremoto.

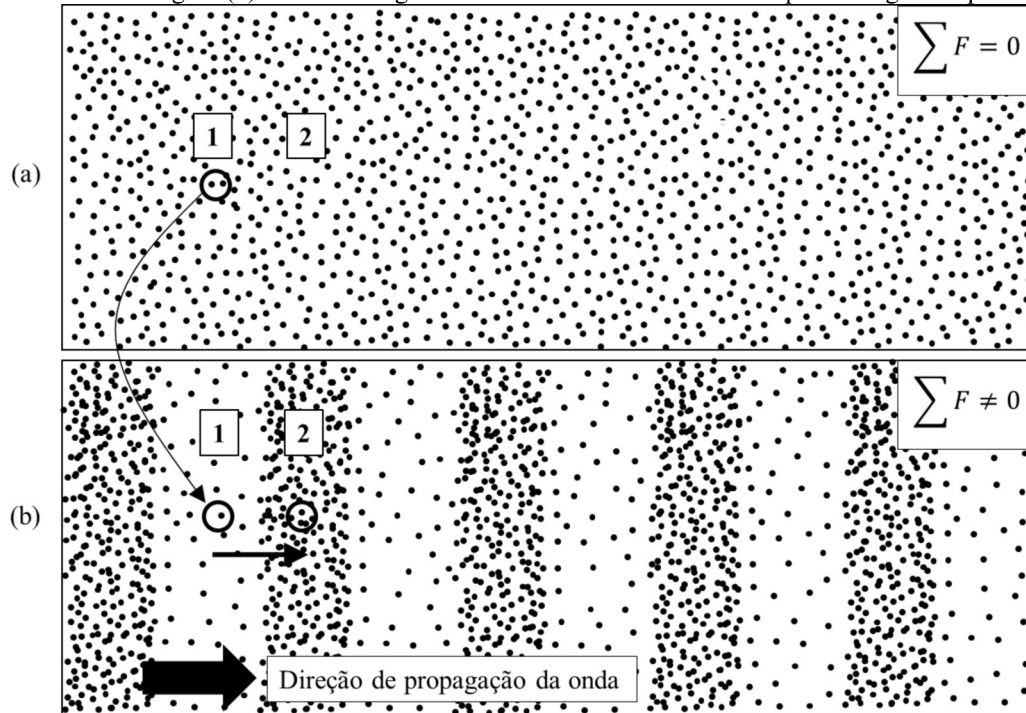
Figura 5: Ilustração para uma onda do tipo longitudinal em uma mola.



Fonte: <http://3.bp.blogspot.com>

Movimento semelhante pode ser observado com as partículas do ar. Neste caso, a onda recebe um nome especial de som. A Figura 6a ilustra uma região do espaço na qual as moléculas estão dispostas na sua configuração de equilíbrio dinâmico, mantendo distâncias regulares. A densidade de moléculas nas regiões 1 e 2 destacadas na figura são iguais. Não há um estímulo para que elas se movam para longe de suas posições, mas por conta da agitação térmica elas apenas oscilam no entorno de posições fixas. Existem forças sobre cada molécula devido à agitação térmica; mas por estarem todas com a mesma energia as forças se cancelam mutuamente.

Figura 6: Ilustração para uma onda do tipo longitudinal no ar. Na Figura (a) as moléculas estão uniformemente distribuídas. Na Figura (b) elas estão organizadas de forma a evidenciar um padrão regular repetitivo.



Fonte: Próprio autor.

Acompanhe o caso da molécula destacada pelo círculo na região 1 na Figura 6a. A Figura 6b ilustra o cenário no qual uma onda sonora é transportada por estas moléculas de ar, da esquerda para a direita. Veja que sob uma força impulsiva as moléculas que se encontravam na região 1 são deslocadas para a região 2. A região 1 fica com poucas moléculas e menor pressão (choques entre as moléculas), enquanto a região 2 fica com excesso de moléculas e maior pressão. Por estarem ligadas umas às outras, as moléculas na região 2 reagem com uma força contrária, na tentativa restaurar a configuração de equilíbrio anterior que havia no cenário da Figura 6a. Sob ação desta força restauradora, e por conta da inércia das moléculas, estas ultrapassam o ponto de equilíbrio para o lado direito e provocam o mesmo efeito nas moléculas à sua direita. Este processo continua indefinidamente, e o pulso de energia vai se deslocando através do ar. Para o caso das ondas longitudinais, a variável dinâmica é a pressão do meio, que aumenta e diminui conforme se dá o ajuntamento ou a separação das partículas.

Deve-se analisar a Figura 6 com cuidado, pois se trata de um equilíbrio dinâmico. Ele ocorre quando a força impulsiva externa se mantém atuando sobre as moléculas da esquerda da figura (não mostrada). O que vemos na Figura 6b é uma representação de como estariam distribuídas as moléculas após um certo instante de tempo. Esta distribuição não é estática, mas oscila com o tempo, segundo a passagem do pulso de energia para a direita.

2.2 Descrição Matemática do Problema

Nas seções anteriores fizemos uma descrição física sobre as ondas considerando apenas seus aspectos qualitativos. Entretanto, para um entendimento mais aprofundado do assunto é necessário obter-se previsões quantitativas que possam ser comparadas com a observação da natureza. Isto será feito a partir da derivação da equação das ondas e posterior análise de sua solução.

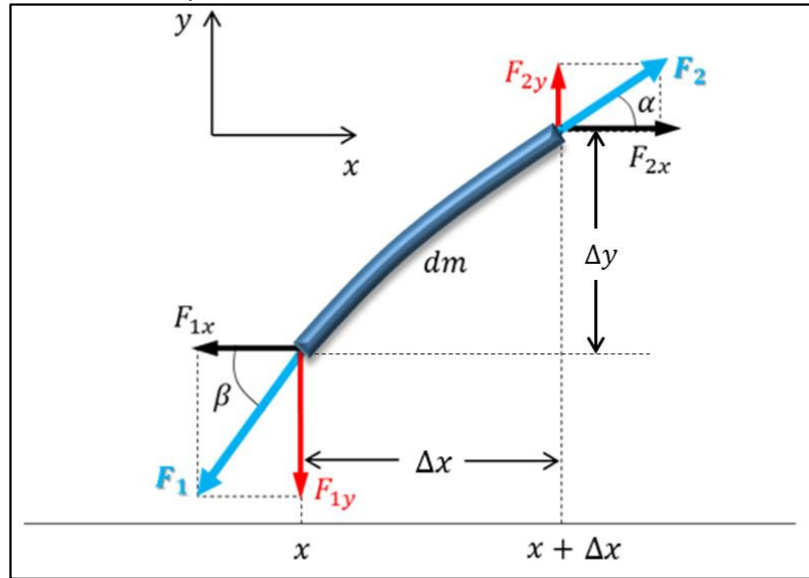
2.2.1 Ondas Mecânicas

Por motivos de simplicidade matemática, uma corda esticada (tensionada) será usada como cenário para o estudo das ondas mecânicas e eletromagnéticas. Não há restrição na demonstração que será feita visto que as ondas mecânicas e eletromagnéticas possuem uma estrutura matemática semelhante, sendo a única diferença entre elas a entidade que está oscilando no tempo e no espaço – o deslocamento de uma partícula ou valores dos campos elétrico e magnético.

A Figura 7 mostra um pequeno setor de uma corda que se encontra sobre o eixo x , na qual uma onda viaja com velocidade v_x da esquerda para a direita. O setor da corda ilustrado está sob a ação das forças de tensão F_1 e F_2 em suas extremidades. Ambas são forças tangentes ao setor da corda nos seus pontos de aplicação. No momento em que o pulso de energia passa pelo elemento da corda ele se move perpendicularmente à direção de propagação do pulso, ou seja, na direção do eixo y . Utilizando a segunda lei de Newton pode-se encontrar a equação geral para a onda. As componentes F_x das forças se cancelam, pois não há movimento da corda nesta direção ($F_{1x} = F_{2x} = F_x$). A partir da geometria da figura pode-se encontrar a força F_y :

$$F_y = F_{2y} - F_{1y} \quad (8)$$

Figura 7 – Elemento de uma corda com massa dm na qual uma onda se propaga. As forças sobre os elementos da corda estão mostradas.



Fonte: Próprio autor.

As componentes F_{1y} e F_{2y} podem ser relacionadas às componentes F_{1x} e F_{2x} pelos ângulos α e β mostrados na figura, cujos valores absolutos podem ser escritos como:

$$tg\beta = \frac{F_{1y}}{F_{1x}} \equiv \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_x \quad \text{e} \quad tg\alpha = \frac{F_{2y}}{F_{2x}} \equiv \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_{x+\Delta x} \quad (9)$$

O símbolo Δ é usado em Matemática para representar a variação no valor de uma grandeza. Neste caso, $y = f(x, t)$. Como exemplo, $\Delta y / \Delta x$, significa a variação da grandeza y em relação à grandeza x . Geometricamente, o símbolo $\Delta y / \Delta x$ representa a inclinação da curva y em torno de um certo valor de x . Geometricamente, $\Delta y / \Delta x$ é representado pela tangente do ângulo. Substituindo estas definições na equação (8), e considerando a diferença entre os ângulos $tg\beta - tg\alpha$, encontramos:

$$F_y = F_x \left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_x \right] \quad (10)$$

Considerando que a massa do elemento Δx da corda seja $\Delta m = \mu \Delta x$, sendo μ a densidade linear de massa da corda, da segunda lei de Newton para a força F_y ($F_y = \Delta m \cdot a_y$), tem-se:

$$F_y = \mu \Delta x \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = \mu \Delta x \frac{\Delta}{\Delta t} (v_y) = \mu \Delta x \frac{\Delta}{\Delta t} \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right) = \mu \Delta x \frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2} \quad (11)$$

Igualando as Equações (10) e (11),

$$F_x \left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_x \right] = \mu \Delta x \frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2} \quad (12)$$

Dividindo os dois membros da Equação (12) por $F_x \Delta x$:

$$\frac{\left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)_x \right]}{\Delta x} = \frac{\mu}{F_x} \frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2} \quad (13)$$

Podemos ver que o termo do lado esquerdo da Equação (13) representa a diferença ou variação $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ dentro da distância Δx , de modo que podemos escrevê-la como:

$$\frac{\Delta \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta(\Delta y)}{\Delta x \Delta x} = \frac{\Delta^2 y}{\Delta x^2}$$

Substituindo este resultado na Equação (13), temos:

$$\frac{\Delta^2 y}{\Delta x^2} = \frac{\mu}{F_x} \frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2} \quad (14)$$

Fazendo uma rápida análise dimensional verificamos que μ/F_x tem dimensão $(kg/m)/(kg \cdot m/s^2) = (s/m)^2$. Portanto, o coeficiente μ/F_x equivale ao inverso do quadrado da velocidade. Como a força que aparece no coeficiente está na direção do eixo x , concluímos que esta velocidade também estará nesta mesma direção, e será interpretada como a velocidade da própria onda:

$$\frac{\mu}{F_x} = \frac{1}{v_x^2} \quad (15)$$

Substituindo a Equação (15) na Equação (14) encontramos a equação da onda na seguinte forma:

$$\frac{\Delta^2 y(x, t)}{\Delta x^2} = \frac{1}{v_x^2} \frac{\Delta^2 y(x, t)}{\Delta t^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta^2 y(x, t)}{\Delta t^2} = v_x^2 \frac{\Delta^2 y(x, t)}{\Delta x^2} \quad (16)$$

Podemos interpretar o termo $\Delta^2 y / \Delta t^2$ como a mudança na velocidade de y à medida que ele sobe e desce. À medida que este valor se desloca para cima e para baixo, os valores de x são afetados e se deslocam para a direita com velocidade constante v_x . Essa conexão entre x e y provém do gradiente de energia, que aqui está na direção positiva do eixo x . A Equação (16) representa todos os tipos de ondas mecânicas.

2.2.2 Ondas Eletromagnéticas

A adaptação para o caso de ondas eletromagnéticas é imediata. Basta substituir a posição vertical y de oscilação das partículas do meio pelos valores dos campos elétrico e magnético na mesma posição do espaço. Além disso, v_x deve ser substituído por c , símbolo utilizado para a velocidade da luz no vácuo.

$$\frac{\Delta^2 \mathcal{E}(x, t)}{\Delta x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\Delta^2 \mathcal{E}(x, t)}{\Delta t^2} \quad \text{e} \quad \frac{\Delta^2 B(x, t)}{\Delta x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\Delta^2 B(x, t)}{\Delta t^2} \quad (17)$$

As ondas eletromagnéticas são diferentes das ondas mecânicas no que tange àquilo que oscila para dar origem às ondas. Enquanto nas ondas mecânicas o parâmetro de oscilação é o deslocamento y da partícula, no caso das ondas eletromagnéticas temos dois entes oscilantes, o campo elétrico $\mathcal{E}$ e magnético B . A variação do campo $\mathcal{E}$ ao longo do espaço em virtude do movimento do pulso de energia dá origem à variação do campo B no tempo, e vice-versa. Esta é a razão de precisarmos de duas equações para descrever completamente uma onda eletromagnética, conforme demonstrado pelas Equações (17). A origem física por trás da interdependência entre a variação espacial de $\mathcal{E}$ e a variação temporal de B provém do fato de que B é um efeito relativístico de $\mathcal{E}$. Em outras palavras, se um observador em um sistema de referência inercial enxerga $\mathcal{E}$, um observador em outro sistema de referência inercial em movimento relativo vai enxergar B . Mas não vamos entrar em detalhes acerca deste assunto neste texto.

Como as Equações (16) e (17) descrevem fenômenos oscilatórios, suas soluções devem ser representadas por funções matemáticas oscilatórias no tempo e no espaço. Sem entrar nos detalhes da matemática, pode-se encontrar a forma das soluções com argumentos relativamente simples. Para facilitar, considere a onda ilustrada na Figura 4. A função que representa esta onda pode ser escrita como:

$$y(x') = y_{\text{máx}} \text{sen}(kx') \quad (18)$$

O símbolo $y_{m\acute{a}x}$ é o máximo valor para a função $y(x')$, denominado de amplitude da onda. x' representa qualquer ponto da onda. A constante k foi inserida dentro da função seno porque, por definição, esta não deve ter unidade física, uma vez que o seno corresponde à razão entre duas componentes de uma mesma grandeza. A constante k é conhecida na literatura como o número de propagação, e é definida considerando-se que a cada distância $\Delta x = \lambda$ a função volta a representar a mesma configuração física. Como isto ocorre a cada 2π radianos, pode-se definir $k\lambda = 2\pi$, de onde obtemos $k = 2\pi/\lambda$. Baseado neste resultado, k é interpretado como o número de comprimento de ondas que cabem dentro da distância 2π radianos.

A Equação (18) não está completa, pois ela ainda não representa uma onda se movendo para a direita, conforme indicado na Figura 5. Veja que a velocidade não está presente na equação. Mas ela pode ser interpretada como uma fotografia da onda em um determinado instante de tempo. Para um referencial S estático em relação à onda, a posição x de um ponto dela se encontra a uma distância $x = x' + vt$ da sua origem, após um instante de tempo t . Assim, do ponto de vista do referencial S' , que se move juntamente com a onda, esta mesma posição se encontra em $x' = x - vt$. Portanto, substituindo este valor de x' na Equação (18) temos:

$$y(x, t) = y_{m\acute{a}x} \text{sen}[k(x - vt)] = y_{m\acute{a}x} \text{sen}[kx - kvt] \quad (19)$$

A Equação (19) mostra que um observador no referencial S' observa um padrão periódico espacial, definido pela condição $k\lambda = 2\pi$. Do ponto de vista de um observador no referencial S em relação ao qual a onda se move, este verá um padrão periódico temporal, porquanto um ponto específico da onda se afasta dele para a direita. Após um intervalo de tempo $t = \tau$ a onda terá se deslocado do valor igual ao comprimento de onda λ . Como isto ocorre a cada 2π radianos, podemos definir $k v \tau = 2\pi$, de onde obtemos $(2\pi/\lambda_0) v \tau = 2\pi$ e $\tau = \lambda_0/v$. Daqui fica fácil ver que τ representa o tempo para um comprimento λ_0 passar por um ponto fixo no espaço, e por isso é denominado de período temporal, ou apenas período. A quantidade de comprimentos de onda que passam por este ponto fixo no intervalo de tempo τ é denominada de frequência temporal, definida por $f = 1/\tau$. Usando este resultado e a definição do período, $1/f = \lambda_0/v$, encontramos a equação para a velocidade da onda definida pela Equação (2): $v = \lambda_0 f$.

É comum encontrarmos na literatura a correlação entre o movimento retilíneo e uniforme de uma onda com o movimento circular e uniforme de uma partícula. Olhando para o movimento circular podemos definir a velocidade angular ou frequência angular, escrita na forma $\omega = 2\pi/\tau = kv = 2\pi f$, cuja unidade é rad/s . Com esta definição para a frequência angular, a Equação (19) pode ser escrita na forma mais familiar:

$$y(x, t) = y_{\text{máx}} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (20)$$

para ondas mecânicas, e

$$E(x, t) = E_{\text{máx}} \text{sen}(kx - \omega t) \text{ e } B(x, t) = B_{\text{máx}} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (21)$$

para ondas eletromagnéticas. Quando escritas neste formato as equações para os valores das grandezas da onda se tornam mais fáceis de serem analisadas. Agora fica fácil de ver porque k representa uma frequência espacial, enquanto ω representa uma frequência temporal.

2.3 O Fenômeno da Difração de Ondas

Nas seções anteriores fizemos uma descrição detalhada acerca das ondas, como forma de dar suporte ao tema principal deste Produto Educacional, que é o desenvolvimento de uma estratégia para ensinar o fenômeno da difração para estudantes de Ensino Médio. A motivação para este tema está na sua importância, tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico. A difração é de grande importância para a explicação de vários fenômenos da natureza. Como exemplo, temos as luzes coloridas que são observadas na superfície de um CD ou DVD quando iluminados com luz branca; o avermelhado na cor da atmosfera nos períodos do início da manhã e final do entardecer; a formação de sombras de contornos não nítidos; iluminação das áreas atrás de portas entreabertas etc. Além disso, a difração é de fundamental importância em muitas aplicações de grande relevância na tecnologia atual. Ela é utilizada na formação de imagens holográficas tridimensionais e na construção de equipamentos denominados espectrômetros, utilizados em dezenas de diferentes técnicas de laboratórios na indústria e centros de pesquisa.

É sabido que as principais metodologias disponíveis para a observação da natureza em pequena escala usam as ondas como sua principal ferramenta. E é exatamente por este motivo que o estudo da difração se torna tão importante neste cenário, pois ela tanto pode ser positiva, como no processo de separação de luzes com diferentes cores em um feixe policromático, quanto negativa, enquanto limitadora do tamanho da região a ser observada. A difração desempenha papel fundamental no poder de resolução de todos os instrumentos ópticos, como câmeras, binóculos, microscópios, telescópios, e até o próprio olho humano.

Técnicas que fazem uso de ondas eletromagnéticas, como a microscopia óptica na região do infravermelho, visível, ultravioleta, a difração de raios-x e raios-gama, assim como as técnicas que

usam as ondas sonoras, como os ultrassons em hospitais e indústrias, possuem suas aplicações limitadas pela difração das ondas.

Do ponto de vista conceitual, a difração está associada à mudança na direção de propagação das ondas quando elas encontram obstáculos em sua trajetória que bloqueiam apenas parte dela, ou permitem a passagem de apenas parte dela. Esse espalhamento observado tem origem nos fenômenos da interferência construtiva e destrutiva. Por esta razão, é conveniente o estudo da interferência antes do estudo da difração.

2.3.1 Interferência de Ondas

A interferência é um dos fenômenos ondulatórios mais intrigantes e de maior relevância, não apenas porque ele leva ao entendimento de vários outros fenômenos ondulatórios, mas porque ela é fundamental em muitas aplicações tecnológicas. Expressando de uma forma simples, a interferência diz respeito ao efeito da superposição de duas ou mais ondas no mesmo local do espaço e no mesmo instante de tempo. Quando se trata de partículas materiais estáveis, ao se adicionarem duas delas a um recipiente vazio tem-se no final duas partículas, sendo impossível uma anular a existência da outra. Esse resultado é tão óbvio que faz parte do sendo comum. Entretanto, o número de partículas é uma grandeza escalar positiva, de modo que a soma de várias parcelas sempre resulta em um valor maior do que qualquer uma das parcelas isoladas.

Quando se trata de grandezas vetoriais, como deslocamentos e campos eletromagnéticos, a realidade pode ser bem diferente. Entende-se como onda a propagação de perturbações em um sistema de partículas que interagem entre si ou em um campo eletromagnético. Nesse cenário, a superposição de duas ondas com amplitudes A_1 e A_2 no mesmo local do espaço resulta na observação de apenas uma única onda cuja amplitude pode variar de $A_1 - A_2$ a $A_1 + A_2$.

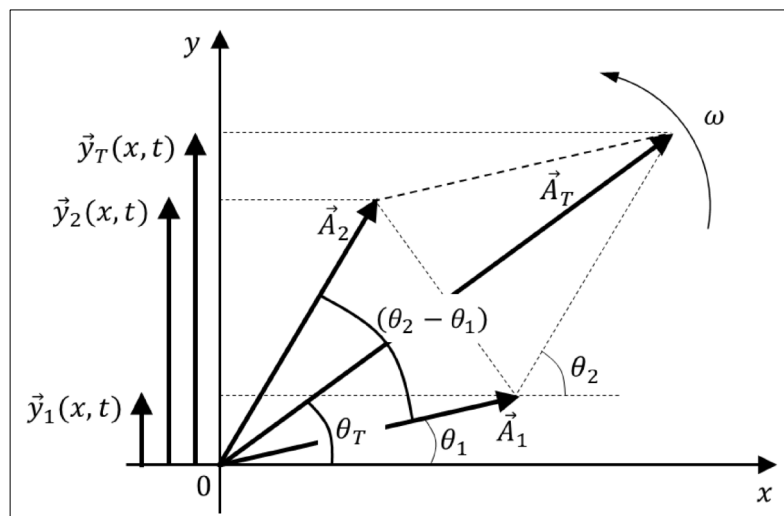
Do ponto de vista qualitativo, a superposição de duas ondas pode ser facilmente entendida geometricamente. A Figura 8 ilustra dois vetores $\vec{A}_1$ e $\vec{A}_2$ e suas projeções sobre o eixo y , $\vec{y}_1$ e $\vec{y}_2$. Os valores absolutos dos vetores $\vec{A}_1$ e $\vec{A}_2$ representam as amplitudes das duas ondas. Estes vetores não estão fixos, mas giram no sentido anti-horário, ambos com a mesma velocidade ω . No momento observado ($t = 0$), os vetores formam ângulos θ_1 e θ_2 em relação ao eixo x , de modo que o ângulo entre eles é $\theta_2 - \theta_1$ constante. Usando a regra do paralelogramo, encontramos diretamente:

$$A_T^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (22)$$

Em geral, em vez de descrever uma onda pela sua amplitude, como na Equação (22), é mais útil descrevê-la em função de sua intensidade I , que representa a quantidade de energia por unidade de área e tempo, ou seja, é a potência por unidade da área atingida pela onda. Por definição, a intensidade é descrita como o quadrado da amplitude da onda, $I = A^2$. Assim, a Equação (22) se pode ser escrita na forma:

$$I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (23)$$

Figura 8 – Ilustração para a soma de dois vetores girando com velocidades constantes.



Fonte: Próprio autor.

A soma dos dois efeitos tem a intensidade I_1 que se obteria com apenas um deles, mais a intensidade I_2 que se teria com apenas o outro, mais um termo de correção, proporcional a $\sqrt{I_1 I_2}$. Essa correção é chamada de interferência. Este termo é denominado interferência quer ele seja positivo ou negativo, diferentemente da conotação deste termo no cotidiano. Se o termo de interferência é positivo ($\theta_2 - \theta_1 < \pi/2$) ele é denominado interferência construtiva. É o que ocorre quando duas ondas se reforçam numa região do espaço. O caso oposto é denominado de interferência destrutiva ($\theta_2 - \theta_1 > \pi/2$), que ocorre quando uma onda anula parcialmente o efeito causada pela outra. No cenário em que $\theta_2 = \theta_1$, $\cos(\theta_2 - \theta_1) = 1$, as ondas estão em fase e a interferência será a máxima possível e $I_T = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$. Quando $\cos(\theta_2 - \theta_1) = -1$, as ondas estão totalmente fora de fase, e a interferência será mínima e $I_T = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$.

Um caso particular de grande importância ocorre quando as duas ondas possuem a mesma amplitude ($A_1 = A_2 = A$). Os ângulos entre os vetores $\vec{A}_T, \vec{A}_1$ e $\vec{A}_2$ da Figura 8 são iguais a $(\theta_2 - \theta_1)/2$. Assim, a amplitude total equivale à soma das duas projeções dos vetores $\vec{A}_1$ e $\vec{A}_2$ na direção do vetor $\vec{A}_T$. Tomando apenas o módulo da soma, temos:

$$A_T = 2A \cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) \quad (24)$$

Considerando as amplitudes das duas ondas iguais ($I_1 = I_2 = I_0$), a equação (23) pode ser reescrita na forma:

$$I_T = 2I_0[1 + \cos(\theta_2 - \theta_1)] = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) \quad (25)$$

Observe que a Equação (25) é equivalente ao quadrado da Equação (24). Uma análise direta mostra que apenas a fase relativa $(\theta_2 - \theta_1)$ entre as ondas é determinante para a amplitude ou intensidade da onda resultante. Quando as ondas estão em fase ($\theta_2 = \theta_1$) a onda resultante tem a maior amplitude possível, igual a $2A$, o que equivale a uma intensidade quatro vezes maior, $I_T = 4I_0$. Tomando o valor médio da Equação (25) sobre todas as diferenças de fase $(\theta_2 - \theta_1)$ possíveis o resultado é $I_T = 4I_0 \times \frac{1}{2} = 2I_0$, como era esperado. A energia total contida nas duas ondas originais não é alterada pelo efeito da interferência, mas apenas a sua redistribuição no espaço. Esse é um resultado bastante interessante, e será explorado na demonstração do aplicativo sobre interferência e difração.

Quando a diferença entre as fases for de 180° ($\theta_2 = \theta_1 + 180^\circ$) a intensidade resultante será nula. Isto significa que a interferência é totalmente destrutiva, e o resultado é equivalente ao de não ter ondas presentes. Quando se trata de uma superposição de dois feixes luminosos de mesma intensidade, incidindo os dois numa tela pode resultar em completa escuridão, ou seja, um feixe de luz anula completamente o efeito causado pelo outro sobre o observador. Este comportamento é muito diferente do que se espera para partículas.

A Equação (24) não apresenta uma descrição completa da superposição, pois ela contém apenas a amplitude da onda resultante. Para achar o termo oscilante no tempo usamos o método algébrico. Para facilitar os cálculos, considere duas ondas com mesma amplitude, mesma frequência angular, se movendo no mesmo sentido positivo do eixo x , e defasadas no espaço por um valor Δx ($\theta_2 - \theta_1 \equiv k\Delta x$):

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \text{ e } y_2(x, t) = A \sin(k(x + \Delta x) - \omega t) \quad (26)$$

A operação de soma algébrica é direta:

$$y_T(x, t) = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \varphi - \omega t) \quad (27)$$

Usando a relação trigonométrica $\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{1}{2}(A + B) \cos \frac{1}{2}(A - B)$ e fazendo os cálculos necessários, encontramos:

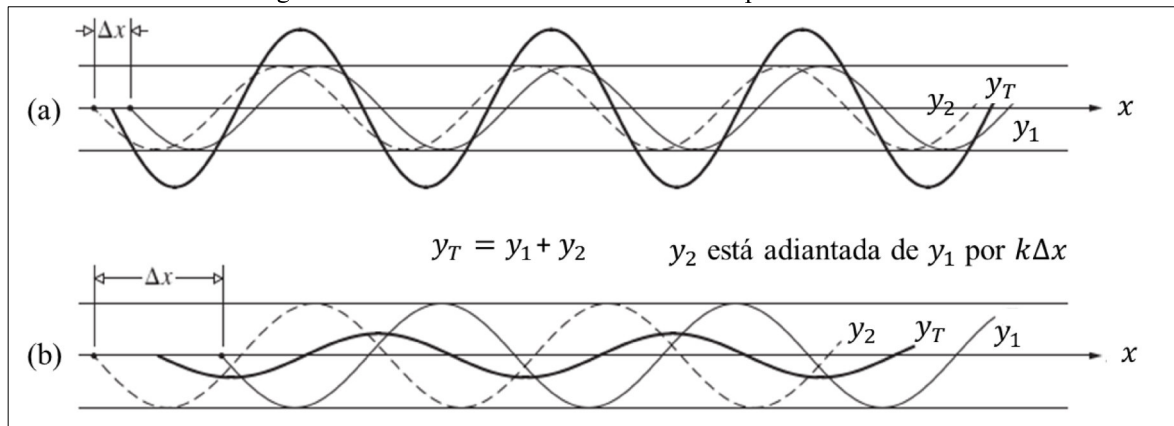
$$y_T(x, t) = \left\{ 2A \cos \left(\frac{k\Delta x}{2} \right) \right\} \sin \left[(kx - \omega t) + \frac{k\Delta x}{2} \right] \quad (28)$$

e a intensidade da onda resultante em qualquer posição x e instante de tempo t dada por:

$$I_T(x, t) = \left\{ 4I_0 \cos^2 \left(\frac{k\Delta x}{2} \right) \right\} \sin^2 \left[(kx - \omega t) + \frac{k\Delta x}{2} \right] \quad (29)$$

A Equação (29) descreve completamente a onda resultante da superposição, e mostra que ela possui a mesma frequência das ondas originárias, mas tem fase diferente por uma quantidade $k\Delta x/2$. O termo entre chaves é a intensidade da onda resultante, conforme demonstrado pela Equação (25). Ele também depende da diferença de caminho Δx , um parâmetro facilmente controlado quando se quer produzir ondas com maior ou menor intensidade em aplicações tecnológicas. Além disso, o modelo é adequado para descobrir a defasagem de ondas, a partir da intensidade da onda resultante, em muitos processos físicos. Como $k = 2\pi/\lambda$, do argumento da função cosseno temos $k\Delta x/2 = \pi\Delta x/\lambda$. Para $\Delta x \ll \lambda$, a amplitude resultante é aproximadamente igual a $2A$; se $\Delta x = 0, \pm\lambda, \pm2\lambda, \pm3\lambda, \dots$, a amplitude terá valor absoluto igual a $2A$ e a interferência é construtiva. Para $\Delta x = \pm\lambda/2, \pm3\lambda/2, \pm5\lambda/2, \dots$, a amplitude é zero e a interferência será destrutiva. Este fato será melhor discutido adiante.

A Figura 9 é uma representação das Equações (30) e (32) ao longo do eixo x . Ela ilustra como a fase relativa entre as ondas $k\Delta x$ controla o comportamento da onda resultante. Compatível com a descrição do texto acima, para $\Delta x \ll \lambda$ a interferência é construtiva (maior amplitude), enquanto que para distâncias $\Delta x \approx \lambda/2$ a interferência se torna destrutiva (menor amplitude).

Figura 9 – Interferência de ondas fora de fase por $k\Delta x$ radianos.

Fonte: Eugene Hetch.

Todos os resultados discutidos nesta seção foram feitos considerando que os dois vetores da Figura 8 giram com a mesma velocidade angular ω . Em outras palavras, a diferença de fase $\theta_2 - \theta_1 \equiv k\Delta x$ entre as duas ondas permanece constante com o tempo. Quando este é o caso, dizemos que as ondas são coerentes. Isso ocorre com fontes de luz monocromática, ou com luz do tipo laser. A consequência disso é que o padrão de interferência permanece por um tempo muito longo a ponto de parecer infinito à percepção humana, sendo facilmente observado. Entretanto, muitas fontes emitem ondas cujas diferenças de fases mudam rapidamente com o tempo; assim, o termo $k\Delta x$ oscila muito rápido.

Para fontes de luz comuns, como lâmpadas, chamas, ou mesmo a luz do Sol, o tempo de coerência é de apenas $10^{-8}s$ (10 ns). Quando observadas em instantes superiores estes as ondas já estão defasadas (incoerentes), e a interferência não pode ser mais observada diretamente com o olho humano, mas apenas com equipamentos muito rápidos. Matematicamente, isso pode ser entendido a partir da equação (23) da seguinte forma. Quando todas as ondas possuem o mesmo valor de $\theta_2 - \theta_1$, o valor médio do termo $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta_2 - \theta_1)$ é igual a ele próprio e, portanto, diferente de zero. Mas quando o termo $(\theta_2 - \theta_1)$ é diferente para cada par de ondas, podendo variar de 0 a 360° , o valor médio de $\cos(\theta_2 - \theta_1)$ passa a ser nulo. Nesse caso, apenas os termos $I_1 + I_2$ permanecem não nulos. Essa é a razão porque não se vê manchas claras e escuras nas paredes de uma sala quando uma lâmpada é acesa no seu teto, mas sim uma iluminação uniforme em todo o ambiente.

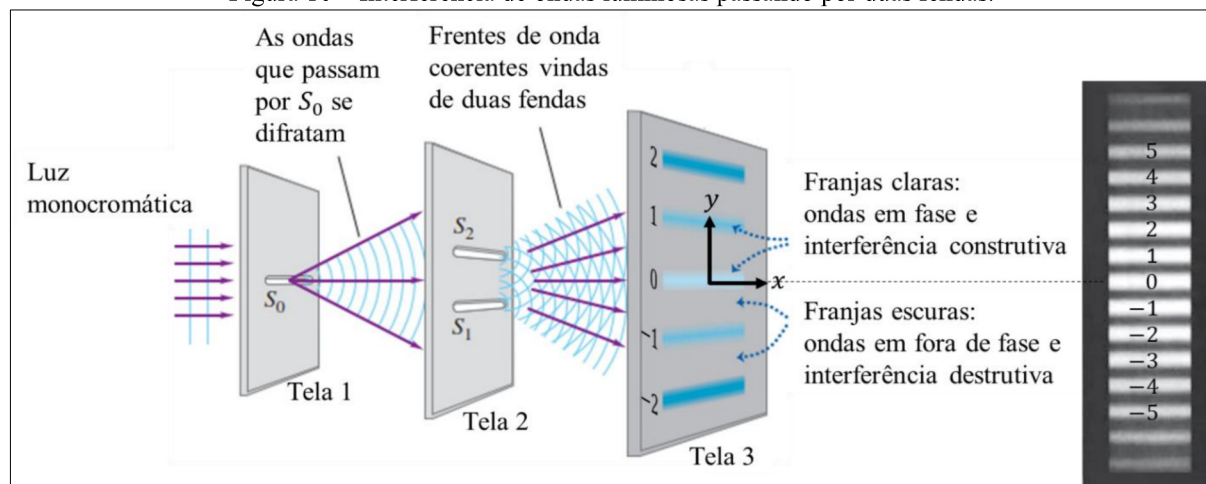
A análise da interferência feita até aqui se concentrou no efeito da superposição de duas ondas que se supôs coerentes. Quando se trata de ondas mecânicas, como ondas na água ou ondas sonoras, é fácil produzir ondas coerentes, pois as dimensões das fontes podem ser muito menores do que os comprimentos de onda destas. No entanto, quando se trata de ondas eletromagnéticas a situação é bem diferente. Nas fontes de luz comuns, os átomos ganham um excesso de energia por causa da

agitação térmica e também do impacto com elétrons acelerados. Uma vez energizado estes átomos começam a irradiar energia até perdê-la completamente, em geral em um intervalo de tempo da ordem de $10^{-8}s$. Esse é o tempo de coerência mencionado no parágrafo anterior. Os muitos átomos existentes em uma fonte macroscópica irradiam de modo não sincronizado, e as fases relativas $\theta_2 - \theta_1$ não são mais constantes.

Entretanto, a luz proveniente de uma única fonte macroscópica pode ser dividida de modo que suas partes sejam emergentes de duas ou mais regiões do espaço, formando duas ou mais fontes secundárias. Com isso, qualquer variação de fase da fonte afeta igualmente essas fontes secundárias e isso não altera suas fases relativas. Esse princípio deu origem a uma das experiências mais importantes da história da ciência, haja vista ter sido por intermédio dela que a luz passou a ser considerada uma onda. Trata-se da experiência da dupla fenda, realizada pelo físico inglês Thomas Young nos primeiros anos de 1800.

A Figura 10 ilustra o famoso experimento da dupla fenda. Uma frente de ondas planas monocromáticas atinge a primeira tela contendo uma abertura (ou fenda) estreita, S_0 . Devido à pequenez da fenda, a luz que emerge dela se origina de apenas uma pequena região da fonte. Portanto, a fenda S_0 se comporta quase como se fosse uma fonte ideal ou pontual. Conforme será explicado na próxima seção, frentes das ondas se espalham (difratam) e atingem a segunda tela, contendo duas aberturas também estreitas, S_1 e S_2 . As frentes de ondas que chegam a essas aberturas estão em fase porque percorrem as mesmas distâncias de S_0 . As ondas que emergem delas também estão em fase, de modo que S_1 e S_2 são fontes coerentes. Se houver alguma alteração na fase da luz emitida pela fonte antes da Tela 1, esta manifestará igualmente nestas duas ondas emergentes da Tela 2, de modo que mesmo assim as ondas emergentes permanecem coerentes. As experiências modernas usam lasers, dispositivos que produzem luz monocromática e coerente, em substituição à fenda S_0 .

Figura 10 – Interferência de ondas luminosas passando por duas fendas.



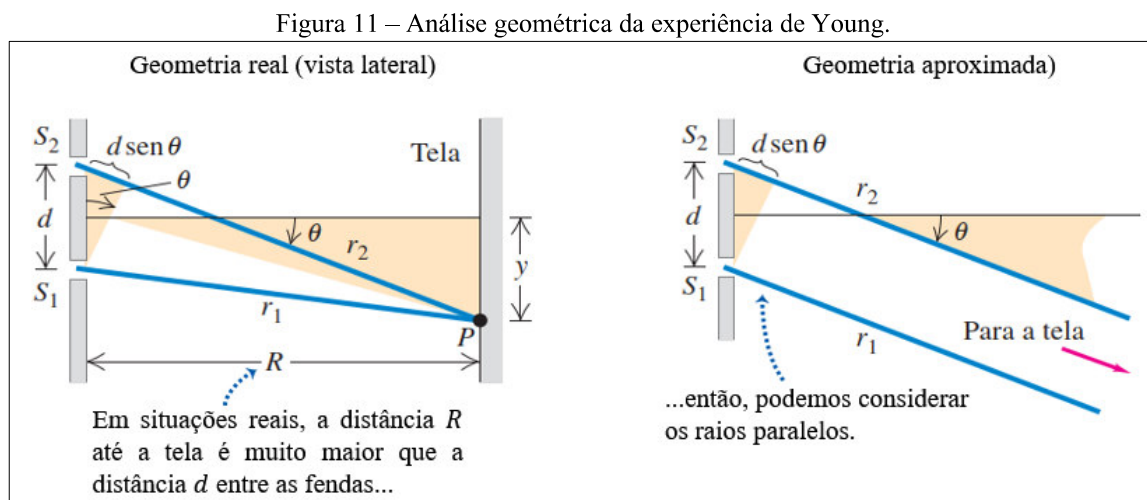
Fonte: Sears/Zemanski,

As duas ondas emergentes das aberturas S_1 e S_2 na Tela 2 difratam e se superpõem, produzindo um padrão de máximos e mínimos (interferência). Entretanto, este efeito só pode ser visualizado se houver uma tela sobre a qual as ondas incidam e sejam refletidas (Tela 3). A tela será mais fortemente iluminada nas regiões onde as ondas provenientes das fendas interferem construtivamente, representadas pelos números $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, denominados ordem de difração; por outro lado, a tela será mais escura nos pontos onde a interferência é destrutiva. À direita da figura está mostrada uma fotografia com um padrão de interferência na qual se vê, nitidamente, faixas claras e escuras.

Na Figura 11 (esquerda), a tela de projeção está relativamente próxima às fendas, de modo que os raios que conectam as duas fendas a um ponto da tela não podem ser considerados paralelos. Essa situação é conhecida como difração de campo próximo ou difração de Fresnel. Na Figura 11 (direita) a tela de projeção está longe o suficiente para que os dois raios sejam considerados paralelos, e esse cenário é conhecido como difração de Fraunhofer. As discussões feitas aqui serão restritas ao caso da difração de Fraunhofer, em geral mais fácil de analisar detalhadamente que a difração de Fresnel. Com essas ponderações, para simplificar a análise matemática da experiência de Young, considere a geometria ilustrada na Figura 11, na qual a distância R entre o plano das fendas e a tela de projeção é muito maior que a distância d entre as fendas. Com essa aproximação, as linhas que ligam as fendas ao ponto P são aproximadamente paralelas, como indica a figura à direita. Portanto, a diferença de caminho é dada por:

$$r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (30)$$

sendo r_1 e r_2 as distâncias entre as fendas e o ponto de superposição das ondas na tela; θ é o ângulo de inclinação das frentes de onda.



Fonte: Sears/Zemanski.

Conforme já foi dito, a interferência construtiva ocorre nos pontos da tela em que a diferença de caminho das duas frentes de onda é igual a um número inteiro de comprimentos de onda, $m\lambda$, onde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Portanto, as regiões brilhantes sobre a tela ocorrem para os ângulos θ que satisfazem a relação:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (31)$$

Do mesmo modo, a interferência destrutiva, com a formação de regiões escuras sobre a tela, ocorre nos pontos em que a diferença de caminho é igual a um número semi-inteiro de comprimentos de onda, $(m + \lambda/2, \dots)$. Assim,

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (32)$$

As Equações (31) e (32) mostram os critérios para se ter interferência construtiva e destrutiva. Mas elas não mostram em que local da tela isso ocorre. A dedução de uma expressão para localizar as posições dos centros das franjas brilhantes é bem simples. Na Figura 10 a distância vertical das franjas y é medida a partir do centro da figura de interferência, que corresponde à projeção da fenda S_0 sobre a Tela 3. Seja y_m a distância a partir do centro da figura de interferência ($\theta = 0$) até o centro da franja brilhante de ordem m . Seja θ_m valor correspondente de θ para este y . Então,

$$y_m = R \tan \theta_m \quad (33)$$

Para o caso particular em que $y_m \ll R$, θ_m é muito pequeno e $\tan \theta_m \approx \sin \theta_m$. A Equação (33) pode ser reescrita como:

$$y_m = R \sin \theta_m \quad (34)$$

Combinando as Equações (31) e (34) encontramos a expressão que mostra a posição das franjas claras:

$$y_m = R \frac{m}{d} \lambda, m = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (35)$$

Este resultado mostra que os centros das franjas claras aparecem a distâncias $y_1 = R\lambda/d$, $y_2 = 2R\lambda/d$, $y_3 = 3R\lambda/d$, ..., a partir da região central entre as fendas ($m = 0$), onde se localiza uma franja clara também. Lembre-se que o ponto central da tela de projeção se encontra à mesma distância das fendas. Neste tipo de experimento os valores de R , d e y_m são facilmente medidos. Portanto, temos por meio dele o comprimento de onda λ da luz. A experiência de Young foi a primeira medida direta do comprimento de onda da luz. Por outro lado, se conhecemos o comprimento de onda da luz podemos determinar a distância d entre as fendas. Por fim, controlando-se os valores de R e d podemos escolher em que região do espaço a interferência será construtiva ou não. Observe que a distância entre duas franjas brilhantes adjacentes na figura de interferência ($\Delta y = y_{m+1} - y_m = R\lambda/d$) é inversamente proporcional à distância d entre as fendas. Quanto mais próximas as duas fendas estão, maior é o espaçamento entre as franjas na tela iluminada. Quando a distância entre as fendas é muito grande as franjas ficam muito próximas, e será observada apenas uma distribuição uniforme de intensidade.

2.3.2 A Difração à Luz do Princípio de Huygens-Fresnel

Uma vez que os principais conceitos básicos relativos às ondas e ao fenômeno da interferência já foram apresentados, faremos agora uma breve discussão sobre os aspectos físicos da difração, evidenciando como este conceito pode ser usado para explicar vários fenômenos observados na natureza e como ele pode ser usado em aplicações tecnológicas. A difração pode ser imaginada como sendo o fenômeno da interferência de uma grande quantidade de ondas, e que se manifesta apenas quando as ondas viajantes encontram um obstáculo que impede parcialmente a sua passagem. Este fenômeno foi originalmente estudado pelo padre jesuíta Francesco Maria Grimaldi, na década de 1650, sendo o primeiro a denominá-lo difração. Por meio de seus estudos, Grimaldi demonstrou que o efeito da difração da luz não podia ser conciliado com a versão de que esta fosse formada de partículas que se moviam em linha reta. Esta foi uma das primeiras indicações de que a luz era uma onda.

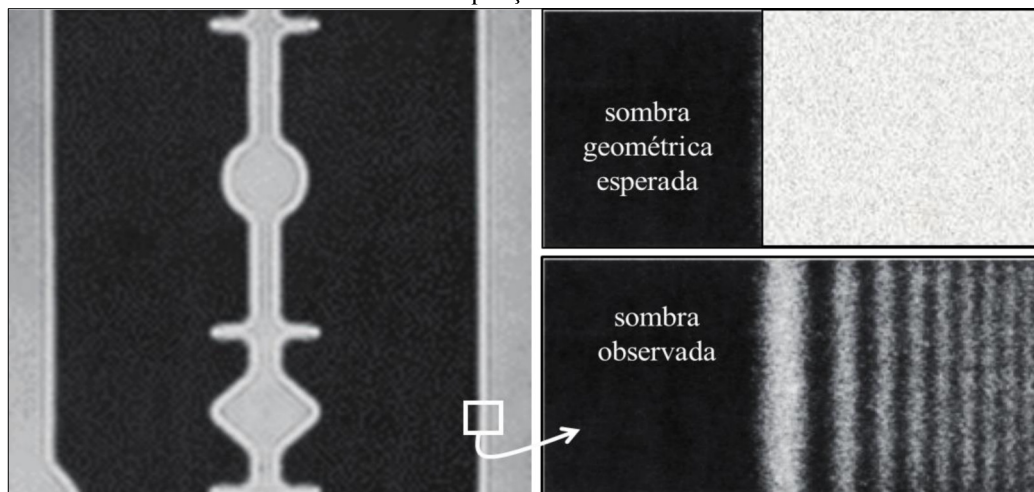
O fenômeno da difração está presente no cotidiano e muitas vezes as pessoas não se dão conta dele. O som da sirene de uma ambulância que se encontra em uma rua fora do alcance da visão é ouvido essencialmente por causa da difração do som em casas, carros, árvores etc. Do mesmo modo, quando duas pessoas conversam de costas uma para a outra, elas se ouvem por causa da difração do som. Uma pessoa atenta, observará que as sombras dos objetos nunca têm contornos bem definidos, pelo contrário, a quantidade de luz aumenta gradativamente à medida que se sai da sombra em direção

à claridade. Estes efeitos, quando devidamente entendidos, podem ser reproduzidos intencionalmente para a construção de dispositivos de grande importância para a tecnologia atual.

A Figura 12 mostra a fotografia de uma lâmina de barbear, iluminada com luz monocromática a partir de uma pequena abertura para que se obtivesse uma fonte pontual. Percebe-se que a imagem não possui contornos bem definidos, mesmo quando observada de longe. A Figura inserida à direita é uma fotografia ampliada dos limites da sombra. Quando vista de perto, fica claro que a sombra apresenta um padrão de máximos e mínimos, característico da difração (interferência).

Em geral, na vida cotidiana não se observa difração nas sombras dos objetos. A razão desta ausência provém do fato de que as fontes de luz não são monocromáticas nem puntiformes. Se na fotografia da Figura 12 tivesse sido usada luz branca, proveniente de uma lâmpada fluorescente, como exemplo, comprimentos de onda diferentes provenientes da luz de diferentes pontos da lâmpada produziram suas próprias difrações, e a superposição destas anulava o efeito global.

Figura 12 – Fotografia de uma lâmina de barbear (esquerda) mostrando a difração nos seus contornos. À direita está mostrada uma ampliação da borda da sombra.



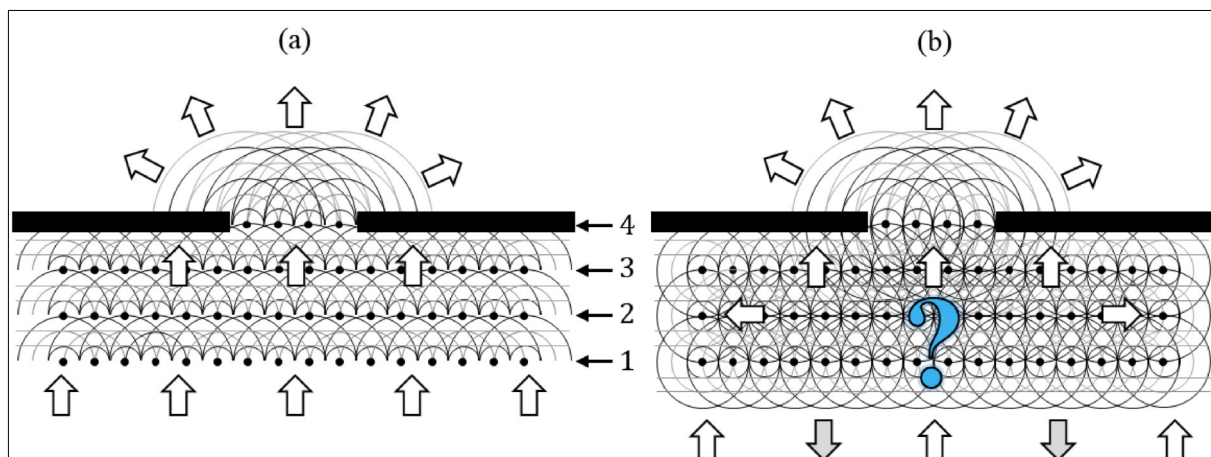
Fonte: Sears/Zemanski.

A interferência observada na borda da sombra da Figura 12 pode ser explicada evocando-se o denominado princípio de Huygens, segundo o qual cada ponto não obstruído de uma frente de onda (plana ou não) atua como se fosse uma fonte de ondas esféricas secundárias. Dizendo de outra forma, cada ponto do espaço alcançado por uma onda age como se fosse uma fonte luminosa pontual que emite luz em todas as direções, na mesma frequência da onda que o atinge. Embora muito utilizado na literatura para explicar a difração, este princípio apresenta sérias limitações, sendo incorporado à explicação como uma espécie de postulado, ou seja, uma conjectura sem explicações fundamentais, a não ser a de que se adequa à observação experimental.

A Figura 13 ilustra uma onda plana se deslocando na direção vertical, de baixo para cima, conforme indicado pelas setas grandes. Os pequenos pontinhos representam fontes de ondas esféricas, ou seja, fontes pontuais. A primeira limitação do princípio de Huygens está no fato de que ele só leva em consideração a envoltória (superposição) das frentes de ondas, provenientes das infinitas fontes pontuais (destacadas na Figura 13a pelas linhas numeradas 1, 2 e 3), que se propaga na direção da onda original (diretamente para cima), não levando em conta o que acontece com o restante das frentes de ondas que se propagam nas outras direções do espaço, inclusive na direção oposta à da onda original, conforme ilustrado na Figura 13b.

Baseado na ideia de Huygens, não é possível explicar por que após a fenda a envoltória das infinitas ondas não viaja mais apenas na direção da onda original, mas se espalha em todas as direções, conforme ilustrado na parte superior da Figura 14. Em outras palavras, o princípio não explica porque as ondas se difratam. Além disso, o princípio de Huygens não leva em conta o comprimento de onda das ondas. Isto significa que o padrão das frentes de ondas é o mesmo para todos os tipos de ondas. Mas não é isso o que se observa na natureza. O som da buzina de um carro se difrata facilmente em uma árvore entre o carro e uma pessoa, não projetando nesta a sua “sombra”. Entretanto, a luz proveniente dos faróis possui um padrão de frentes de onda diferente, e a sombra da árvore é projetada na pessoa.

Figura 13 – Ilustração para o princípio de Huygens.



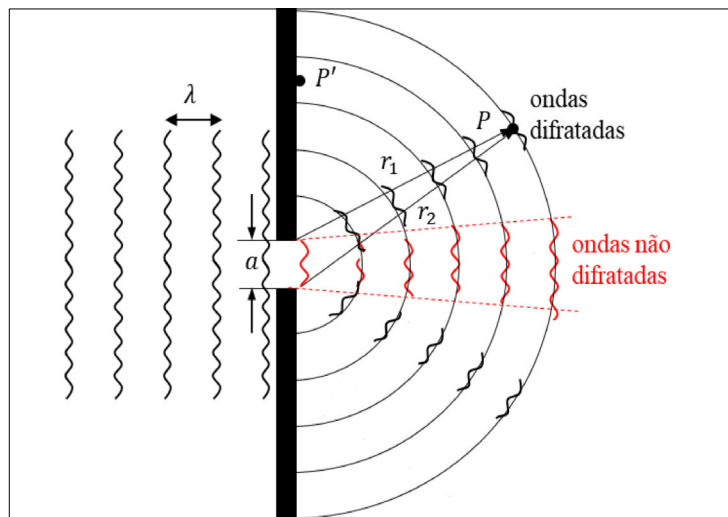
Fonte: Próprio Autor.

Estas dificuldades foram superadas parcialmente por Augustin-Jean Fresnel, na década de 1830, com a adição do efeito de interferência, conceito desenvolvido por Thomas Young durante suas famosas experiências nos primeiros anos de 1800. Um dos grandes achados de Fresnel foi demonstrar matematicamente que a soma de duas funções senoidais de mesma frequência e fases diferentes tem efeito semelhante ao de somar duas forças em diferentes direções. Neste sentido, Fresnel mostrou que

duas ondas de mesma amplitude e frequência, defasadas de 180 graus no mesmo local do espaço, é fisicamente equivalente a não ter nenhuma onda presente, assim como ter duas forças de mesmo valor e sentidos contrários atuando sobre uma partícula resulta no mesmo efeito de não ter nenhuma força presente.

Com o auxílio do princípio Huygens-Fresnel podemos fornecer uma explicação qualitativa para o fenômeno da difração. A Figura 14 ilustra uma versão simplificada uma onda plana que atravessa a fenda de diâmetro a em uma tela e é difratada. Apenas a envoltória das frentes de ondas é mostrada. Considere uma envoltória que atinge o ponto P . A diferença entre os caminhos ópticos, descritos pelos raios r_1 e r_2 que partem das bordas da fenda, é dado por $\delta = |r_2 - r_1|$. Se cada ponto não obstruído da onda atua como uma fonte coerente de novas ondas, a maior valor para δ ocorre quando as fontes se encontram exatamente sobre as bordas da fenda, como mostrado na figura. Para este caso temos $\delta_{\text{máx}} \leq a$.

Figura 14 – Ilustração para a difração usando o princípio de Huygens-Fresnel.



Fonte: Próprio Autor.

No caso particular em que o ponto P está em qualquer local sobre a tela, ilustrado pelo ponto P' , tem-se $\delta_{\text{máx}} = a$. Se $\lambda > a$, então $\lambda > \delta_{\text{máx}}$, e como as ondas partem em fase da abertura, elas vão se interferir construtivamente, independentemente de onde esteja o ponto P . Portanto, se o comprimento de onda da onda é muito maior do que o tamanho da abertura da fenda, as frentes de onda se espalharão para todas as regiões (grandes ângulos) após a fenda. Por outro lado, se o comprimento de onda da onda for muito menor do que a abertura da fenda, as ondas não se difratam, e continuam sua trajetória sem desvio, conforme indicado na parte central da Figura 14. Para um dado comprimento de onda, quando menor a abertura, mais circular se torna a onda difratada. Dito de outra

forma, o princípio de Huygens-Fresnel mostra que a difração é uma manifestação da interferência construtiva. Este resultado está em pleno acordo com a Equação (29) e as discussões que se seguiram à esta.

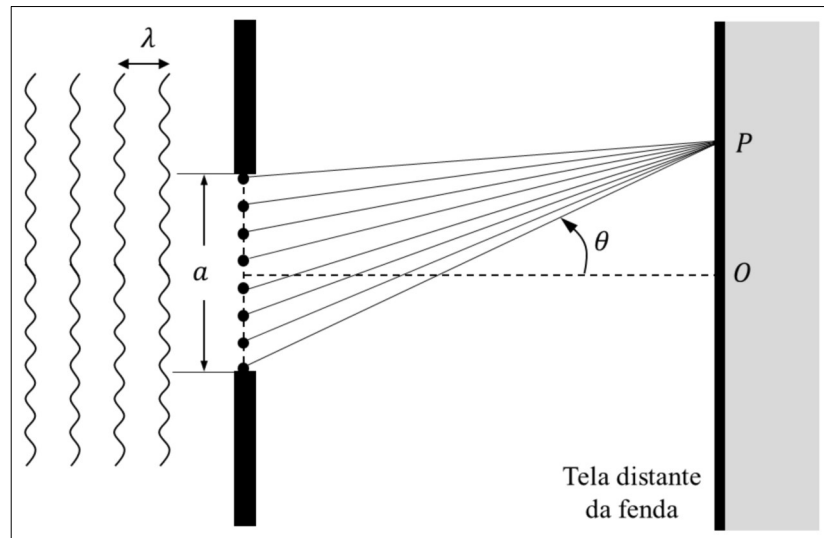
2.3.3 Intensidade das Ondas Difractadas

Na seção 2.3.1 discutimos como as ondas se superpõem em um ponto P do espaço sem, contudo, levar em conta de onde estas ondas vieram, ou qual a distribuição espacial resultante no entorno de P . A Equação (29) mostra apenas as características da onda resultante da superposição de duas ondas que chegaram ao ponto P atrasadas por um intervalo de tempo equivalente a $\Delta t = \Delta x/c$, conforme mostrado na Figura 9. Mas a análise da difração requer que se conheça os detalhes da distribuição espacial da intensidade resultante em todas as regiões em volta do ponto P . Uma descrição qualitativa desta distribuição foi feita na seção 2.3.2, culminando com os comentários da Figura 14. Na presente seção, a distribuição de intensidades será demonstrada de forma quantitativa usando uma ferramenta matemática simples, porém muito poderosa.

O método mais simples para se deduzir uma expressão para a distribuição da intensidade na difração produzida por uma fenda única é o da soma de vetores. Como esses vetores representam ondas, eles são chamados de fasores. Um fasor é um vetor cujo comprimento representa a amplitude da onda, e cuja direção, em relação a uma direção escolhida, representa o ângulo de fase da onda. Na representação de fasores, quando a amplitude da onda varia no tempo, sua variação pode ser expressa pela rotação do fasor. Os fasores já foram usados na Figura 8 para demonstrar a intensidade total da superposição, resumida na Equação (29).

A Figura 15 ilustra uma onda plana que se desloca para a direita e encontra uma fenda com abertura a . Evocando o princípio de Huygens-Fresnel, considere que a frente de onda plana possa ser representada por 8 fontes pontuais, alinhadas com a fenda (representadas pelos pontos dentro da fenda). Elas emitem ondas secundárias que se superpõem sobre toda a tela, que se encontra a grande distância da fenda, para satisfazer o critério de Fraunhofer. Para fins de demonstração, considere as frentes de ondas (representadas pelas linhas) que se dirigem para o ponto P . Embora não pareça claro na figura, como a tela está muito distante da fenda, todos os ângulos θ_i entre as frentes de onda e a linha tracejada (referência no centro da fenda) são considerados iguais a θ . O objetivo é encontrar um padrão para a distribuição da intensidade das ondas superpostas na tela em função dos parâmetros geométricos a , λ e θ mostrados na Figura 15, já que todo são facilmente obtidos experimentalmente.

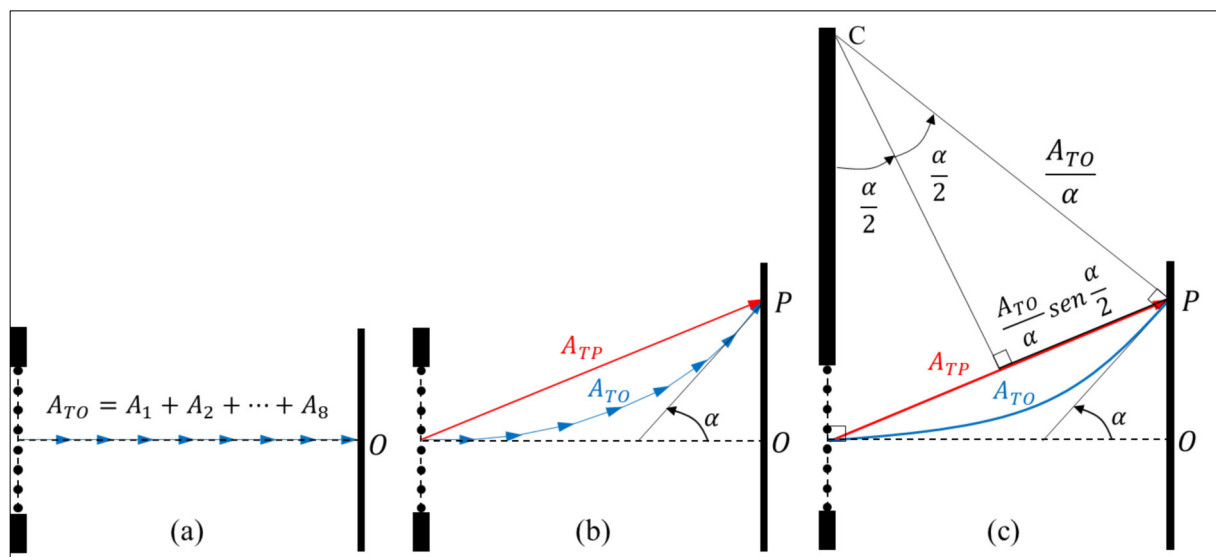
Figura 15 – Ilustração para a difração no limite de Fraunhofer.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 16 ilustra o que ocorre com as ondas da Figura 15, do ponto de vista de fasores. Agora, em vez de linhas, cada onda é representada por um fasor de magnitude A_i e ângulo de fase α_i . O módulo da soma vetorial dos fasores em cada ponto da tela é A_T . Quando se observa o ponto O da tela (Figura 16a), a soma das amplitudes das ondas é $A_{TO} = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_8$. Como o ponto O é simétrico em relação ao centro da fenda, todos os fasores estão em fase (possuem a mesma direção e o mesmo sentido). Observando-se o ponto P da tela (Figura 16b), a amplitude das ondas que chegam a este ponto da tela é A_{TP} . Como P não é simétrico em relação à fenda, os fasores que chegam a ele estão defasados por um ângulo α em razão das diferentes distâncias às fontes.

Figura 16 – Ilustração para a soma de fasores.



Fonte: Próprio Autor.

A soma vetorial dos fasores é indicada pelo perímetro de um setor circular poligonal de 8 lados, associados às 8 fontes. A amplitude A_{TP} é dada pelo comprimento da reta que une as extremidades do setor poligonal. Baseado no princípio de Huygens-Fresnel, temos de fato muitas ondas (conceitualmente infinitas delas) dentro da fenda e isso está ilustrado na Figura 16c. Neste limite, a linha poligonal de fasores transforma-se em um arco de circunferência, cujo comprimento é igual a A_{TO} . Traçando-se perpendiculares às extremidades do arco encontramos o centro de curvatura, C. Da definição de setor circular, $s = R\theta$, encontramos o raio do círculo, $R = A_{TO}/\alpha$. Associando a amplitude das ondas superpostas ao comprimento A_{TP} , da Figura 16c, temos:

$$A_{TP} = A_{TO} \frac{\text{sen}(\alpha/2)}{\alpha/2} \quad (36)$$

A Equação (36) fornece a amplitude das ondas superpostas em todos pontos da tela. Lembrando que a intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado de sua amplitude, a equação acima se torna:

$$I(\alpha) = I_0 \left[\frac{\text{sen}(\alpha/2)}{\alpha/2} \right]^2 \quad (37)$$

onde $I(\alpha) = A_{TP}^2$ e $I_0 = A_{TO}^2$.

A Equação (37) não é muito útil do ponto de vista prático porque o ângulo α não faz parte dos parâmetros do aparato experimental (Figura 15). Entretanto, pode-se reescrevê-la facilmente em função de a, λ e θ . Adaptando o resultado da Equação 29 para o contexto da Figura 15, a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas é $r_2 - r_1 \equiv \Delta x = a \text{sen} \theta$. Por outro lado, a diferença de fase pode ser escrita como $\theta_2 - \theta_1 \equiv \alpha = k \Delta x$. Daqui,

$$\alpha = k a \text{sen} \theta = \frac{2\pi}{\lambda} a \text{sen} \theta \quad (38)$$

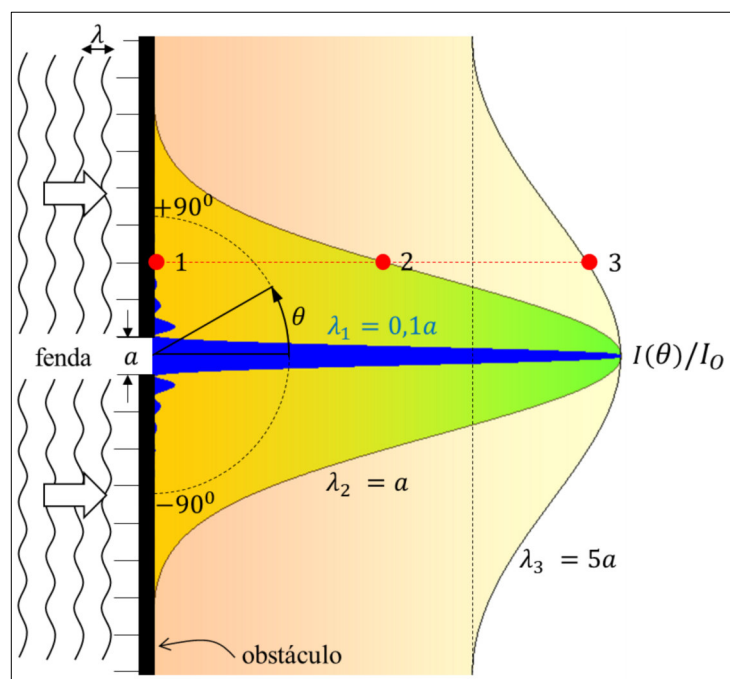
Substituindo este último resultado na Equação (37), temos o resultado desejado:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a (\text{sen} \theta)/\lambda]}{\pi a (\text{sen} \theta)/\lambda} \right]^2 \quad (39)$$

Existem três maneiras de apresentar o conteúdo discutido até aqui sobre a intensidade da onda difratada a um grupo de estudantes do Ensino Médio. A primeira e mais abstrata é por meio da Equação (39). Apenas observando essa equação é muito difícil um estudante ter noção clara sobre como a energia transportada por uma onda que atravessa a fenda se distribui no espaço após a fenda. Mas é precisamente o que mostra essa equação. A segunda maneira é por meio do desenho da função $I(\theta)$ para diferentes direções θ após a fenda, mantendo o comprimento de onda λ e a largura a da fenda constantes. A terceira forma é a partir de simulações computacionais, conforme será discutido na seção 2.4.

A Figura 17 representa três formas diferentes de expressar a Equação (39). Ela fornece o padrão da intensidade normalizada da onda na região após a fenda. Inicialmente, ondas planas se movem da esquerda para a direita, conforme indicado na figura. Para descrever a primeira forma, considere que a estas ondas tenham comprimento de onda $\lambda_1 = a/10$, ou seja, um comprimento de onda muito menor do que a abertura da fenda. Neste caso, a Equação (39) mostra que as frentes de onda que atravessam a fenda não se espalham muito (difratam), e essencialmente seguem seu sentido normal de propagação.

Figura 17 – Distribuição de intensidade para ondas difratadas.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 14 essa ideia foi representada desenhando as ondas diretamente no alinhamento da fenda. Aqui temos a intensidade das ondas após a fenda. Isso pode ser visto pelo pico azul estreito

que se encontra na frente da fenda. Como o comprimento de onda é muito pequeno, a envoltória difratada revela a inversão na direção da oscilação das ondas difratadas e os pequenos picos de amplitude negativa são observados. Pelo fato de $I(\theta)$ ser proporcional ao quadrado da amplitude, os pequenos picos aparecem para cima (para a direita, na figura).

Para entender isso melhor, imagine que um detector de luz gire ao longo da linha circular pontilhada, começando em $\theta = +90^\circ$ e indo até $\theta = -90^\circ$. A leitura desse detector seria zero, com exceção na região na frente da fenda. Esta é a razão porque se afirmou que a luz não se espalhou após atravessar a fenda. Tão logo o detector sai da frente da fenda, a intensidade cai rapidamente a zero. Para tornar isso mais claro, imagine que estas ondas sejam do tipo sonora e estejam dentro do limite de audição humana. Se a fenda representa a porta de uma sala com 1 m de largura, uma pessoa junto à parede a 2 m de distância da porta (representada pelo ponto 1 na figura) não ouviria o som proveniente de dentro da sala.

Considere agora que as ondas tenham comprimento de onda $\lambda_2 = a$. Isso está representado na figura pelo segundo pico esverdeado mais largo. O sinal do detector seria não nulo em toda extensão do círculo de um raio até aproximadamente 6 vezes a largura da fenda, a partir de seu centro. Retornando ao caso das ondas sonoras, a pessoa junto à parede a 2 m da porta (representada pelo ponto 2 na figura) ouviria sem muitas dificuldades o som proveniente da sala. Para $\lambda \geq a$ não ocorre a inversão de fase nas ondas difratadas, e os picos laterais não são mais observados.

Como último cenário, considere agora que as ondas tenham comprimento de onda $\lambda_3 = 5a$, muito maior do que a largura da fenda. Neste caso, as ondas se espalham em todas as direções com muito mais facilidade após a fenda, ou seja, a interferência é construtiva em uma região muito maior do que nos casos anteriores. Em outras palavras, o pico central se alarga de modo a tomar toda a região após a fenda. Pela Figura 17, observa-se que a intensidade das ondas difratadas a uma distância de 8 vezes larguras da fenda sobre a parede do obstáculo tem intensidade que corresponde a cerca de 70% da intensidade na frente da fenda. Considerando novamente o caso das ondas sonoras, a pessoa junto à parede a 2 m da porta (representada pelo ponto 3 na figura), ouviria muito melhor o som proveniente da sala.

Resumindo, a Figura 17 mostra como a energia da onda se distribui após a fenda. Para $\lambda \ll a$, toda energia que passa pela fenda se concentra à sua frente em um feixe da largura da própria fenda. No outro limite, para $\lambda \gg a$, a energia que passa pela fenda se espalha em uma grande região atrás dela. Devemos deixar claro que a interferência apenas redistribui a energia no espaço. Se duas ondas possuem energia total E_T , quando separadas espacialmente, esta quantidade de energia permanecerá a mesma, independente da forma que o padrão de interferência possa vir a ter, quer exista ou não difração.

2.4 Uso do Software *Ripple Tank Simulation* Como Mediador para o Ensino da Difração

Uma vez que o fenômeno da difração foi discutido por meio de argumentos qualitativos e quantitativos, é importante que ele seja mostrado também na forma imagens, seja via experimentos em laboratório ou virtuais, por meio de simulações computacionais. Tem sido amplamente mostrado na literatura que este tipo de intervenção facilita a obtenção de conceitos que, via de regra, estão embutidos em equações matemáticas abstratas. Com este propósito, agora será feito uso do programa de computador *Ripple Tank Simulation* (RTS), uma versão em WebGL escrito em *Java Script*, uma linguagem de programação que permite a execução do software diretamente da página da internet.

A escolha deste programa se deu em função da sua simplicidade operacional, por estar disponível *on-line* (<https://www.falstad.com/ripple/>) e ainda por ser gratuito. Existem outros programas de simulação disponíveis *on-line*, como exemplo o conhecido *Physics Education Technology – PhET*, da Universidade do Colorado, EUA (https://phet.colorado.edu/pt_BR/), que possui simulações em quase todas as áreas da ciência. O programa RTS foi escolhido porque ele apresenta grande quantidade de simulações especificamente voltadas para o estudo da interferência e difração, evitando que o estudante divague por outras áreas que não são foco do estudo durante as atividades em sala de aula.

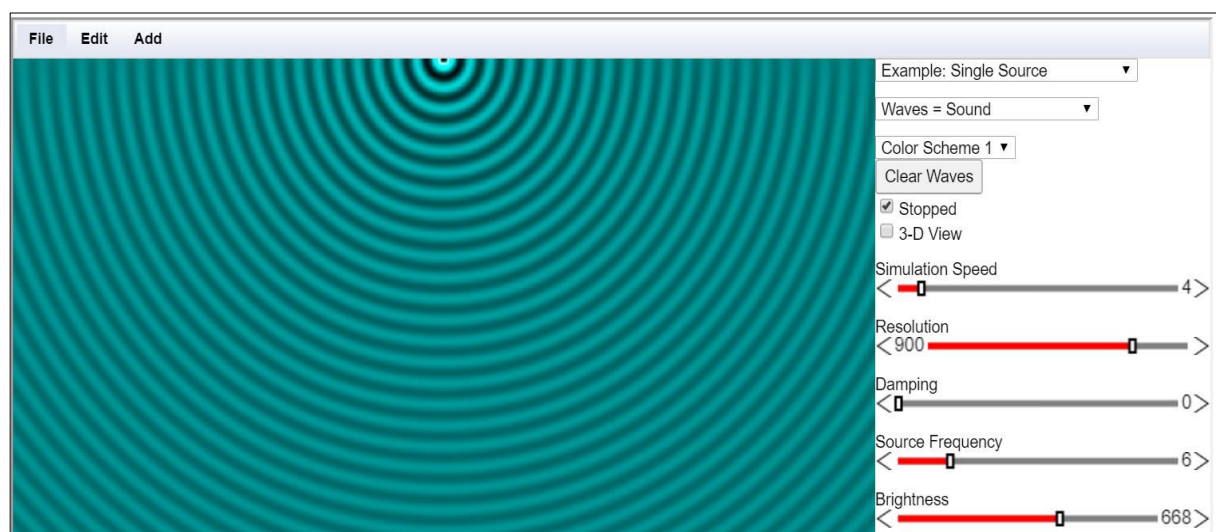
Um dos objetivos centrais dessa aplicação é fazer o professor focar sua atenção em representações mentais alternativas com a finalidade de melhorar o grau de aprendizado dos conceitos. Em geral, os estudantes possuem conhecimentos antes de se envolverem com discussões sobre novos conteúdos em sala de aula e também aprendem novos saberes durante essas discussões. Entretanto, por causa do senso comum ou por equívocos conceituais, nem sempre o que é aprendido corresponde ao que o professor realmente quis ensinar.

Isso ocorre sobretudo com a disciplina Física, na qual os conceitos são passados geralmente através de equações matemáticas abstratas, e os estudantes quase sempre não têm a oportunidade de visualizar esses conceitos por meio de experiências, sejam reais ou virtuais. O resultado deste modelo educacional é a falta de um aprendizado crítico, por meio do qual o estudante possa entender e transformar situações do seu cotidiano. No atual modelo educacional brasileiro, os estudantes ficam expostos à uma quantidade enorme de informações, absorvida de forma parcial e distorcida, resultando em aprendizado notadamente mecânico e, portanto, desprovido de qualquer sentido de utilidade prática.

2.4.1 Instruções básicas sobre a operação do RTS

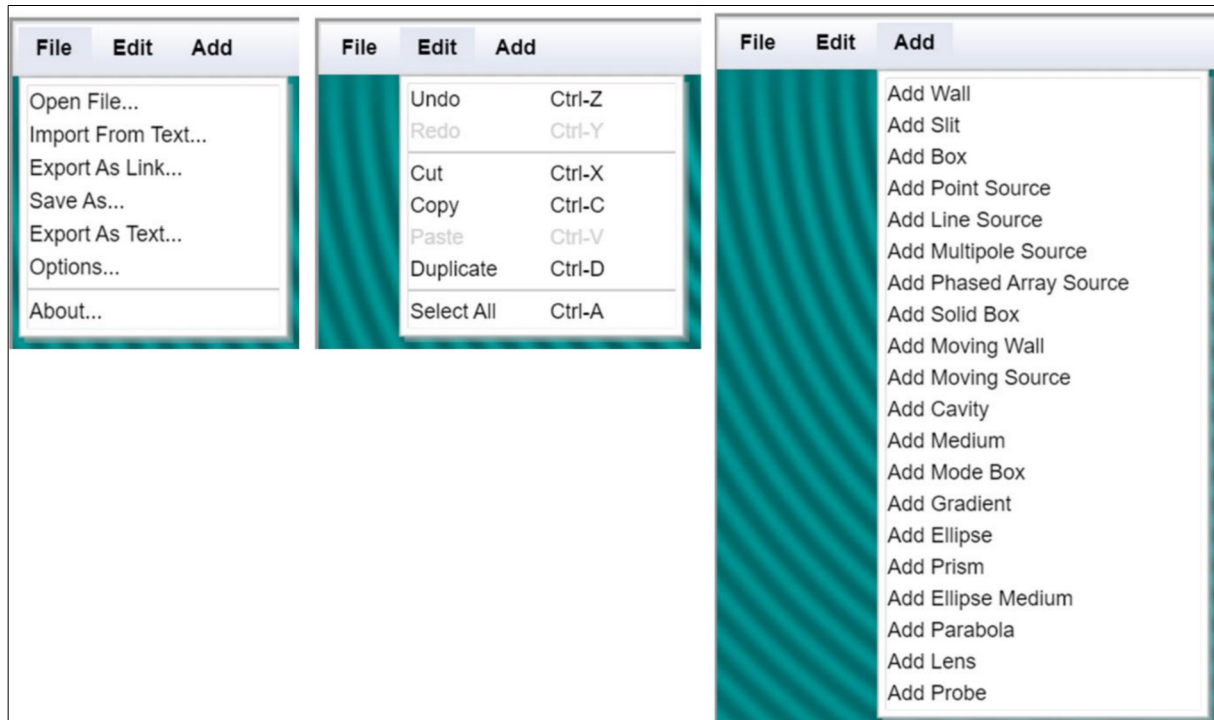
A Figura 18 mostra a tela inicial (ou de trabalho) do programa de simulação RTS, na qual uma fonte pontual emite uma onda para dentro da região retangular de trabalho. Esta tela inicial é simples e de fácil identificação das instruções. Na aba superior existem apenas três funções: **Arquivo** (*File*), **Editar** (*Edit*) e **Adicionar** (*Add*). A Figura 19 mostra as opções dentro de cada uma destas funções. Na função **Arquivo** temos a opção de salvar as simulações e abrir os arquivos salvos. O programa não permite salvar as simulações no formato de imagens ou filmes, mas podemos salvar um arquivo no formato de texto. Ao ser aberto, o RPS automaticamente reproduz a simulação salva. A função **Editar** serve para copiar, duplicar, colar e recortar figuras de objetos que pode ser colocados na área de interação das ondas, bem como incluir fontes de ondas nesta região da tela. Estes objetos são incluídos a partir da função **Adicionar**, dentro da qual existem 20 (vinte) subfunções diferentes, cada uma explorando um aspecto da física das ondas no que diz respeito à interferência e difração. O conteúdo da função **Adicionar** também pode ser acessada clicando o botão direito do mouse em qualquer local do retângulo de trabalho.

Figura 18 – Tela de trabalho do programa *Ripple Tank Simulation*.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 19 – Conteúdo das funções Arquivo, Editar e Adicionar.



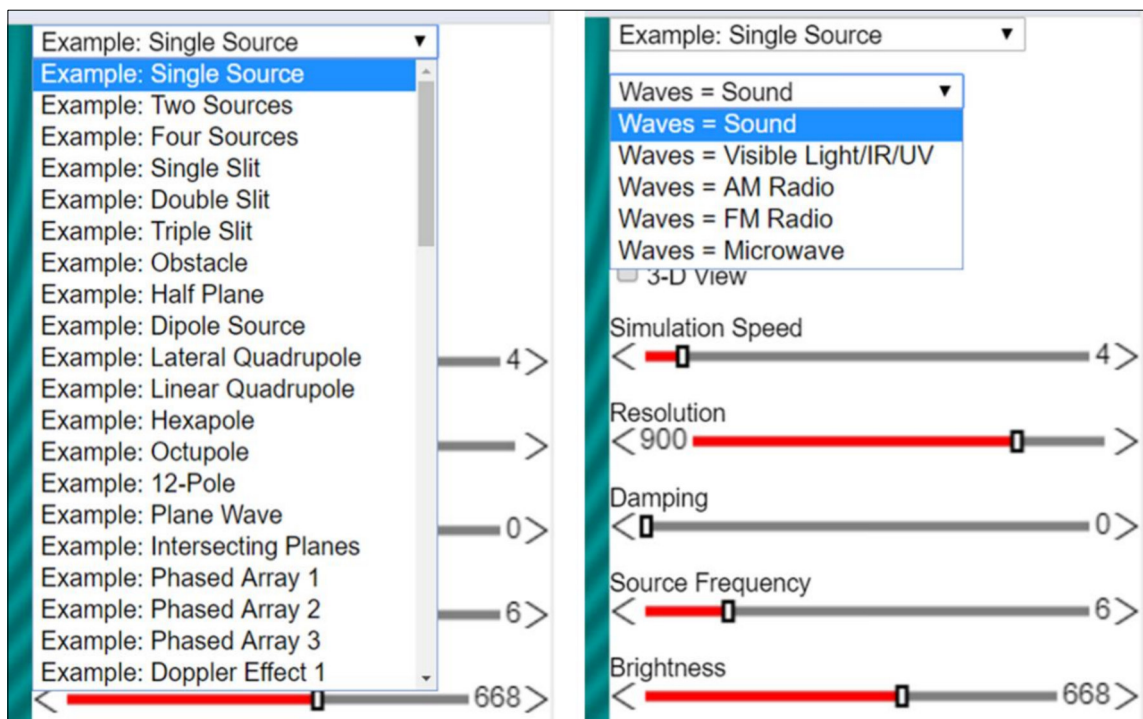
Fonte: Próprio Autor.

O lado direito da tela de trabalho do RTS (Figura 18) apresenta opções para escolher o tipo de fonte das ondas (aproximadamente 70 cenários diferentes), opção entre ondas mecânicas ou eletromagnéticas, opção de apresentação da simulação em duas ou três dimensões. Além disso, permite o controle de alguns parâmetros da simulação, como a velocidade da simulação, a resolução da imagem, frequência e a intensidade (brilho) das ondas, e alguns padrões de cores das imagens. Também fornece a opção de parar a simulação para uma análise mais detalhada dos padrões de interferência obtidos. Lembrando que cada ponto da imagem é obtido a partir de um cálculo computacional, a escolha de uma resolução muito elevada implica em uma grande quantidade de cálculos, o que pode comprometer a velocidade da simulação, dependendo da capacidade de processamento da máquina em uso e da qualidade da rede de internet.

Para fins de ilustração, a Figura 20 (lado esquerdo) mostra algumas fontes de ondas disponíveis, bem como obstáculos que podem ser incluídos. Como exemplo, pode-se ter apenas uma fonte pontual (usada na Figura 18) ou várias, que podem ser colocadas em qualquer ponto da tela. Para adicionar uma fonte pontual (ou qualquer outra disponível) basta usar a função **Adicionar** na aba superior. Também pode-se usar o mouse para incluir os mesmos objetos, bastando clicar com o botão direito em qualquer ponto da tela de trabalho, e um menu com as mesmas opções estará disponível. Uma vez inserido, qualquer objeto pode ser deslocado sobre a tela de trabalho, bastando clicar com o botão esquerdo do mouse, arrastar e soltar no local desejado. Nesta tela também tem as funções **Editar** (oferece várias opções de controle sobre a fonte da onda), bem como as opções **Deletar** e **Duplicar**

as fontes inseridas. Outras instruções sobre o programa RTS serão dadas diretamente aos estudantes durante as aulas presenciais.

Figura 20 – Tipos de fontes de ondas e seus ajustes.



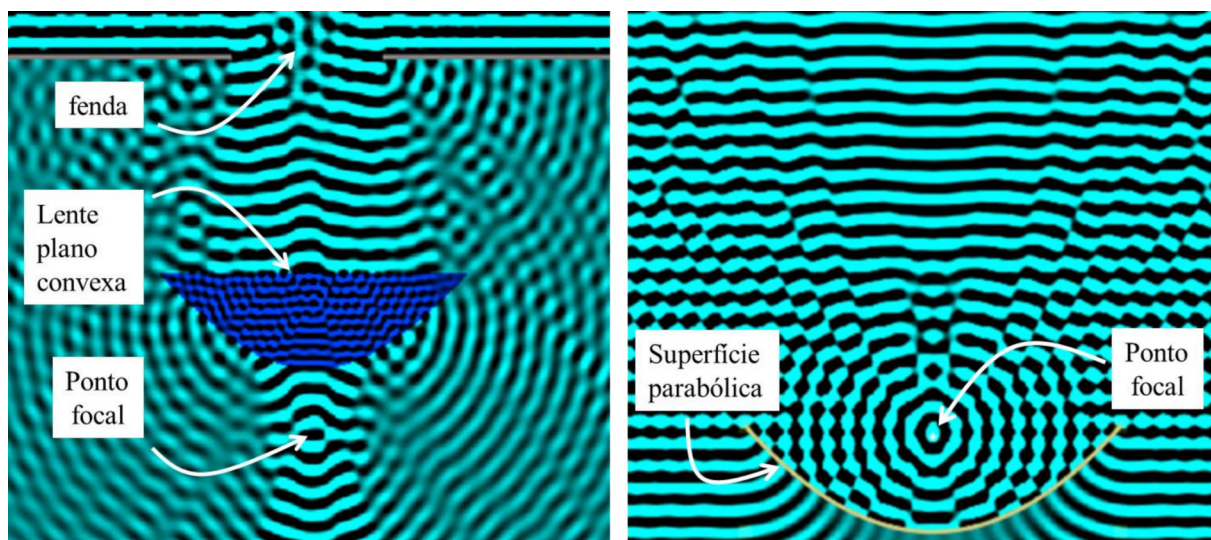
Fonte: Próprio Autor.

2.4.2 Aplicações do RTS

A Figura 21 ilustra como o RTS pode ser utilizado para mostrar como as ondas interagem com diferentes objetos. Na parte superior à esquerda da figura foi introduzida uma fenda com abertura muito maior do que o comprimento de onda, para evitar a difração das ondas planas incidentes sobre ela, conforme previsto pela Equação (39). Na verdade, é impossível não ter difração quando uma onda encontra um obstáculo, independente da relação entre comprimento de onda e dimensão do obstáculo. O que acontece de fato, conforme ilustrado nesta figura, é que a intensidade da onda não difratada é muito maior do que a intensidade da onda difratada. Após a fenda, foi adicionada uma lente plano convexa. Após atravessar a fenda, as frentes de onda se dirigem para a região central à frente da lente, em resposta ao fenômeno da refração. Esta simulação serve para mostrar ao estudante a existência de pontos focais de lentes e espelhos curvos.

A Figura 21 (à direita) também está ilustrado como a presença de um objeto parabólico afeta o padrão de frentes de onda planas que se movem de cima para baixo. O padrão de ondas planas acima da parábola está distorcido por causa da interferência das ondas que descem e as que são refletidas pelo objeto parabólico. Na parte inferior da parábola temos claramente o efeito de difração das ondas, enquanto acima dela temos as frentes de onda sendo dirigidas para um ponto do espaço, o foco da parábola. Esta simulação serve para explicar vários dispositivos durante as aulas de ondulatória, sendo o foco da parábola um conceito importante a ser explorado. Seja para explicar um espelho para luz visível, seja uma antena parabólica para sinais de TV ou mesmo uma concha acústica para grandes concertos musicais, essa simulação padrão apresenta grande potencial dentro da sala de aula. E existem dezenas de outras aplicações interessantes como estas disponíveis no RTS.

Figura 21 – Ilustração para pontos focais de uma lente e de uma superfície parabólica.

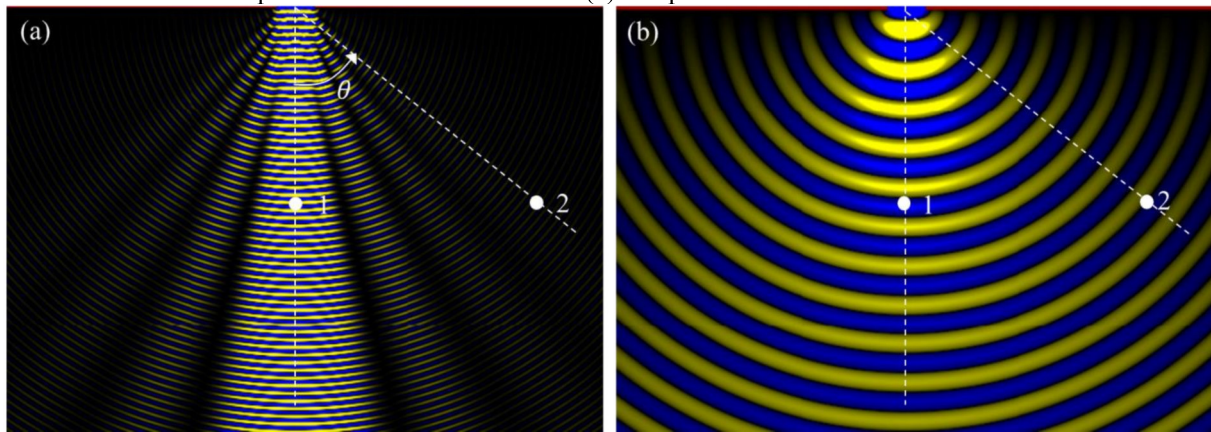


Fonte: Próprio Autor.

Para concluir, a Figura 22 ilustra como as discussões feitas na seção 2.3.3, sobre a intensidade das ondas difratadas, pode ser visualizada com o auxílio do programa RTS. A intensidade da difração já foi mostrada algebricamente por meio da Equação (39) e graficamente por meio da Figura 17. Cada um desses métodos possui informações próprias, e o estudante deve combiná-las para ter um entendimento completo do fenômeno. Contudo, por mais que as explicações sejam didáticas e as palavras bem articuladas, o entendimento desses conceitos exige certa capacidade de abstração que a maioria dos estudantes de Ensino Médio ainda não possui.

Provavelmente, a maneira mais apropriada de discutir tais conteúdos com um grupo de estudantes fosse através de filmes didáticos, cujas imagens pudessem ser repetidas de várias maneiras diferentes, com velocidades diversas, com tipos de ondas e fendas diferentes. Todas essas informações estão contidas na Equação (39), mas de forma escondida e abstrata, o que torna o entendimento difícil. O objetivo do uso do RTS na próxima simulação é mostrar método alternativo aos dois já mostrados para discutir a forma como a intensidade das ondas se distribui após uma fenda.

Figura 22 – Ilustração para a difração usando o princípio de Huygens-Fresnel para uma fenda com 500 nm . (a) comprimento de onda de 100 nm . (b) comprimento de onda de 1000 nm .



Fonte: Próprio Autor.

Nas duas simulações da Figura 22 temos uma onda plana atingindo uma fenda com abertura de 500 nm , sendo o comprimento de onda igual a 100 nm (Figura 22a) e 1000 nm (Figura 22b). Isto foi feito assim para comparar com os resultados mostrados na Figura 17 para $\lambda_1 = 0,1a$ e $\lambda_2 = a$. Conforme evidenciado nas discussões da Figura 17, para $\lambda < a$ a fase das ondas difratadas se inverte e as amplitudes se tornam negativas. Isso pode ser observado claramente na Figura 22a, na qual a faixa de intensidade central é ladeada por faixas laterais menos intensas, entre as quais a amplitude é zero.

Conforme foi discutido no contexto da Equação (39), quando a onda encontra uma fenda (ou objeto) cujas dimensões sejam maiores do que seu comprimento de onda, os efeitos da difração são pequenos. Caso contrário, o efeito da difração é determinante. Embora não seja tão direto, isso pode ser observado diretamente da Equação (39), que será reproduzida aqui:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a (\text{sen}\theta)/\lambda]}{\pi a (\text{sen}\theta)/\lambda} \right]^2 \quad (39)$$

Considere primeiro o que acontece na região à frente da fenda (θ é pequeno). Para pequenos valores de θ , a função $\text{sen}\theta \approx \theta$. O símbolo $\approx$ significa ‘aproximadamente igual a’. Neste caso, a Equação (39) se torna:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\text{sen} \left[\frac{\pi a \theta}{\lambda} \right]}{\frac{\pi a \theta}{\lambda}} \right]^2 \approx I_0 \left[\frac{\frac{\pi a \theta}{\lambda}}{\frac{\pi a \theta}{\lambda}} \right]^2 \approx I_0 \quad (40)$$

Este resultado mostra que independente das características da fenda e da onda, na região do espaço à frente da fenda (pontos 1 nas Figuras 22a,b) a interferência sempre será construtiva e terá seu máximo valor. Considere agora o que acontece na região lateral à fenda, atrás do obstáculo. Para θ grande, a função $\text{sen}(\theta) \approx 1$. Neste caso, a Equação (39) se torna:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a / \lambda]}{\pi a / \lambda} \right]^2 \quad (41)$$

Considere agora que uma relação entre o comprimento de onda e a largura da fenda seja dada por $\lambda = Na$, onde N é um número que diz quantas vezes λ é menor ($N < 1$) ou maior ($N > 1$) do que a . Substituindo na Equação (41), tem-se:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi a / Na]}{\pi a / Na} \right]^2 \approx I_0 \left[\frac{\text{sen}[\pi / N]}{\pi / N} \right]^2 \quad (42)$$

Agora considere $N \ll 1$. O numerador desta fração $\text{sen}[\pi / N]$ varia entre 0 e 1, dependendo do valor de N , mas nunca é superior a 1. Já o denominador π / N se torna um número muito grande. Portanto, a divisão de um número inferior ou igual a 1 por outro muito maior do que 1 resulta em um valor muito pequeno, e assim $I(\theta) \rightarrow 0$. Isto está mostrado com o ponto 2 na Figura 22a. A seta " $\rightarrow$ " significa ‘se aproxima de’ ou ‘tende a’. Isto está de acordo com o pico estreito da Figura 14 para $\lambda_1 = 0,1a$. Finalmente, considere o caso $N \gg 1$. O termo π / N é muito pequeno e $\text{sen}(\pi / N) \approx \pi / N$. Logo, a Equação (42) se reduz a:

$$I(\theta) \approx I_0 \left[\frac{\pi / N}{\pi / N} \right]^2 \approx I_0 \quad (43)$$

Esse resultado está de acordo com as discussões para $\lambda_3 = 5a$ na Figura 17, e está ilustrado com o ponto 2 na Figura 22b. Para valores intermediários de θ , a intensidade das ondas difratadas $I(\theta)$ varia entre 0 e I_0 , dependendo do valor de N .

Do ponto de vista de um estudante do Ensino Médio, que tem pouca capacidade de abstração, um cenário de aprendizagem é aquele encontrado nas equações abstratas e na fala igualmente abstrata do professor, quando estas estão desconectadas da observação real ou virtual de um fenômeno. Um outro cenário diferente é aquele em que, associado aos conceitos explicados pelo professor, o estudante tem diante de si a oportunidade de manipular, visualizar, e ele mesmo ter o controle dos parâmetros da simulação, como se estivesse em um ambiente real de laboratório, somando-se às explicações do professor. Certamente esse hipotético segundo cenário é mais consistente com aquele no qual se espera uma aprendizagem muito mais significativa dos conceitos ensinados.

Sequência Didática Construtivista

Na presente seção iremos apresentar a metodologia usado para o desenvolvimento do Produto Educacional por meio de uma Sequência Didática Construtivista, uma estratégia educacional que tem como principal objetivo solucionar as principais dificuldades encontradas pelos alunos em um determinado assunto.

Professor: Aldo Alberto Câmara Marques
Componente curricular: Física
Número de Sequências didáticas: 01 Número de encontros: 08 Período de aplicação: novembro e dezembro de 2020
Tema gerador: ondas
Subtema: difração
✓ O que o aluno pode aprender com estas intervenções? (metas) ✓ Consultar, analisar e interpretar textos e comunicações de ciência e tecnologia veiculadas por diferentes meios. ✓ Elaborar comunicações orais ou escritas para relatar, analisar e sistematizar eventos, fenômenos, experimentos, questões, entrevistas, visitas e correspondências. ✓ Analisar, argumentar e posicionar-se criticamente em relação a temas de ciência e tecnologia. ✓ Identificar, em dada situação-problema, as informações ou variáveis relevantes e possíveis estratégias para entendê-las. ✓ Identificar a classificação das ondas. ✓ Diferenciar os processos físicos relacionados com as ondas. ✓ Aplicar os conteúdos de ondas ao cotidiano.
Conhecimentos prévios trabalhados pelo professor (identificação de subsunçores dos estudantes) 1. Levantar conceitos e definições sobre ondas. 2. Instigar hipóteses, questionamentos e críticas sobre a história, definição e aplicação das ondas. 3. Explicação de possíveis indagações provenientes das discussões durante as aulas. 4. Explicação de possíveis dúvidas sobre as equações matemáticas e exercícios sobre os fenômenos ondulatórios e da difração. Entender o significado da difração.

Estratégias e recursos da aula:

- Data show;
- Livro didático;
- Pesquisa na internet.
- Quadro branco;
- Pincéis e apagador;
- Softwares

Recursos complementares:

Demonstração de simulações sobre experimentos envolvendo ondas.

Formas de avaliação:

1º momento (04 aulas): Esta é a etapa da construção do conhecimento do estudante. O professor vai ministrar aulas sobre o conteúdo de ondas.

Nesta etapa da aplicação do Produto Educacional será ministrado o conteúdo sobre ondulatória. Nesta fase será trabalhado o conteúdo com o qual os alunos precisam saber para poder assimilar o assunto difração. Esta fase de aplicação será trabalhada de forma teórica, por meio de aula expositiva e dialogada da forma tradicional, mas também será utilizado mapas conceituais para auxiliar na aprendizagem do conteúdo. A avaliação será por meio de uma lista de questões sobre o assunto de ondas, a qual tem o intuito de verificar a aprendizagem dos alunos, para que estes assimilem esses conceitos iniciais. Nessa avaliação terão apenas questões fundamentais sobre o conteúdo de ondas, pois eles serão muito úteis no momento da utilização do simulador.

2º momento (02 aulas): Aqui será apresentado o programa de simulação e os conteúdos deverão ser melhor consolidados.

A forma de avaliação será realizada da seguinte maneira: será pedido aos alunos que façam algumas simulações com ondas no programa. Cada aluno vai reproduzir algum tipo de fenômeno ondulatório utilizando o software educacional.

3º momento (01 aula) Aplicação de questionários de verificação de aprendizagem

4º momento (01 aula); Aplicação do questionário de satisfação para verificar o nível de satisfação de cada aluno, para saber se o objetivo da aprendizagem foi alcançado.

Objetivos:

Entender conceito de onda;

Compreender a classificação das ondas (mecânica e eletromagnética, transversal e longitudinal)

Compreender a propagação das ondas;

Compreender os fenômenos da refração, difração e interferência das ondas;
Realizar simulações com softwares livres para consolidar o conhecimento sobre o assunto investigado.
Identificar em quais situações a difração ocorre com mais intensidade.

Conteúdos

Ondas e suas propriedades.
Noções gerais de ondulatória
Noções gerais de onda mecânica longitudinal e transversal;
Noções gerais de onda sonora;
Noções gerais de onda eletromagnética.
Noções gerais sobre refração, difração e interferência.

Metodologia de aplicação da sequência didática:

Antes de iniciar a aula, orientar os(as) alunos(as) sobre a importância da participação coletiva durante as atividades propostas, explicando que isso conduz a uma maior integração e a um diálogo mais amplo sobre os temas abordados.

Iniciar perguntando aos alunos: “*O que é Difração?*” Partindo da pressuposição que eles não sabem a resposta, será sugerido que eles respondam o que acham que pode ser e em qual parte da Física se estuda este assunto. Em seguida será feita uma explanação sobre o que são ondas, suas características, equações e algumas aplicações. Após esta etapa, voltarão a ser questionados: “O que vem a ser difração? Qual é a ideia que devemos ter sobre esse assunto? Como podemos saber que é a difração?” Sempre partindo do empirismo dos discentes quanto ao assunto e aos questionamentos levantados. Em seguida, a partir da prévia discussão, serão demonstrados os princípios básicos, as ideias centrais e como surgiu o conceito de difração e como identificá-la no cotidiano.

Desenvolvimento do Produto Educacional

»» Primeiro momento pedagógico

No primeiro momento foi desenvolvido entre os dias 23 de novembro de 2020 a 11 de dezembro de 2020. Logo no início desta fase de aplicação do produto educacional foi feita uma sondagem com os alunos acerca dos seus conhecimentos prévios (subsunçores), com os conteúdos que são a base para um bom entendimento do assunto. Foram ministradas aulas sobre ondas, conceitos fundamentais, natureza, propagação e vibração, e também fenômenos ondulatórios: refração, reflexão e difração. Formam necessárias 4 aulas para aplicação desse conteúdo. Logo após, na quinta aula, foi iniciado o assunto chave para desenvolvimento do Produto Educacional. Em seguida os alunos tiveram a oportunidade de ter contato com o programa computacional RIPPER TANK SIMULATION. Lembrando que toda essa fase de desenvolvimento desta proposta educacional foi feita de forma remota. Na figura abaixo temos o registro do momento no qual a aula foi desenvolvida, ministrada por meio do programa Google Meet.

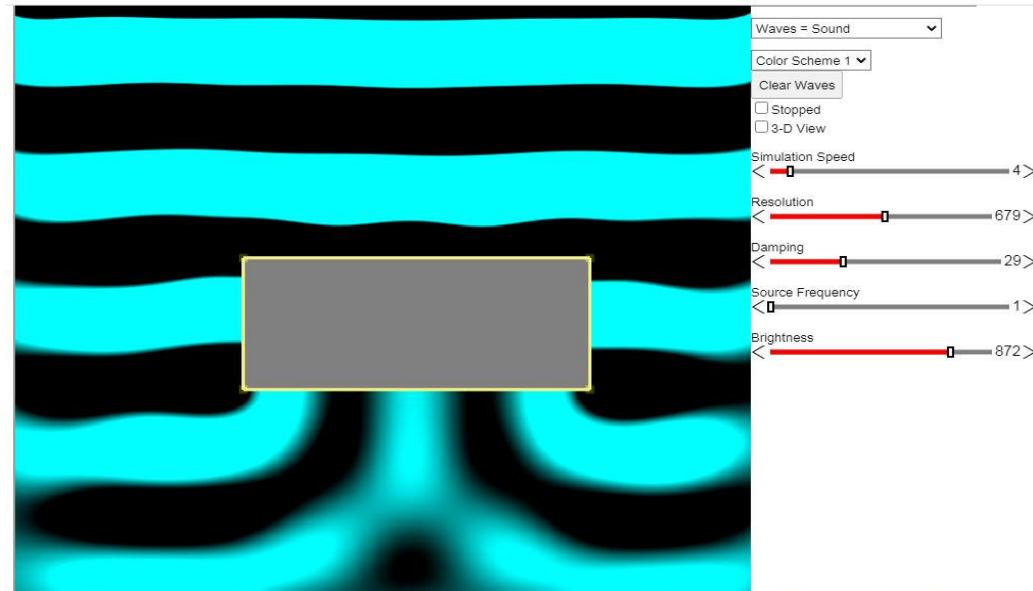
»» Segundo momento pedagógico

Após ter sido trabalhado todo o conteúdo necessário para a compreensão do fenômeno da difração, passamos a usar o simulador. Nesta fase de aplicação do produto foram demonstradas simulações referentes à propagação de ondas, mais especificamente ao acontecimento da difração. Nesta aula foram feitas simulações com ondas, cuja finalidade era que cada aluno pudesse entender onde estão presentes os fenômenos ondulatórios e, dessa maneira, poder acompanhar de forma detalhada como e por que a difração ocorre, em quais caso ela ocorrerá de forma mais intensa e também quando será muito pouco perceptível. Foi demonstrado também o experimento da fenda dupla. Os alunos ficaram ambientados ao simulador RIPPLE TANK SIMULATION, e com o auxílio desse software puderam acompanhar os fenômenos ondulatórios de uma forma mais concreta. Eles conseguiram, através desta aplicação educacional, reproduzir diversos acontecimentos ondulatórios e visualizaram a forma na qual ocorrem esses acontecimentos e suas causas.

Para comprovar nossas explicações da Difração, foi pedido para os alunos produzirem duas simulações utilizando o RIPPER TANK SIMULATION. Logo após comentar em quais casos ela ocorre com mais intensidade, fizemos duas simulações com ondas sonoras, e ambas com obstáculo. Na Figura 1 temos uma simulação de uma onda sonora com um comprimento de onda grande e frequência bem baixa, com um obstáculo à sua frente. Esta onda conseguiu atingir o espaço atrás do obstáculo. Podemos observar. Na simulação da figura 2, na qual o comprimento de onda é pequeno e a frequência é bem mais alta, podemos ver que o espaço na direção do obstáculo quase não foi preenchido, a onda não contornou o obstáculo e não foi espalhada. Em outras palavras, não se

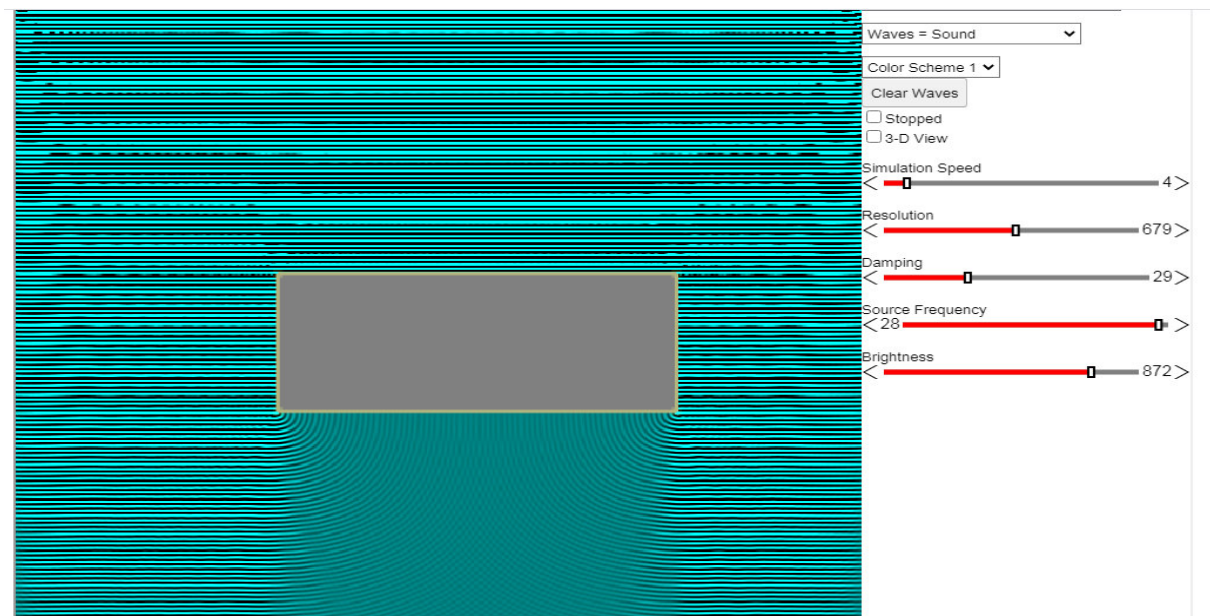
difratou, evidenciando assim o que mostra na teoria dos estudos da Difração. O uso do simulador foi essencial para visualização e comportamento das ondas em cada caso específico, dessa forma o conteúdo não ficou de forma abstrata e sim bem assimilado pelos alunos as aulas ficaram mais interativas e interessantes na opinião dos alunos.

Figura 1: Simulação do RTS com uma onda de baixa frequência



Fonte: Dados da pesquisa 2020

Figura 2: Simulação do RTS com uma onda de alta frequência



Fonte: Dados da pesquisa 2020.

»»» Terceiro momento pedagógico

Nesta fase, após os alunos terem visto todo o conteúdo de ondas de forma didática e também se familiarizarem com os acontecimentos ondulatórios e poderem observá-los de forma concreta, eles foram submetidos a dois questionários para verificação de aprendizagem. Esse questionário contém somente perguntas referentes aos assuntos debatidos durante a aplicação do Produto Educacional. Um dos questionários possui perguntas objetivas de múltipla escolha, do qual foi analisado o percentual de erros e acertos de cada aluno ao responder cada pergunta.

»» Quarto momento pedagógico

Esta fase foi destinada apenas para a apresentação dos resultados da aplicação do Produto Educacional. Foram analisados nesta seção os resultados dos dois questionários do momento pedagógico anterior.

Anexo I

Atividade para verificação de aprendizagem
CEM anexo São Cristóvão anexo III /São Bernardo

Nome: _____

- 1) Conceitue difração e dê exemplos de sua ocorrência no dia a dia.
- 2) Thomas Young (1773-1829) fez a luz de uma fonte passar por duas fendas paralelas antes de atingir um obstáculo e observou no anteparo o surgimento de regiões claras e escuras. O que representam essas regiões?
- 3) Numa difração em fenda única, após a onda passar pela fenda, que característica que será alterada?
- 4) Faça um desenho de uma figura de difração em uma fenda única (a) quando o seu comprimento de onda é aproximadamente igual ao tamanho a largura da fenda e (b) quando o comprimento de onda é bem menor do que a largura da fenda.
- 5) Quando um feixe de luz incide na superfície de um CD, observamos a formação de cores na parte gravada, e reflete as cores correspondentes ao espectro da referida luz. Explique este fenômeno.

Anexo II

Atividade para verificação de aprendizagem
CEM anexo São Cristóvão anexo III /São Bernardo

Nome: _____

- 1) Quais destas definições é de uma onda mecânica
 - a) é uma onda que precisa de um meio para se propagar.
 - b) é uma onda que não precisa de um meio para se propagar.
 - c) é um movimento retilíneo.
 - d) é um corpo eletrizado.

- 2) Em relação ao seu comprimento de onda, o efeito da difração será mais perceptível quando:
 - a) o comprimento de onda for muito maior do que a largura da fenda.
 - b) o comprimento de onda for muito menor do que a largura da fenda.
 - c) o comprimento de onda for aproximadamente do tamanho da largura da fenda.
 - d) o comprimento de onda for nulo.

- 3) Quanto à direção de vibração uma onda em uma mola é:
 - a) longitudinal
 - b) transversal
 - c) gravitacional
 - d) mecânica

- 4) Qual nome do famoso experimento feito por Thomas Young que revelou o efeito da difração
 - a) queda livre
 - b) inércia
 - c) lei de ohm
 - d) fenda dupla

REFERÊNCIAS

Ana Fukui - Madson de Melo Molina - Venerando Santiago Oliveira|Marca: Ser Protagonista - Física 2º Ano - Ensino Médio - 2ª Ed. 2015 Edições Sm (Brasil)

Alberto Gaspar - compreendendo a física, Ondas, Óptica e Termodinâmica-Física 2º ano -3.ed São Paulo,2017

BENIGNO BARRETO, CLAUDIO XAVIER, Física aula por aula, Termologia-Óptica-Ondulatória, 2ºano,3º edição, São Paulo 2016

BONJORNO CLITON, EDUARDO PRADO, Física ótica, termologia e ondulatória, 2º ano—3º Ed -São Paulo: FTD 2016- coleção física.

HOWLES, GRANT R, introduction to modern physics, Reprint Originally Published, 2 nd, New York: Holt, Rinehart and Winston, 1975

•GASPAR ALBERTO. Compreendo física – volume 2: Ondas, óptica, termodinâmica, 3º --São Paulo :Ática 2016

GONÇALVES FILHO, A. TOSCANO, C. – Física Interação e tecnologia. Ed. Leya, 2013.

•HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl, **Fundamentos de Física –Ótica e Física Moderna**, Volume 4, 9ª Edição, LTC, Rio de Janeiro, 2009

LIBANEO, Jose Carlos **didática**, são Paulo: Cortez, 2017

TREFIL, HAZEN, R,M. Física viva. Uma introdução a física conceitual.V3.Rio de Janeiro: LTC, 2006.

•SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark Waldo; YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV Ótica e Física Moderna**. Vol 4, 12.ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2008.

SEARWAY , R. A; JEWETT,J,W. Princípios de Física. volume 3.São Paulo:Thomson e Learning , 2002

WITTER, Geraldina Porto. Psicologia da Aprendizagem /Geraldina Porto Witter, Jose Fernando Bitencourt Lomânco .--- São Paulo:EPU, 1984 (Temas básicos de Psicologia:v.9)

YAMAMOTO, KAZUITO. Física para o Ensino Médio, volume 2, ondas e termodinâmica / Kazuito Yamamoto, 4 ed—São Paulo: Saraiva 2016. 58