



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 04

JOSÉ VICTOR BEZERRA TEIXEIRA

**O EFEITO DOPPLER DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS A PARTIR DE
SEQUÊNCIA DIDÁTICA.**

Manaus - AM

2024

José Victor Bezerra Teixeira

O efeito doppler de ondas eletromagnéticas a partir de sequência didática.

Dissertação apresentada ao Polo 04 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Amazonas e do Instituto federal do Amazonas como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: O ensino de Física Moderna no ensino médio.

Orientador: Prof. Dr. Denilson da Silva Borges

Manaus – AM

2024

Biblioteca do *Campus* Manaus Centro - IFAM

T266e Teixeira, José Victor Bezerra.
O efeito doppler de ondas eletromagnéticas a partir de sequência didática. / José Victor Bezerra Teixeira. – Manaus, 2024.
183 p.: il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física). – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Centro, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Denilson da Silva Borges.

1.Física – ensino. 2. Efeito Doppler – ondas eletromagnéticas.
3.Arduino. 4. TDIC. I. Borges, Denilson da Silva. (Orient). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.

CDD 530.07



Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - Polo 4

Ata da 66ª Defesa de Dissertação

Aos dois dias do mês de agosto, do ano de dois mil e vinte e quatro, às 09h00, por webconferência, ocorreu a Defesa da Dissertação do mestrando **José Victor Bezerra Teixeira** intitulada: “**O EFEITO DOPPLER DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS A PARTIR DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA**”, do Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 4 das Instituições de Ensino Superior: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM). A Banca Examinadora foi composta pelo Prof. Dr. Denilson da Silva borges (UFAM), Prof. Dr. Adalberto Picinin (UFSCAR) e Profa. Dra. Rita de Cássia Mota Teixeira de Oliveira (UFAM). O Professor Doutor Denilson da Silva Borges, Presidente, deu início aos trabalhos, convidando os membros a comporem a Banca Examinadora. O Presidente fez a leitura dos procedimentos para defesa de dissertação, e convocou o mestrando para fazer a exposição de seu trabalho que, em seguida, foi arguido pelos membros da Banca Examinadora. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se privativamente e decidiu pela aprovação do trabalho. Ao final, os presentes foram chamados para tomarem conhecimento do resultado da avaliação, o Presidente da banca comunicou ao interessado que feitas às devidas correções na dissertação, conforme sugestão da banca Examinadora, o discente é obrigado a entregar, na secretaria do polo 4, até sessenta (60) dias após a data da defesa, duas (02) vias impressa e encadernada no formato capa dura, e uma via(01) digital em formato PDF, para os trâmites necessários à concessão do diploma, conforme Resolução Nº.47 – CONSUP/IFAM de 13 de julho de 2015. Nada mais havendo a tratar, foi lavrado a presente Ata que, após lida e aprovada, será assinada pelos presentes.

Documento assinado digitalmente



DENILSON DA SILVA BORGES
Data: 02/08/2024 12:21:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Denilson da Silva Borges
Presidente - UFAM

Documento assinado digitalmente



ADALBERTO PICININ
Data: 02/08/2024 16:18:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adalberto Picinin
Membro Externo – UFSCAR

Documento assinado digitalmente



RITA DE CASSIA MOTA TEIXEIRA DE OLIVEIRA
Data: 02/08/2024 12:42:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Rita de Cássia Mota Teixeira de Oliveira
Membro Interno - UFAM

José Victor Bezerra Teixeira

O efeito doppler de ondas eletromagnéticas a partir de sequência didática.

Dissertação apresentada ao Polo 04 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Amazonas e do Instituto federal do Amazonas como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: O ensino de Física Moderna no ensino médio.

Aprovada em 02 de agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br DENILSON DA SILVA BORGES
Data: 02/08/2024 12:21:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Denilson da Silva Borges - Orientador
Universidade Federal do Amazonas

Documento assinado digitalmente
gov.br ADALBERTO PICININ
Data: 02/08/2024 16:18:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Adalberto Picinin – Examinador 1
Universidade Federal de São Carlos

Documento assinado digitalmente
gov.br RITA DE CASSIA MOTA TEIXEIRA DE OLIVEIRA
Data: 02/08/2024 12:42:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Rita de Cássia Mota Teixeira de Oliveira – Examinador 2
Universidade Federal do Amazonas

À minha família, por todo apoio.

Ad Educationem

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela força e capacidade para superar todos os desafios.

Agradeço também à minha família, minha mãe Maria do Carmo Bezerra Teixeira, meu pai Raimundo Teixeira da Costa (*in memoriam*), meu irmão Arthur José Bezerra Teixeira, e em especial aos meus avós, Anice Barros Bezerra (*in memoriam*), Eduardina Teixeira da Costa e Vildo Teixeira da Costa, assim como, todos os tios, tias e primos que puderam de alguma forma contribuir para esta nobre conquista.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Denilson da Silva Borges, pela paciência e instrução na vida acadêmica, profissional inspirador que me ajudou a desbravar este e outros trabalhos ao longo do mestrado, muito obrigado mestre!

A minha querida Companheira Mariana Araujo Moraes pela paciência, amor, carinho, incentivo e a quem tenho grande admiração.

Aos meus amigos do mestrado, em especial Jéssica Ariana, Tiago Pereira, Soetânia Oliveria, José Carlos e Diego Lima, e demais colegas do mestrado, pela ajuda, conversas e companheirismo, valeu galera, consegui!

Aos colegas da Escola Estadual Nossa Senhora de Nazaré pelo apoio e Gestores Salomão e Adriano por toda a colaboração nos ajustes de horários de trabalho para que eu pudesse conciliar com os estudos.

Aos meus alunos que participaram da realização deste trabalho, obrigado.

A Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

Ao Instituto Federal do Amazonas – IFAM.

Ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, pela oportunidade de conceder a realização do curso.

Aos professores do MNPEF Polo 04 que contribuíram para minha formação através de suas aulas inspiradoras.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas por financiar meu curso de mestrado.

RESUMO

A busca por melhorias no ensino de física é intrinsecamente desafiadora e empolgante, exigindo dos profissionais, muitas das vezes, conhecimentos além da física, como no caso deste trabalho, onde se aborda o efeito Doppler-Fizeau em ondas Eletromagnéticas com uso de Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC). Especialmente, ao visualizar os trabalhos nesse âmbito, deparou-se com a limitação na abordagem deste efeito para ondas mecânicas. Com isso, o presente trabalho consiste em uma Sequência Didática (SD), norteadada pela Teoria de Aprendizagem Significativa (TAS) de Ausubel, voltada para as ondas eletromagnéticas. Dessa forma, empregaram-se as metodologias ativas, possibilitando ao estudante ser o protagonista do processo de ensino aprendizagem usando o Arduino. Sendo assim, investigaram-se os impactos que o uso de TDICs contribuiu para a aprendizagem, em especial na Física Moderna. Esta SD foi aplicada em uma turma da 3ª série do Ensino Médio durante 8 dias em etapas progressivas: (i) introdução, buscando familiarizar os participantes aos conceitos necessários e ao Arduino, (ii) desenvolvimento, contemplando atividades práticas de programação com Arduino e (iii) conclusão, que consistiu na aplicação experimental para investigar o fenômeno estudado em micro-ondas, que culminou em um observador de sinal de frequência doppler, medidor de velocidade por reflexão e simulação de porta automatizada. Portanto, esta SD expôs indícios de aprendizagem significativa constatados a partir de questionários, roda de conversa e observação contínua, que revelaram um aumento no desempenho. Assim, é notório a importância de tornar o ensino de física contextualizado, pois, verificou-se a conexão dos conceitos que anteriormente eram desconexos da realidade do estudante, serem então relacionados de forma substancial as aplicações tecnológicas, promovendo uma formação integral mediante a compreensão da conceitualização, procedimentos experimentais e atitudinais ao relacionar de forma crítica ao meio em que está inserido.

Palavras-chave: Efeito Doppler; Ondas Eletromagnéticas; Arduino; Metodologias Ativas.

ABSTRACT

The search for improvements in physics teaching is intrinsically challenging and exciting, often requiring professionals to have knowledge beyond physics, as in the case of this work, which addresses the Doppler-Fizeau effect in Electromagnetic waves using Digital Technologies. Information and Communication (TDIC). Especially, when viewing the work in this field, one came across the limitation in approaching this effect for mechanical waves. Therefore, the present work consists of a Didactic Sequence (SD), guided by Ausubel's Meaningful Learning Theory (TAS), focused on electromagnetic waves. In this way, active methodologies were used, enabling the student to be the protagonist of the teaching-learning process using Arduino. Therefore, the impacts that the use of TDICs contributed to learning, especially in Modern Physics, were investigated. This SD was applied to a 3rd grade high school class for 8 days in progressive stages: (i) introduction, seeking to familiarize participants with the necessary concepts and Arduino, (ii) development, including practical programming activities with Arduino and (iii) conclusion, which consisted of the experimental application to investigate the phenomenon studied in microwaves, which culminated in a doppler frequency signal observer, reflection speed meter and automated door simulation. Therefore, this DS exposed signs of significant learning found through questionnaires, conversation circles and continuous observation, which revealed an increase in performance. Thus, the importance of making physics teaching contextualized is clear, as it was possible to verify the connection of concepts that were previously disconnected from the student's reality, being then substantially related to technological applications, promoting comprehensive training through understanding the conceptualization, experimental and attitudinal procedures when relating critically to the environment in which it is inserted.

Keywords: Doppler effect; electromagnetic waves; Arduino; Active Methodologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capa da obra de Christian Andreas Doppler em 1842.....	19
Figura 2 – Demonstração de uma onda longitudinal em uma mola.....	23
Figura 3 - Propagação de um pulso transversal em uma corda.....	23
Figura 4 – Período (T) e Amplitude (A) da onda.....	24
Figura 5 - Comprimento de onda (λ) e Amplitude (A) da onda.....	24
Figura 6 - Onda progressiva em uma dimensão propagando-se em uma corda.....	25
Figura 7 – Referenciais da onda propagando-se na corda.....	25
Figura 8 – Transformação de Galileu para um pulso na corda (ponto azul) em dois referenciais inerciais.....	25
Figura 9 – Velocidade e aceleração discriminados em pontos da corda com propagação da onda unidimensional.....	27
Figura 10 - (a) onda sonora em um tubo com as moléculas do ar deslocadas da posição de equilíbrio.....	29
Figura 11 – Pressão realizada nas superfícies da esquerda e da direita em um fluido contido em um tubo.....	31
Figura 12 – Referenciais para fonte de onda sonora (S) e observador em movimento (S').....	35
Figura 13 – Referencial estático: análise da frente de onda 1 de uma fonte em relação ao observador estático.....	37
Figura 14 – Referencial estático: análise das frentes de onda 1 e 2 emitidos por fonte em movimento em relação ao observador estático e discriminação das distâncias percorridas (x_1 e x_2).....	37
Figura 15 – Onda eletromagnética: campo elétrico (E) e magnético (B) variáveis.....	39
Figura 16 – Espectro eletromagnético.....	42
Figura 17 – O movimento de uma fonte emissora de onda eletromagnética com observador em repouso.....	44
Figura 18 – Laboratório de informática da escola.....	56
Figura 19 – (A) Roda de conversa com a turma e (B) alunos respondendo o questionário inicial.....	63
Figura 20 – Segunda aula: (A) aula dialogada; (B) e (C) alunos desenvolvendo seus mapas conceituais – mapa 1.....	64
Figura 21 – Terceira aula: (A) aula dialogada; (B) e (C) alunos produzindo seus mapas conceituais – mapa 2.....	65

Figura 22 – Apresentação do hardware Arduino e software IDE no laboratório de informática.	66
Figura 23 – (A) Alunos desenvolvendo o código de programação e (B) equipes trocando informações sobre o código.....	66
Figura 24 – Equipes realizado a montagem do circuito elétrico Arduino-protoboard-LED vermelho.....	67
Figura 25 – (A) equipes desenvolvendo seu código de programação e (B) alunos discutindo a lógica de programação.....	68
Figura 26 – (A) alunos realizando a montagem do circuito elétrico do semáforo e (B) teste do código de programação do semáforo.....	68
Figura 27 – Aula dialogada: (A) breve contexto histórico e (B) descrição do fenômeno para ondas eletromagnéticas.....	69
Figura 28 – Mediador apresentando o sensor HB100 com suporte para conectar ao Arduino.	70
Figura 29 – etapas de verificação do gráfico do efeito Doppler-Fizeau: (A) equipes escrevendo o código do sensor HB100; (B) alunos da equipe de montagem do circuito elétrico; (C) alunos testando o Arduino com HB100.....	70
Figura 30 – (A) aluno analisando o gráfico plotado pelo Arduino com HB100; (B) professor mediador verificando com as equipes o gráfico do experimento.....	71
Figura 31 – Arduino e sensor HB100 conectados no notebook: (A) visão panorâmica; (B) visão frontal e (C) traseira do dispositivo experimental.....	72
Figura 32 – Funcionamento do sensor HB100.....	72
Figura 33 – Sensor HB100 programado para simular medidor de velocidade de veículos nas vias.....	73
Figura 34 – Sensor HB100 programado para simular porta automatizada do Shopping e aeroporto.....	73
Figura 35 – Alunos respondendo o questionário final.....	74
Figura 36 – Gráfico 1: panorama inicial de acertos e erros de cada participante identificados por letras.....	79
Figura 37 – Gráfico 2: panorama inicial do rendimento da turma por quantidade de acertos em comum.....	80
Figura 38 – Gráfico 3: porcentagem de acertos agrupada por questões com conteúdo semelhante.....	80
Figura 39 – Mapa 1: exemplar de mapa confeccionado pelo participante C.....	81
Figura 40 – Mapa 2 confeccionado pelo participante O.....	83

Figura 41 – Mapa conceitual desenvolvido pelo participante H.	86
Figura 42 – Mapa conceitual confeccionado pelo participante O.	87
Figura 43 – Exemplo de gráfico da frequência da onda detectada pelo sensor e plotada no Excel pelo Arduino.	88
Figura 44 – Gráfico 4: panorama final de acertos e erros de cada participante identificados por letras.	89
Figura 45 – Gráfico 5: panorama final do rendimento da turma por quantidade de acertos em comum.	90
Figura 46 – Gráfico 6: rendimento da turma diante das questões de efeito Doppler-Fizeau para onda mecânica e eletromagnética.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Organização dos dias de aplicação do produto educacional.....	57
--------------------------------------------------------------------------	----

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. Breve desenvolvimento histórico do efeito Doppler-Fizeau.....	19
2.2. Ondas e efeito Doppler-Fizeau.....	22
2.2.1. Ondas – Aspectos gerais.....	22
2.2.2. Ondas mecânicas e o Efeito Doppler-Fizeau.....	28
2.2.3. Ondas eletromagnéticas.....	39
2.2.4. Efeito Doppler-Fizeau relativístico.....	43
2.3. Trabalhos de efeito Doppler no ensino de física.....	46
3. METODOLOGIA.....	49
3.1. Metodologia da pesquisa.....	49
3.1.1. Local e agentes da pesquisa.....	49
3.1.2. Experimento exploratório.....	49
3.1.3. Método Utilizado.....	50
3.1.4. Etapas da Pesquisa.....	50
3.1.5. Coleta de dados.....	50
3.1.6. Análise de dados.....	50
3.2. Metodologia de ensino.....	50
3.2.1. Teoria de Aprendizagem.....	50
3.2.2. Conteúdo.....	54
3.2.3. Objetivo.....	54
3.2.4. A Sequência Didática.....	55
3.2.5. Aplicação do produto educacional.....	62
3.2.5.1. Momento 1 - Etapa introdutória.....	62
3.2.5.2. Momento 2 – Etapa de desenvolvimento.....	67
3.2.5.3. Momento 3 – Etapa de conclusão.....	69

4. RESULTADOS E ANÁLISES.....	75
4.1. Resultados e análises iniciais	75
4.2. Resultados e análises finais.....	77
4.2.1. Aula 1.....	77
4.2.2. Aula 2.....	81
4.2.3. Aula 3.....	82
4.2.4. Aula 4.....	83
4.2.5. Aula 5.....	84
4.2.6. Aula 6.....	85
4.2.7. Aula 7.....	87
4.2.8. Aula 8.....	88
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
REFERÊNCIAS	94
APÊNDICE A – Questionário inicial.....	96
APÊNDICE B – Slide aula 1: conceitos fundamentais das ondas.	97
APÊNDICE C – Material didático 1: conceitos fundamentais.....	98
APÊNDICE D – Material didático 2: grandezas ondulatórias.	99
APÊNDICE F – Material didático 3: Introdução a programação de Arduino com Led.	101
APÊNDICE G – Slide aula 3: efeito Doppler-Fizeau	104
APÊNDICE H – Material didático 4: efeito Doppler-Fizeau.....	106
APÊNDICE I – Material didático 5: programação do Arduino (gráfico de frequência).....	107
APÊNDICE J – Material didático 5: programação do Arduino (velocidade e Porta).....	110
APÊNDICE K – Questionário Final.....	112
APÊNDICE L – Produto Educacional.....	113

1. INTRODUÇÃO

Os desafios no âmbito educacional, enfatizando o papel do professor, se dá por um processo dinâmico, e uma vez que a sociedade evolui tecnologicamente, observam-se constantes mudanças no espaço onde o ser desenvolve-se, demandando conhecimento técnico científico do indivíduo para compreender os produtos que desempenham tarefas simples e complexas do dia a dia. Acerca disso, evidencia-se que o ensino de física engloba as discussões que proporcionam a inserção dos alunos no contexto do desenvolvimento científico pertinente a sua realidade, e conseqüentemente, a relevância de discutir formas para aprimorar a criticidade dos alunos e meios que tornem o conhecimento dos fenômenos físicos abordado em sala de aula significativo diante desse cenário de avanço contínuo.

Uma parcela desses desafios, no campo educacional da física, se dá em fazer o aluno perceber a relevância do objeto de estudo. Diante de vários fenômenos notáveis no cotidiano, o efeito Doppler é rotineiramente aplicado, podendo ser usado por sensores eletrônicos, tendo influência nas residências e demais locais e situações (portas de shopping, lâmpadas com sensor de movimento, radar de velocidade e entre outros).

Para discutir sobre o processo educacional, faz-se necessário, abordar os documentos norteadores do sistema educacional brasileiro que se dá além da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB). Assim, tem-se a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que diz respeito a,

[...] é um documento de caráter normativo que define o conjunto orgânico e progressivo de aprendizagens essenciais que todos os alunos devem desenvolver ao longo das etapas e modalidades da Educação Básica, de modo a que tenham assegurados seus direitos de aprendizagem e desenvolvimento, em conformidade com o que preceitua o Plano Nacional de Educação (PNE). Este documento normativo aplica-se exclusivamente à educação escolar, tal como a define o § 1º do Artigo 1º da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB, Lei nº 9.394/1996), e está orientado pelos princípios éticos, políticos e estéticos que visam à formação humana integral e à construção de uma sociedade justa, democrática e inclusiva, como fundamentado nas Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica (DCN). (BRASIL, 2018, p. 7).

Ao mencionar a formação humana sob um aspecto integral, é notório a relevância de inclusão do cidadão no processo de desenvolvimento tecnológico que está inserido. Ainda sobre as normativas da BNCC, as ciências da natureza devem ser comprometidas com o letramento científico da população (BNCC, pág. 547), e conforme supracitado, o estudo da ondulatória, especificamente o estudo do efeito Doppler, está presente na realidade brasileira. Dessa forma, a necessidade de abordagem desse conteúdo deve ir além do contexto da escola.

Concomitante a BNCC, tem-se o Plano Nacional Curricular (PCN), que de acordo com o Ministério de Educação (MEC),

Os Parâmetros Curriculares Nacionais nascem da necessidade de se construir uma referência curricular nacional para o ensino [...] que possa ser discutida e traduzida em propostas regionais nos diferentes estados e municípios brasileiros, em projetos educativos nas escolas e nas salas de aula. E que possam garantir a todo aluno de qualquer região do país, do interior ou do litoral, de uma grande cidade ou da zona rural, que frequentam cursos nos períodos diurno ou noturno, que sejam portadores de necessidades especiais, o direito de ter acesso aos conhecimentos indispensáveis para a construção de sua cidadania. (BRASIL, 1998, p. 9).

Conforme destacado, esse documento norteia orientações que abrangem todas as escolas do país, mantendo as especificidades culturais de cada região, assim, evidencia-se a necessidade de tornar palpável o conhecimento teórico da física, corroborando com a realidade tecnológica do polo industrial de Manaus, metrópole do estado do Amazonas a qual este trabalho será desenvolvido.

Nesse contexto, observa-se que para muitos alunos a física é vista como uma espécie de matemática, com vários problemas idealizados, e por vez fora de sua realidade. Tratar de aulas com esse caráter é contrário ao processo de ensino aprendizagem natural, uma vez que, não se pode dar significado aquilo que não é contundente com a realidade.

A demanda por profissionais da área da física é um dos empecilhos, e contextualizando esse trabalho, aplicado no interior do Amazonas, é notória a grande quantidade de professores de outras áreas que ministram aulas de física no ensino médio. Partindo da concepção de que um profissional de outra área comprometa-se com o ensino de física, é consequência que alguns conceitos não sejam abordados de forma cautelosa, atribuindo a essa ciência uma primazia pela matemática, assim, o efeito doppler no ensino médio é tratado muitas vezes apenas como um efeito matematizado e que ocorre com ondas sonoras, contudo sabe-se que este efeito é recorrente de ondas em geral (eletromagnéticas e mecânicas).

Nota-se que a relevância de aprender fazendo, tem se tornado objetivo das instituições, e para que isso ocorra é necessário docentes qualificados para trazer essas modalidades e espaço estrutural disponível no âmbito escolar. Portanto, a proposta dessa SD é possibilitar uma alternativa instrutiva de abordagem para o Efeito Doppler em sala de aula, proporcionando criticidade, inovação e inserção dos docentes e discentes ao contexto tecnológico corrente.

Com esses pressupostos, a proposta deste trabalho, trata-se de uma sequência didática (SD), aplicando a teoria de aprendizagem significativa (TAS) e metodologia ativa: aula dialogada; mapas conceituais; e experimentação. Dessa forma, será relacionado a teoria do fenômeno por meio de experiência prática, proporcionando a interação dos alunos com o Arduino e sensor Doppler, em que mediante instrução prévia, os estudantes poderão desenvolver três experimentos: (i) observação da frequência Doppler de onda eletromagnética; (ii) medidor de velocidade; (iii) sensor de aproximação para automação de portas. Com isso,

busca-se proporcionar um estudo motivador e ativo, além de inserção de novas práticas com uso de TDIC no ensino de física.

Assim, o objetivo geral consiste em investigar o uso de experimentos com TIC na abordagem da física moderna no ensino médio, visando analisar as contribuições na aprendizagem do Efeito Doppler-Fizeau para ondas eletromagnéticas, portanto, relativístico, e para isso, contemplou-se, a realização de levantamento bibliográfico voltado para o ensino de física com uso de Tecnologia de Informação e Comunicação no estudo do efeito Doppler; construção de uma sequência didática para o ensino de efeito Doppler-Fizeau em ondas eletromagnéticas a partir da TAS de David Ausubel; aplicação da sequência didática; compreensão da abordagem clássica e moderna da física no efeito Doppler-Fizeau; e análise dos impactos na aprendizagem ao final das SD.

O Capítulo 2 discutirá as fundamentações teóricas mediante ao que se propõe nesse trabalho, consistindo em três seções que versam sobre: desenvolvimento histórico do efeito Doppler; aspecto físico das ondas e do efeito Doppler-Fizeau; trabalhos relacionados ao efeito Doppler no ensino de física.

No Capítulo 3, discute-se a respeito das metodologias utilizadas nesse trabalho, tais como o aspecto da pesquisa e ensino, que a princípio serão norteados a partir de uma abordagem qualitativa e com experiência ativa exploratória.

No Capítulo 4, faz-se a análise dos resultados coletados, buscando visualizar a evolução dos estudantes com relação à compreensão do efeito doppler, levando em conta o aspecto comparativo das percepções prévias e posteriores à aplicação da sequência didática.

Nas Considerações finais, capítulo 5, abordam-se os resultados, permitindo reflexões sobre a eficiência do trabalho desenvolvido e as possibilidades para novas aplicações com abordagens em temáticas diferentes a partir do sensor HB100 acoplado ao Arduino. Além disso, constam ainda nesse trabalho, as referências bibliográficas consultadas e Apêndices com material instrucional para elaboração e aplicação deste produto educacional, confeccionado em etapas gradativas e passos cautelosamente descritos.

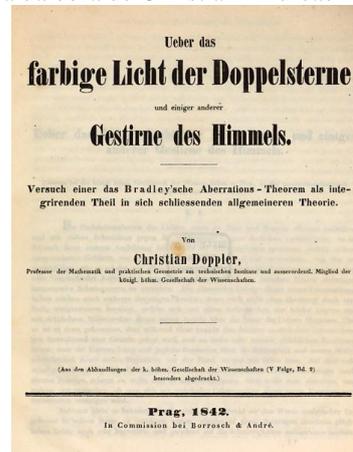
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados pressupostos teóricos para a contextualização deste trabalho, que versará sobre breve desenvolvimento histórico do efeito Doppler-Fizeau; a construção física do efeito Doppler-Fizeau; trabalhos de Efeito Doppler-Fizeau no ensino de física.

2.1. Breve desenvolvimento histórico do efeito Doppler-Fizeau

Esta seção discutirá a obra de Christian Andreas Doppler (1803 – 1853), publicada em 1842¹, proporcionando ao leitor o ponto de vista e algumas observações do próprio idealizador da teoria do Efeito Doppler.

Figura 1 – Capa da obra de Christian Andreas Doppler em 1842.



Fonte: DOPPLER, 1842.

Conforme descrito no trabalho pioneiro sobre o efeito Doppler-Fizeau, exposto na Figura 1, durante o ano de 1842, no dia 25 de maio, o austríaco Christian Andreas Doppler publica sua obra intitulada: “*Sobre a luz colorida das estrelas duplas e outras estrelas do céu. Tentativa de uma teoria geral que contém como parte integrante de si o Teorema da Aberração de Bradley*”, e neste trabalho o fenômeno que descreve uma alteração percebida na frequência de ondas devido o movimento relativo entre a fonte e observador foi idealizado, assim, conhecido então como efeito Doppler, em sua homenagem. Nessa obra publicada pelo autor, constam 11 seções, e dentre elas descreve-se a respeito do que pode ser percebido ao aproximar ou afastar-se de uma fonte, seja o som ou a luz, e para isso demonstra-se por meio de equações e esboços de experimentos mentais descritos no final da obra. Ressalta-se que em seu trabalho é discutido a respeito do efeito que o éter e o ar causam na percepção da tonalidade da luz e tom de uma onda sonora. Neste famoso trabalho, em sua primeira seção, Doppler menciona a

¹

primeira teoria da luz apresentada por Euler e Huygens e seus sucessores Young, Fresnel e Cauchy, etc. e destaca as dificuldades da aceitação e necessidade de fé nos resultados encontrados pelos próprios pesquisadores. Além destes, é comentado sobre Laplace e Poisson que discordam da teoria, porém admiram o desenvolvimento analítico. Ao final da seção é chamado a atenção do leitor para futuras divergências sobre a interpretação óptica da natureza, pois conforme os escritos em seu trabalho, era previsível uma disputa acirrada para a compreensão da luz e a insegurança dos resultados obtidos por estes famosos pesquisadores da época.

Em suas deduções, é possível observar que em seus experimentos mentais, Doppler afirma que se um observador se movimenta com a velocidade própria do som afastando-se de uma fonte sonora, ele jamais poderá ouvi-la e que na situação de a fonte afastar-se do observador com a velocidade do som, este ouvirá o som em uma oitava abaixo da frequência original. Na segunda seção do seu trabalho, Doppler explica a percepção dos “golpes de ondas” com mais ou menos intensidade usando um experimento mental que consiste em um navio deslocando-se em direção as ondas, e demonstra ao final que dessa forma é possível notar que para o observador (navio), as ondas possuem sua intensidade alterada dependendo do movimento contra ou a favor das ondas, porém, ao tentar visualizar esse efeito ocasionado pelas ondas de ar do éter torna-se difícil essa compreensão.

Nas seções 3 e 4, é feito o desenvolvimento da equação e discussão qualitativa proposta por doppler mostrando que na hipótese de movimento de afastamento do observador com velocidade própria da fonte torna-se impossível perceber a onda emitida e/ou em afastamento com velocidade menor que a própria ocorre a percepção com uma oitava abaixo. É interessante notar que em seu trabalho, a luz e o som são descritos como ondas e ambas se comportam de forma igual, logo, o comportamento do efeito Doppler para a luz foi previsto, porém, percebem-se apenas descrições qualitativas, conforme será exposto nas seções seguintes.

Sabemos que a velocidade da luz é dada por $c = 3.10^8 m/s$, porém, Doppler define a velocidade da luz em 67.592.448 m/s (42000 milhas/segundo). Nesse sentido, é mencionado pelo autor sobre o desvio que a luz branca ou roxa sofre ao afastar-se de um observador, até que desaparecesse. Além disso, fazem-se outras observações sobre as cores que uma fonte luminosa emite ao afastar-se, enfatizando que a luz de um corpo sofre mudança, alterando em uma sequência: violeta para azul, verde, amarelo, laranja, vermelho e até se tornar insensível para os olhos.

Na seção 6, são apresentadas conclusões pontuadas em: (1) alteração da cor de um corpo luminoso ou iluminado, e até mesmo o desaparecimento da luz de um corpo ao alcançar determinada velocidade; (2) fonte em repouso e observador em movimento, ocasionando o mesmo efeito citado anteriormente; (3) mudança na cor e intensidade da fonte devido movimento com determinado ângulo corroborado a teoria da aberração de Bradley.

Nas seções 7 e 8, discute-se sobre a velocidade dos planetas no sistema solar, que não são significativas para observar mudança de cor neles ou desaparecimento (completo ou temporário). Doppler supõe que, se a Terra possuísse velocidade dez vezes maior, seria observado a cor azul ou esverdeada das estrelas nas áreas orientais e as estrelas ocidentais com cores laranja ou vermelho. Ainda nesse sentido, é comentado sobre a possível alteração na coloração do cometa Halley. É interessante notar que o autor menciona que a velocidade de alguns corpos celestes depende de sua massa, e que poderiam até mesmo expor algumas aberrações, nesse caso, velocidade superior à da luz.

Nas seções 10 e 11, são feitas outras observações sobre as estrelas duplas fixas e outras variáveis. Por fim, Doppler destaca que Olauf Roemer havia descrito em seus trabalhos anteriores sobre a impossibilidade de que corpos celestes pudessem adquirir velocidades comparáveis à da luz, e que grandes velocidades poderiam provocar alterações nas cores emitidas por esses corpos.

Deste modo, podemos perceber que Doppler prevê um fenômeno que certamente é responsável por grandes aplicações tecnológicas civis e militares, no entanto, após a publicação desta obra, a comunidade científica da época atribuiu pouca importância as descobertas de Doppler, e somente no ano de 1845 comprova-se esse efeito experimentalmente, em que o meteorologista holandês Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot (1817-1890) demonstra o efeito acústico percebido ao colocar vários trompetistas em um vagão aberto puxado por uma locomotiva (HALLIDAY E RESNICK, 2016). Durante muito tempo, a teoria de Doppler foi rejeitada, mesmo após a comprovação experimental de Ballot, e posteriormente Ernst Mach em 1860, com um aparelho possibilitando visualizar esse efeito em laboratório e sem menção ao idealizador do fenômeno.

Após as contribuições iniciais de Doppler para a investigação deste efeito nas ondas, no ano de 1848, o físico francês Armand-Hyppolyte-Louis Fizeau (1819 – 1896), propõe que esse mesmo efeito no som seja possível ser observado em ondas luminosas e proporcionaria determinar a velocidade das estrelas em movimento na mesma linha do observador, sendo possível a aplicação em estrelas. No ano de 1900, o físico russo Aristarkh Appolonovich

Belopolsky (1854-1934) desenvolve instrumentos de observação capazes de comprovar as previsões realizadas por Doppler-Fizeau. (BASSALO, [s.d.]

A partir desses pressupostos históricos, observa-se que a teoria do efeito Doppler-Fizeau possuiu diversas contribuições de grandes pesquisadores do século XIX, e conseqüentemente vastas aplicações tecnológicas. Além destas contribuições, em 1905, Albert Einstein (1879-1955), físico alemão-suíço-norte-americano, descreve que é possível obter o efeito Doppler-Fizeau através de sua conhecida teoria da relatividade restrita. Dessa forma, integra-se ao efeito o comportamento relativístico (Efeito Doppler-Fizeau relativístico) (BASSALO, [s.d.]). Nas seções a seguir, serão descritas a ocorrência desse efeito em ondas mecânicas e eletromagnéticas com linguagem matemática do desenvolvimento desta teoria.

2.2. Ondas e efeito Doppler-Fizeau

No estudo da ondulatória, ao ser abordado no ensino médio, discute-se inicialmente a natureza das ondas e as conseqüências que estas sofrem ao interagir com determinados meios. Dentre os fenômenos que as ondas apresentam, enfatiza-se neste trabalho o Efeito Doppler, tendo em vista as inúmeras aplicações no cotidiano e formas alternativas de expor sua visualização mesmo com o uso de ondas eletromagnéticas (OEM).

O efeito Doppler, tal como é posto no ensino médio, pode dar entendimento que se resume em apenas uma equação com sinais variáveis, relacionando com percepções auditivas durante a aproximação ou afastamento de uma fonte, com referencial no receptor observador. Portanto, muitas das vezes é deixado de lado sua construção, interpretações qualitativas e quantitativas, assim como aplicações no cotidiano e menção a física moderna. Com essas lacunas supracitadas, será discutido a seguir as pontualidades do efeito Doppler-Fizeau, e para isso faz-se necessário uma abordagem sobre o estudo das ondas.

2.2.1. Ondas – Aspectos gerais

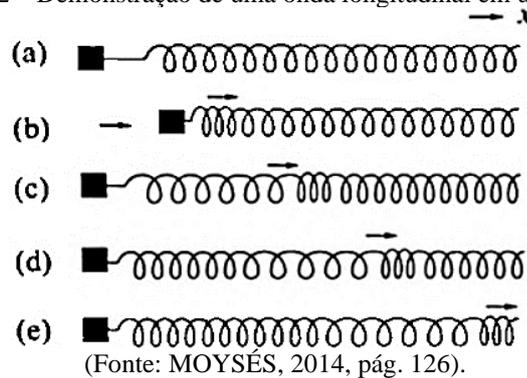
As descrições das ondas mecânicas, eletromagnéticas, e o efeito Doppler-Fizeau, feitas neste capítulo, foram realizadas a partir de referências bibliográficas utilizadas em cursos de graduação de licenciatura em física e engenharias (civil, mecânica e entre outras) nas disciplinas de física básica, como Halliday e Resnick; Moysés Nussenzveig; Young e Freedman, Sears e Zemansky; Tipler e Mosca; Kleber Daum Machado; e Griffiths. Dessa forma, interpretações, imagens, deduções e trechos das obras supracitadas, foram utilizadas para a confecção desta fundamentação teórica, particularmente, para o desenvolvimento deste trabalho.

As ondas, por definição, como descreve MOYSÉS (2014, p.125), “Num sentido muito amplo, uma onda é qualquer efeito (perturbação) que se transmite de um ponto a outro de um

meio. Em geral, fala-se de onda quando a transmissão do efeito entre dois pontos distantes ocorre sem que haja transporte direto de matéria de um desses pontos ao outro”.

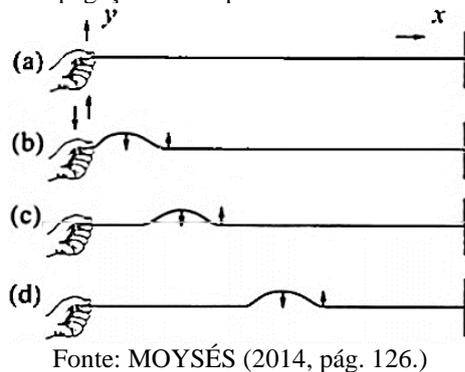
Partindo desta definição, podemos compreender que ao provocar a deformação no meio material, pode-se notar duas formas de propagação: longitudinal ou transversal. Para uma onda caracterizada como longitudinal, é observado que sua direção de propagação coincide com a direção de vibração, constituído de rarefações e compressões sucessivas no meio deformado em relação a um ponto de equilíbrio, ilustrado na Figura 2 abaixo.

Figura 2 – Demonstração de uma onda longitudinal em uma mola.



Nesta perspectiva, ao provocar uma perturbação em um ângulo ortogonal/perpendicular ao da direção de propagação, surge uma onda caracterizada como transversal, que pode ser visualizada na Figura 3 abaixo um exemplo desse tipo de onda em uma corda, onde nota-se a ocorrência de perturbação/vibração na direção vertical e a propagação da onda na horizontal.

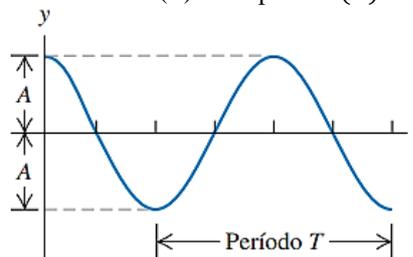
Figura 3 - Propagação de um pulso transversal em uma corda.



De modo geral, além dessa classificação, pode-se citar ainda quanto sua natureza (mecânicas ou eletromagnéticas), dimensão de propagação (unidimensional, bidimensional ou tridimensional), progressivas ou harmônicas, etc. (MOYSÉS, 2014). Algumas destas classificações serão descritas posteriormente.

Com isso, ao observar uma onda propagando-se em um meio, material ou não material, deve-se denotar algumas grandezas ondulatórias: Período (T), Frequência (f), Amplitude (A) e Comprimento de onda (λ). Define-se como Período (T) o tempo para a ocorrência de uma oscilação completa e a Frequência (f) consiste no número de repetições que uma onda realiza em uma unidade de tempo. Portanto, ambas são grandezas relacionadas ao tempo, em que para T temos a unidade de segundos (s) e para f adota-se o Hertz (Hz). A amplitude de uma onda está associada ao ponto de máximo (crista) ou mínimo (vale) de uma onda e seu ponto de equilíbrio, sendo assim, podemos visualizar tais grandezas na Figura 4 a seguir.

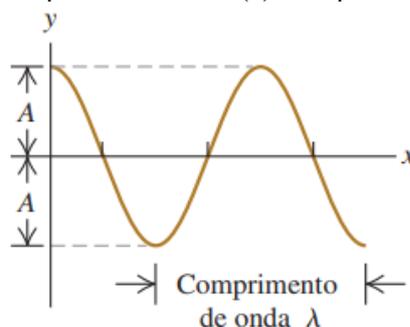
Figura 4 – Período (T) e Amplitude (A) da onda.



Fonte: YOUNG et al. (2016, p. 120).

O comprimento de onda (λ) está associado ao comprimento da onda para uma oscilação completa, dado em metros (m), ou seja, ao analisar uma onda, Figura 5, a distância entre duas cristas ou dois vales sucessivos correspondem ao (λ).

Figura 5 - Comprimento de onda (λ) e Amplitude (A) da onda.

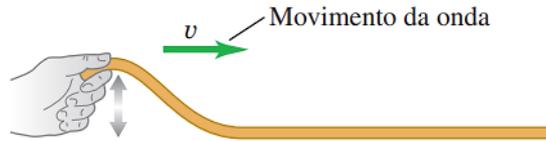


Fonte: YOUNG et al. (2016, p. 120).

Além destes parâmetros característicos das ondas, pode-se descrever matematicamente uma **equação de onda geral**, que será deduzida nos parágrafos a seguir, para todos os tipos de ondas (harmônicas ou progressivas), e a partir dessa equação de onda, retornar grandezas como: velocidade e aceleração.

Para isso, será tratado um caso simples, a propagação de uma onda em uma dimensão, portanto, adotaremos um pulso que se propaga em uma corda, conforme exposto na Figura 6 abaixo.

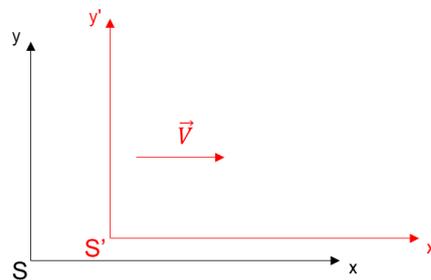
Figura 6 - Onda progressiva em uma dimensão propagando-se em uma corda.



Fonte: YOUNG et al. (2016, p. 114).

Na Figura 7 a seguir, adotando referenciais inerciais S (preto) para a posição da corda e S' para a posição em cada instante do pulso (vermelho) na corda, temos,

Figura 7 – Referenciais da onda propagando-se na corda.



Fonte: autor (2023).

Assim, descrevemos para a corda, no referencial S, uma função y dependendo da posição x em um instante de tempo t ,

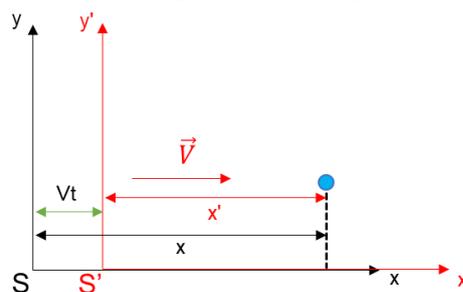
$$y(x, t) \rightarrow f(x, t) \quad (1)$$

Dessa forma, ao adotarmos o referencial S', consideramos que o observador se movimenta com o pulso, logo temos

$$y'(x', t) \rightarrow f(x', t) = \text{constante} \quad (2)$$

Note que para o observador posicionado no referencial do pulso, não há alteração. Vale ressaltar que o pulso (x') está no referencial S', e, portanto, possui velocidade (\vec{V}). Relacionando os dois referenciais inerciais por transformação de Galileu, em um instante de tempo $t = 0$, sendo $S \equiv S'$, obtemos a situação expressa na Figura 8 abaixo.

Figura 8 – Transformação de Galileu para um pulso na corda (ponto azul) em dois referenciais inerciais.



Fonte: autor (2023).

Logo, pode-se obter, para o movimento da onda unidimensional,

$$x' = x - Vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Essas condições estão fixadas para tempos iguais, $t = t'$, porém, sabe-se que com a relatividade restrita não é possível tempos iguais em referencias inerciais diferentes. Escrevendo a função da onda (1), que possui dependência de duas variáveis, em função de uma variável ao combinar com a função (2), obtemos

$$f(x, t) = f(x')$$

Substituindo x' , temos

$$f(x, t) = f(x - Vt) \quad (3)$$

Assim, a função (3) trata-se de uma função f de x e de t , o perfil da onda, para a propagação de uma onda unidimensional, que foi exemplificado através de um pulso em uma corda, mas que se aplica para qualquer onda. Considerando a situação de um segundo pulso em sentido contrário, deduz-se que,

$$f(x, t) = f(x - Vt) + g(x + Vt)$$

Em que o argumento $g(x'')$, pode ser deduzido da mesma forma que o argumento $f(x')$. A partir disso, a equação de movimento da onda dá-se através das derivadas parciais da função para determinar velocidade e aceleração.

Inicialmente, ao considerar a função (3), e sabendo que a velocidade desse pulso dependerá da posição x , pois esta não é igual em toda a extensão da corda, fixa-se a variável x e deriva-se parcialmente em relação ao tempo,

$$y(x, t) = f(x') \rightarrow x' = x - Vt$$

Observa-se que y depende de f , onde f depende de x' , e x' depende de t , logo uma função composta, onde aplicaremos a regra da cadeia e, portanto, a velocidade é dada pela equação (4) abaixo,

$$Velocidade = \frac{\partial y}{\partial t}(x, t) = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial (x - Vt)}{\partial t} = -V \frac{\partial f}{\partial x'} \quad (4)$$

Para a aceleração, aplica-se novamente a derivada parcial na equação da velocidade, portanto,

$$Aceleração = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial y}{\partial t} \text{ em que } y = \left(-V \frac{\partial f}{\partial x'}\right)$$

Analogamente, obtemos

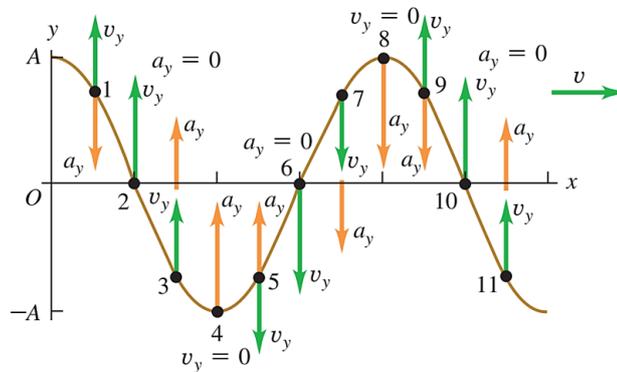
$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \left(-V \frac{\partial f}{\partial x'}\right) = -V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t}\right)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x, t) = -V \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} \left(\frac{\partial}{\partial t} (x - Vt) \right) = -V \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} (-V)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x, t) = V^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} \quad (5)$$

Onde, a equação (5) consiste na aceleração em um determinado ponto da corda. Em caso do movimento da corda com concavidade para cima, aceleração positiva, teremos que $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} > 0$, enquanto que, durante o momento da corda com concavidade para baixo, tem-se $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} < 0$, portanto, aceleração negativa. Conforme ilustrado na Figura 9 abaixo.

Figura 9 – Velocidade e aceleração discriminados em pontos da corda com propagação da onda unidimensional.



Fonte: YOUNG et al. (2016, p. 124).

A partir das equações deduzidas de $\frac{\partial y}{\partial t}$, foi possível determinar grandezas dessa onda, porém, analogamente, ao repetir o mesmo processo com uma mudança na dependência da derivação parcial de ∂t para ∂x , ou seja, aplicando a diferencial com dependência na coordenada x , obtém-se uma relação importante para a descrição da onda. Dessa forma,

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'}$$

Aplicando a segunda derivada parcial,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} \quad (6)$$

Observa-se que os resultados obtidos na equação (5) e na equação (6) são proporcionais, ressaltando que para a equação (5) temos,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2}$$

Para a equação 6 temos,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2}$$

Comparando as equações obtemos a seguinte relação,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

Lembre-se que podemos simplificar esta equação em termos do símbolo ∇ , chamado de operador diferencial *nabla*, sendo definido como um vetor, em que cada componente é expressa por derivadas parciais das coordenadas a serem utilizadas. Esse operador, ao ser realizado um produto escalar com ele mesmo ($\nabla \cdot \nabla$), resulta em um outro operador, denominado Laplaciano (∇^2), e em coordenadas retangulares é dado por,

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \nabla &= \left[\hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \right] \cdot \left[\hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \right] \\ \nabla^2 &= \hat{i} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \hat{j} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \hat{k} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{aligned}$$

Aplicando essa descrição na equação (7), considerando apenas a primeira parcela das coordenadas em x , podemos chegar em,

$$\nabla^2 y - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (7.1)$$

Dessa maneira, a equação (7) ou (7.1), é conhecida como **equação de onda unidimensional**, que possibilita descrever qualquer onda unidimensional, sendo esta uma equação de derivadas parciais linear de segunda ordem.

A importância dessa equação consiste na descrição posterior para o tratamento geral de ondas, inclusive as ondas eletromagnéticas, enfoque deste trabalho.

2.2.2. Ondas mecânicas e o Efeito Doppler-Fizeau

A partir desta abordagem, define-se as ondas mecânicas como ondas que necessitam de um meio material para se propagarem, com característica de vibração longitudinal ou transversal, onde provocam deslocamentos transversais nas partículas do meio, ou seja, na inexistência de matéria, não ocorrem ondas mecânicas.

O som, exemplo de onda mecânica, ao se propagar no ar, ocasiona variações na pressão devido as compressões e expansões em um determinado volume que implicam em alterações nas variáveis de estado (pressão e densidade) do meio. Sabendo que uma alteração na densidade provoca mudança na pressão, pode-se descrever a pressão (P) em relação a uma função de densidade (ρ),

$$P = f(\rho) \quad (8)$$

Para um regime de equilíbrio,

$$P_0 = f(\rho)_0 \quad (9)$$

Uma vez que as variações de pressão no meio em que ocorre a propagação da onda são pequenas, pode-se descrever como

$$P = P_0 + \delta P$$

Analogamente, para a densidade

$$\rho = \rho_0 + \delta \rho$$

Substituindo estas descrições da pressão e densidade na equação (8), tem-se

$$P_0 + \delta P = f(\rho_0 + \delta \rho)$$

Expandindo o segundo membro em série de Taylor até a primeira ordem,

$$P_0 + \delta P = f(\rho_0) + \delta \rho \left. \frac{df}{d\rho} \right|_{\rho=\rho_0} = P_0 + \delta P = f(\rho_0) + \delta \rho \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \quad (10)$$

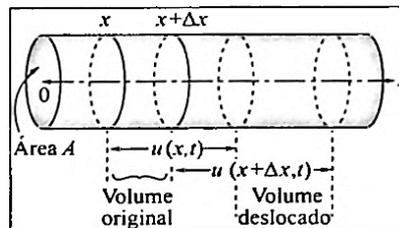
O índice zero refere-se ao ponto de equilíbrio e, ao comparar as equações (10) e (9), obtém-se uma relação de proporcionalidade direta entre a pressão e densidade,

$$\delta P = \delta \rho \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \quad (11)$$

Sendo o termo em parênteses uma constante de proporcionalidade. Portanto, a equação 11 expressa a relação pressão-densidade.

A Figura 10 abaixo, mostra uma onda sonora harmônica propagando-se em um tubo, explicitando a variação de volume devido a oscilação das moléculas do ar em torno do ponto de equilíbrio, e a partir disso, descreve-se essa onda em termos das variáveis de deslocamento, pressão e densidade. Vale ressaltar que, cada equação de deslocamento da onda, $u(x,t)$, é correspondente a uma equação de onda de pressão, $p(x,t)$ e densidade, $\rho(x,t)$.

Figura 10 - (a) onda sonora em um tubo com as moléculas do ar deslocadas da posição de equilíbrio.



Fonte: NUSSENZVEIG, 2016 (pág. 157).

Para a relação densidade-deslocamento, será considerado que o volume (V_a) original, sem perturbação é dado por,

$$V_a = A[(x + \Delta x) - x] = A\Delta x$$

E, após a perturbação, tem-se como volume (V_b),

$$V_b = A\{[(x + \Delta x) + u(x + \Delta x, t)] - [x + u(x, t)]\}$$

$$V_b = A\{\Delta x + [u(x + \Delta x, t) - u(x, t)]\}$$

$$V_b = A\Delta x \left\{ 1 + \left[\frac{u(x + \Delta x, t) - u(x, t)}{\Delta x} \right] \right\}$$

Para Δx muito pequeno, tem-se

$$\frac{u(x + \Delta x, t) - u(x, t)}{\Delta x} \approx \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$$

Logo, o volume novo (V_b) pode ser dado por

$$V_b = A\Delta x \left[1 + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right]$$

Sendo a massa inicial (M_a) do fluido dada pela relação

$$M_a = \rho_a V_a$$

Reescrevendo,

$$M_a = \rho_a A\Delta x$$

Para a massa nova (M_b), durante a perturbação, tem-se

$$M_b = \rho_b V_b$$

$$M_b = \rho_b A\Delta x \left[1 + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right]$$

Como a massa de fluido contido nos volumes é a mesma, podemos igualar M_a e M_b ,

logo

$$M_a = M_b$$

$$\rho_a A\Delta x = \rho_b A\Delta x \left[1 + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right]$$

$$\rho_a = \rho_b \left[1 + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right]$$

Pode-se substituir ρ_b por $\rho_a + \delta\rho$, indicando que a densidade nova é dada pela soma entre a densidade antes da perturbação e uma variação de pressão ($\delta\rho$) devido a perturbação, assim,

$$\rho_a = (\rho_a + \delta\rho) \left[1 + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right]$$

$$\rho_a = \rho_a + \rho_a \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + \delta\rho + \delta\rho \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$$

$$\delta\rho = -\rho_a \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} - \delta\rho \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$$

Adotando que as perturbações são mínimas, desconsidera-se as parcelas de segunda ordem, portanto tem-se

$$\delta\rho = -\rho_a \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \quad (12)$$

Esta equação (12) traduz a relação densidade-deslocamento associada a onda de deslocamento.

A relação pressão-deslocamento deduz-se a partir da 2ª Lei de Newton, considerando as massas M_a e M_b , e sendo a pressão dada pela razão entre força (F) e área (A), enfatizando que no fluido será aplicado duas forças, devido as pressões atuando no sentido da esquerda (P_e) e da direita (P_d), conforme a Figura 11 abaixo

Figura 11 – Pressão realizada nas superfícies da esquerda e da direita em um fluido contido em um tubo.



Fonte: autor (2023).

A partir dessa descrição, é necessário obter as forças da esquerda e direita ocasionada pela pressão na superfície desse fluido, uma vez que a pressão se define pela razão entre a força (F) e a área (A), logo

$$F_e = P(x, t)_e A$$

$$F_d = -P(x + \Delta x, t)_d A$$

Assim, a força resultante é dada por

$$F = F_e + F_d = A[P(x, t)_e - P(x + \Delta x, t)_d] \quad (13)$$

Derivando a pressão em relação a x ,

$$\frac{\partial P}{\partial x} \approx \frac{P(x, t)_e - P(x + \Delta x, t)_d}{\Delta x}$$

Reescrevendo a equação (13)

$$F = -A\Delta x \frac{\partial P}{\partial x}$$

Caracterizando a alteração na pressão como,

$$P = P_a + \delta P$$

Substituindo na equação (13) e derivando parcialmente,

$$F = -A\Delta x \frac{\partial(P_a + \delta P)}{\partial x} = -A\Delta x \left[\frac{\partial(P_a)}{\partial x} + \frac{\partial(\delta P)}{\partial x} \right] = -A\Delta x \left[\frac{\partial(P_a)}{\partial x} + \frac{\partial(\delta P)}{\partial x} \right]$$

Para a pressão inicial (P_a) sendo constante, logo a derivada é igual a zero, resultando em

$$F = -A\Delta x \frac{\partial(\delta P)}{\partial x}$$

Descrevendo a massa M_a a partir da densidade ρ_a

$$\rho_a = \frac{M_a}{V_a}$$

$$M_a = \rho_a V_a$$

$$M_a = \rho_a A\Delta x$$

Por fim, substituindo na segunda Lei de Newton a força, massa e a aceleração em relação ao deslocamento x , temos

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$-A\Delta x \frac{\partial(\delta P)}{\partial x} = \rho_a A\Delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial(\delta P)}{\partial x} = \rho_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Reescrevendo,

$$\rho_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial(\delta P)}{\partial x} \quad (14)$$

Ou,

$$\rho_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial(\delta P)}{\partial x} = 0 \quad (14.1)$$

A equação (14) acima, trata-se da relação pressão-deslocamento.

A importância destas descrições, justifica-se pelo fato de interpretar a propagação da onda conforme a equação geral de onda (equação 7), e, a partir disso, pode-se escrever uma equação que descreva a onda em função somente da pressão, densidade ou deslocamento.

Para a equação da onda de pressão, substituindo a relação pressão-densidade (equação 11) e densidade-deslocamento (equação 12) na relação pressão-deslocamento (equação 14), onde a equação (14) fica,

$$\delta\rho = -\rho_a \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$$

$$\rho_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(-\rho_a \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right) \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \right]$$

Resultando em,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (15)$$

Esta equação consiste na equação de deslocamento da onda, e comparando com a equação geral da onda unidimensional,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

Podemos obter a relação para a velocidade como,

$$v^2 = \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0$$

Assim, reescrevendo a equação para a forma geral

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (15.1)$$

Multiplicando os membros por $1/v^2$, resulta em

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \frac{1}{v^2} = 0 \quad (15.2)$$

Sendo esta a equação de deslocamento da onda (15.2). Para a obtenção da equação da onda de pressão, usa-se o mesmo procedimento de substituições entre as relações. Tomando a equação (14) e derivando parcialmente os membros em função do deslocamento (x), obtém-se

$$\begin{aligned} \rho_a \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= - \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial(\delta P)}{\partial x} \\ \rho_a \frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{\partial u}{\partial x} &= - \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (16)$$

Onde, a partir da equação (12), isola-se o termo $\frac{\partial u}{\partial x}$

$$\begin{aligned} \delta \rho &= -\rho_a \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} &= - \frac{\delta \rho}{\rho_a} \end{aligned} \quad (17)$$

Substituindo (17) em (16),

$$\begin{aligned} \rho_a \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(- \frac{\delta \rho}{\rho_a} \right) &= - \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2(\delta \rho)}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (18)$$

A relação de proporcionalidade desta equação nos permite escrever a equação da onda em termos apenas da variável de pressão ou densidade, assim, para a pressão, isola-se a densidade na equação (11)

$$\begin{aligned} \delta P &= \delta \rho \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \\ \delta \rho &= \delta P \cdot \frac{1}{\left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0} \\ \delta \rho &= \frac{1}{v^2} \delta P \end{aligned}$$

Substituindo na equação (18),

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{1}{v^2} \delta P \right) &= \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} \\ \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial t^2} &= 0\end{aligned}\quad (19)$$

Sendo esta equação a descrição da onda de pressão em função do deslocamento da onda obedecendo a equação geral da onda.

A onda de densidade é dada a partir da equação (18), com a substituição dada pela equação 11, temos que,

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\delta\rho \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \right]\end{aligned}$$

Substituindo v^2 ,

$$\frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial x^2}$$

Multiplicando os membros por $1/v^2$,

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} v^2 \frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial x^2}$$

Resulta,

$$\begin{aligned}\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2(\delta\rho)}{\partial t^2} &= 0\end{aligned}\quad (20)$$

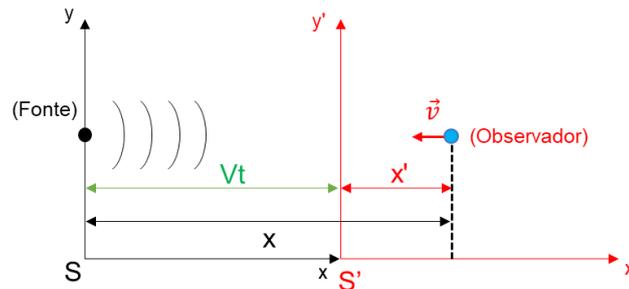
Logo, temos a equação de onda de densidade, conforme a equação geral da onda. Com as deduções dadas nas equações (15.2), (19) e (20), tem-se a fundamentação para a descrição da onda mecânica que obedecem a equação de onda unidimensional estabelecida anteriormente, e a partir destas descrições é possível analisar fenômenos ondulatórios, neste caso, referindo-se especificamente ao Efeito Doppler acústico.

Sendo assim, o efeito Doppler é um dos fenômenos que ocorre de modo geral em ondas, e consiste na percepção de mudança na frequência detectada em relação à frequência emitida por uma fonte devido o movimento relativo entre fonte e observador. Outro ponto relevante, consiste nos movimentos de aproximação da fonte em relação ao observador, e nesse

caso a frequência é aumentada, e movimento de afastamento da fonte em relação ao observador, e aqui a frequência percebida é inferior àquela emitida.

Para isso, inicialmente será deduzido a partir de uma **fonte sonora (harmônica) estacionário com observador em movimento**, conforme descrito na Figura 12 abaixo.

Figura 12 – Referenciais para fonte de onda sonora (S) e observador em movimento (S').



Fonte: autor (2023).

A partir da descrição dos referenciais, para o referencial S' no observador, descrevemos,

$$x' = x + Vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Onde V , é dado como a velocidade do observador aproximando-se da fonte.

Considerando a fonte emitindo uma onda sonora harmônica, com equação de deslocamento dada por,

$$U(x, t) = U \cos(kx - \omega t + \varphi) \quad (21)$$

E, para obter a equação da onda de pressão, substituindo a equação (12)

$$\delta\rho = -\rho_a \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$$

Na equação (11),

$$\delta P = \delta\rho \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0$$

Tem-se, portanto

$$\delta P = -\rho_a \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0$$

Sabendo que $\frac{dP}{d\rho} = v^2$,

$$\delta P = -\rho_a v^2 \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \quad (22)$$

Aplicando a derivada parcial na equação de deslocamento,

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -Uk \text{Sen}(kx - \omega t + \varphi)$$

Substituindo na equação (22),

$$\begin{aligned} \delta P &= -\rho_a v^2 [-Uk \text{Sen}(kx - \omega t + \varphi)] \\ \delta P &= \rho_a v^2 Uk \text{Sen}(kx - \omega t + \varphi) \end{aligned}$$

Onde os termos em destaque, constituem a amplitude máxima da onda de pressão ($P_{\text{máx}}$), logo, onda de pressão é dada pela equação X abaixo,

$$\delta P = P_{\text{máx}} \text{Sen}(kx - \omega t + \varphi)$$

Sendo x , descrito pelo referencial S , obtém-se

$$\begin{aligned} P(x, t) &= P \text{Cos}[K(x' - Vt) - \omega t + \varphi] \\ P(x, t) &= P \text{Cos}[Kx' - KVt - \omega t + \varphi] \\ P(x, t) &= P \text{Cos}[Kx' - t(Kv + \omega) + \varphi] \end{aligned}$$

Onde o termo entre parênteses é descrito como ω' , assim

$$P(x, t) = P \text{Cos}[Kx' - t\omega' + \varphi]$$

Sabendo que através da equação da velocidade de propagação, expressa na equação (23) abaixo,

$$v = \lambda f \quad (23)$$

Sendo que, para uma onda periódica tem-se

$$\begin{aligned} f &= \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{frequência}) \\ \lambda &= \frac{2\pi}{K} \quad \text{ou} \quad K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{número de onda}) \end{aligned}$$

Substituindo estas definições na equação (23), determina-se a frequência angular em função da velocidade e número de onda, logo

$$\begin{aligned} \omega &= Kv \quad (\text{referencial } S) \\ \omega' &= K(v + V) \quad (\text{referencial } S') \end{aligned}$$

Relacionando a frequência angular ω e ω' nos referenciais S e S' , dá-se

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{f'}{f_0} = \frac{Kv + KV}{Kv} = 1 + \frac{V}{v}$$

Portanto, obtemos a equação (24) da frequência aparente (f')

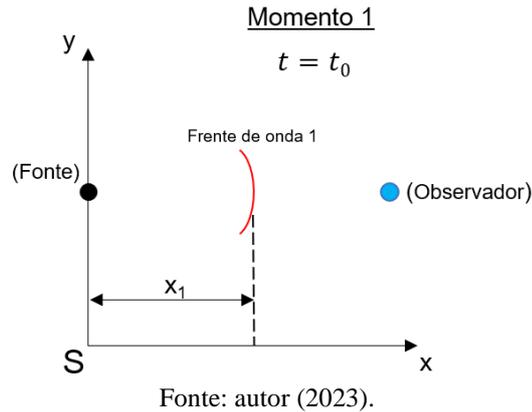
$$f' = f_0 \left(1 \pm \frac{V}{v}\right) \quad \text{ou} \quad f' = f_0 \left(\frac{v \pm V}{v}\right) \quad (24)$$

Note que, o sinal dos parênteses será positivo em caso de aproximação do observador na direção da fonte, logo a frequência aparente da fonte é maior que a original, e negativo em caso de afastamento do observador em relação a fonte, e consequentemente frequência aparente

menor que a original. Sabendo que, o termo (f'), refere-se a frequência percebida pelo observador, (f_0) a frequência da onda emitida pela fonte, (v) trata-se da velocidade do som no meio de propagação e (V) a velocidade do observador em relação a fonte.

Para o caso de um **observador estacionário e uma fonte em movimento**, temos a seguinte análise na Figura 13 abaixo,

Figura 13 – Referencial estático: análise da frente de onda 1 de uma fonte em relação ao observador estático.

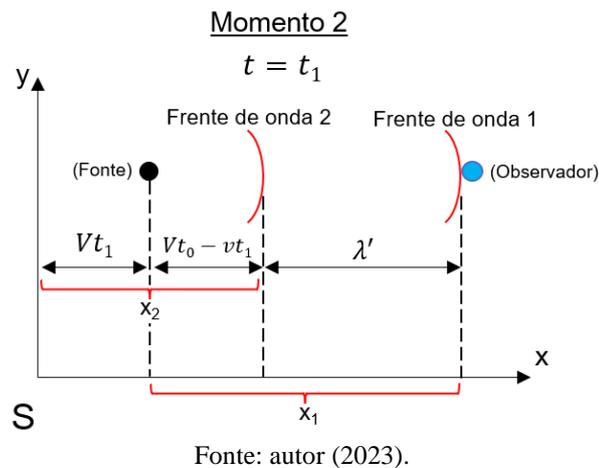


Para a distância percorrida pela primeira frente de onda emitida no tempo $t=t_0$, tem-se que,

$$x_1 = vt_0$$

Sendo (v) referente a velocidade do som no meio e (t_0) o tempo de propagação dessa onda no espaço (x_1). Enquanto, que no momento da emissão da segunda frente de onda, tem-se a fonte deslocando-se, conforme descrito na Figura 14 abaixo,

Figura 14 – Referencial estático: análise das frentes de onda 1 e 2 emitidos por fonte em movimento em relação ao observador estático e discriminação das distâncias percorridas (x_1 e x_2).



Considerando as informações destacadas na Figura 12 acima, podemos descrever o deslocamento para a segunda emissão de onda (frente de onda 2), sabendo que (V) refere-se a velocidade de deslocamento da fonte, assim,

$$x_2 = vt_0 - vt_1 + Vt_1$$

Sendo conhecido a distância das duas frentes de onda (cristas), pode-se descrever o comprimento de onda percebido pelo observador (λ'), assim,

$$\lambda' = x_1 - x_2$$

$$\lambda' = vt_0 - v(t_0 - t_1) - Vt_1$$

Portanto, o comprimento de onda aparente fica,

$$\lambda' = (v - V)t_0$$

Onde temos para o comprimento de onda da fonte descrito por

$$\lambda_0 = \frac{v}{f} = vT = vt_0$$

Assim, relacionando λ_0 e λ' , obtemos

$$\frac{\lambda'}{\lambda_0} = \frac{(v - V)t_0}{vt_0} = \frac{v - V}{v}$$

Ou,

$$\frac{\lambda'}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{V}{v}\right) = \lambda_0 \left(1 - \frac{V}{v}\right) \quad (25)$$

Sendo, a frequência da fonte (f_0) e a frequência aparente (f'), possibilita-se descrever o comportamento da frequência detectada relacionando com a Equação (25) acima,

$$\frac{\lambda'}{\lambda_0} = \frac{f'}{f_0} = \frac{1}{\left(1 - \frac{V}{v}\right)}$$

Logo, a frequência aparente para o observador estacionário com fonte em movimento, é dado pela equação (26) abaixo,

$$f' = \frac{f_0}{\left(1 - \frac{V}{v}\right)} \quad (26)$$

O sinal negativo refere-se ao caso estudado como exemplo, portanto, usa-se para o caso de fonte aproximando do observador estático, assim tem-se uma frequência maior que a real, e em caso contrário, durante o afastamento, aplica-se o sinal positivo, logo a frequência tenderá a ser menor que a original.

Para a situação de **fonte e observador em movimento**, pode ser descrito comparando-se os termos que multiplicam nas equações (24) e (26), logo, temos que,

$$f' = f_0 \left(\frac{1 + \frac{u}{v}}{1 - \frac{V}{v}}\right) \quad (27)$$

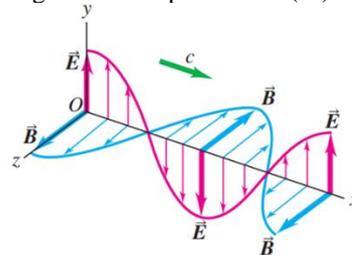
$$f' = f_0 \left(\frac{1 - \frac{u}{v}}{1 + \frac{V}{v}}\right) \quad (28)$$

Sendo na equação (27), a descrição da frequência percebida pelo observador devido o encontro (aproximação mútua) entre fonte e observador, enquanto que, na equação (28), corresponde ao movimento de afastamento mútuo entre fonte e observador. Dessa forma, com a descrição explícita do efeito Doppler para uma onda mecânica, na seção seguinte, aborda-se este fenômeno para o âmbito de ondas eletromagnéticas.

2.2.3. Ondas eletromagnéticas

Por definição, as OEM descrevem-se como ondas que se propagam mesmo na ausência de um meio material (vácuo) e com velocidade $c = 299.792.458$ m/s. Além disso, possuem vibrações transversais de campo elétrico e magnético perpendiculares entre si e a direção de propagação, sendo as componentes dessa onda, conforme exposto na Figura 15.

Figura 15 – Onda eletromagnética: campo elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{B}) variáveis.



\vec{E} : somente componente y
 \vec{B} : somente componente z

Fonte: YOUNG et al. (2016, p. 421).

Dentre essas ondas temos: micro-ondas, ondas de radar, televisão, rádio, etc. (HALLIDAY, 2009). As ondas eletromagnéticas foram descritas por James Clerk Maxwell, e em 1864 sugeriu a hipótese de explicar todo o comportamento dos fenômenos eletromagnéticos a partir de quatro equações a derivadas parciais. Tais equações são conhecidas como As equações de Maxwell na forma diferencial (GRIFFITHS, 2013).

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (29)$$

Para o espaço na ausência de carga e correntes elétricas, temos

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (29.1)$$

A equação (29) é conhecida como Lei de Gauss-Coulomb, onde o fluxo de campo elétrico (E) em dada superfície fechada é, na verdade uma medida da carga total dessa superfície, isto porque as linhas de campo têm origem na carga positiva, logo atravessam a superfície, e findam em uma negativa, na região interna da superfície (GRIFFITHS, 2013).

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (30)$$

A equação (30) não possui uma nomenclatura específica, mas pode-se dizer que é a Lei de Gauss magnética ou Lei da ausência do monopolo magnético, logo, descreve que a divergência do vetor densidade de fluxo magnético (B) é zero (GRIFFITHS, 2013).

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (31)$$

A equação (31) é chamada de Lei de Faraday ou Lei da indução magnética, descrevendo a circulação do campo elétrico (rotacional) em função do tempo no campo magnético que induz um campo elétrico solenoidal com linhas fechadas, devido a não existência de cargas magnéticas monopulares (GRIFFITHS, 2013).

$$\nabla \times B = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (32)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (32.1)$$

A equação acima (32.1) é a contribuição de Maxwell na Lei de Ampère, descrevendo que as cargas em movimento ou a variação do campo elétrico em função do tempo, podem produzir campo magnético de natureza solenoidal com linhas fechadas (GRIFFITHS, 2013).

A partir das equações (31) e (32), pode-se descrever a equação de onda das ondas eletromagnéticas, e para isso, será dado a descrição de uma onda eletromagnética para uma região sem correntes e cargas elétricas, conforme a definição dada pela equação de onda (7). Para isso, aplica-se o rotacional nas equações (31) e (32), assim,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \times \left[\frac{d\vec{B}}{dt} \right]$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \nabla \times \left[\mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \right]$$

Para o primeiro membro aplica-se a propriedade do rotacional para o rotacional de um vetor, e no segundo membro permutando o rotacional com a derivada parcial, temos que,

$$\nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} [\nabla \times \vec{B}] \quad (33)$$

$$\nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} [\nabla \times \vec{E}] \quad (34)$$

Na equação (33), verifica-se que no primeiro membro recai-se na definição da equação (29.1) e (30), enquanto que no segundo membro recaímos na equação (34.1), resultando em

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right]$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (35)$$

Na equação (34), de forma análoga, tem-se as definições que são aplicadas no primeiro e segundo membro, logo

$$\begin{aligned} -\nabla^2 \vec{B} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right] \\ \nabla^2 \vec{B} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (36)$$

Aplicando o Laplaciano na equação (35),

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) (E_x \hat{X} + E_y \hat{Y} + E_z \hat{Z}) &= \mu_0 \varepsilon_0 \left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} (E_x \hat{X} + E_y \hat{Y} + E_z \hat{Z}) \right] \\ \nabla^2 E_x \hat{X} + \nabla^2 E_y \hat{Y} + \nabla^2 E_z \hat{Z} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x \hat{X} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_y \hat{Y} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_z \hat{Z} \end{aligned}$$

Aplicando o Laplaciano na equação (36),

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) (B_x \hat{X} + B_y \hat{Y} + B_z \hat{Z}) &= \mu_0 \varepsilon_0 \left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} (B_x \hat{X} + B_y \hat{Y} + B_z \hat{Z}) \right] \\ \nabla^2 B_x \hat{X} + \nabla^2 B_y \hat{Y} + \nabla^2 B_z \hat{Z} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_x \hat{X} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_y \hat{Y} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_z \hat{Z} \end{aligned}$$

Utilizando as componentes em X do desenvolvimento do Laplaciano para a onda do campo elétrico e do campo magnético, temos,

$$\nabla^2 E_x \hat{X} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x \hat{X} \quad (37)$$

$$\nabla^2 B_x \hat{X} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_x \hat{X} \quad (38)$$

Comparando estas equações com a definição da equação de onda dada por,

$$\nabla^2 y - \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

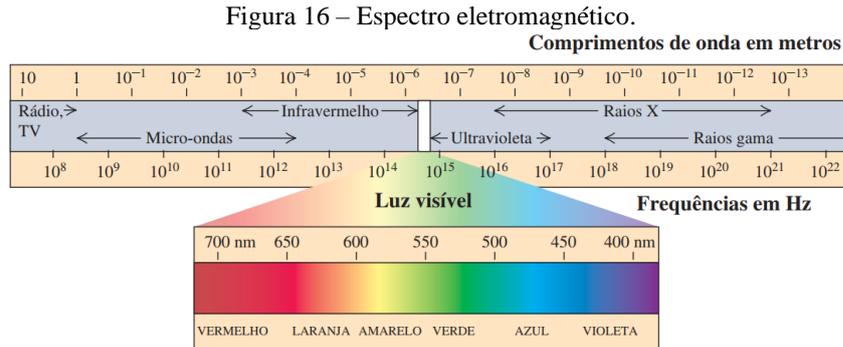
Observamos que ambas, (37) e (38), são as equações que descrevem uma onda eletromagnética, e se comportam de acordo com a definição. Além disso, vale a seguinte relação,

$$\begin{aligned} \mu_0 \varepsilon_0 &= \frac{1}{V^2} \\ V &= \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \end{aligned} \quad (39)$$

Dessa forma, com a equação (39) é possível determinar a velocidade de propagação (V) da onda propagada pelo campo elétrico e magnético (eletromagnética) no vácuo, uma vez que a velocidade de uma onda depende do meio, sendo (ε) a propriedade magnética e (μ) a propriedade elétrica. Sabendo que para o vácuo temos ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} C^2/Nm^2$), e ($\mu_0 =$

$4\pi \cdot 10^{-7} NA^2$), encontramos aproximadamente $c = 3 \cdot 10^8 m/s$, portanto, a famosa velocidade da luz (c) no vácuo (GRIFFITHS, 2013).

Dentre essas peculiaridades, pode-se descrever o espectro eletromagnético, onde é possível observar ondas eletromagnéticas com frequências e comprimento de onda diferentes, conforme exposta na Figura 16 abaixo.



Fonte: YOUNG; FREEDMAN. (2020, p. 414).

Conforme fora realizado a dedução para ondas mecânicas, dada pela equação (7), o campo elétrico e magnético pode ser abordado a partir de ondas eletromagnéticas planas descritas pelas equações (36) e (37), comprovadas anteriormente como ondas transversais e em fase,

$$\vec{E}(x, t) = \hat{j} E_M \text{Sen}(kx - \omega t) \quad (40)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{K} B_M \text{Sen}(kx - \omega t) \quad (41)$$

Onde, E_M e B_M representam a amplitude, em que através da Lei de Faraday, equação (31), obtém-se uma relação entre as amplitudes de campo elétrico e magnético, a saber,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Efetuada primeiramente o rotacional do campo elétrico (40),

$$\nabla \times \vec{E} = \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & E_M \text{Sen}(kx - \omega t) & 0 \end{bmatrix}$$

Resultando em,

$$\nabla \times \vec{E} = k E_M \text{Cos}(kx - \omega t) \hat{k} \quad (40.1)$$

Em seguida, a derivada parcial do campo magnético (41) no tempo resulta em

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial B}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial t}[\hat{K}B_M \text{Sen}(kx - \omega t)] \\
-\frac{\partial B}{\partial t} &= B_M \omega \text{Cos}[kx - \omega t] \hat{K}
\end{aligned} \tag{41.1}$$

Portanto, com esses resultados, na Lei de Faraday, fica

$$kE_M \text{Cos}(kx - \omega t) \hat{k} = B_M \omega \text{Cos}[kx - \omega t] \hat{K}$$

$$kE_M = B_M \omega$$

$$\frac{E_M}{B_M} = \frac{\omega}{k}$$

Sabendo que,

$$\omega = 2\pi f \quad \text{e} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Resulta em,

$$\frac{E_M}{B_M} = \lambda f = c \tag{42}$$

Logo, a partir da equação (42), conclui-se que esses campos se propagam com a velocidade da luz c , sendo transversais entre si e a direção de propagação, e estão em fase em todos os pontos do espaço.

A partir destes pressupostos, descreve-se uma onda eletromagnética, e assim como o som, esta onda pode sofrer fenômenos ondulatórios, dentre eles, destacamos o efeito Doppler-Fizeau, tema este que será abordado na seção a seguir.

2.2.4. Efeito Doppler-Fizeau relativístico

Nesta seção, discute-se o efeito Doppler-Fizeau para uma onda eletromagnética, e para isso será incorporado termos da relatividade restrita e por fim a dedução desse efeito para uma fonte que emite frentes de onda eletromagnética.

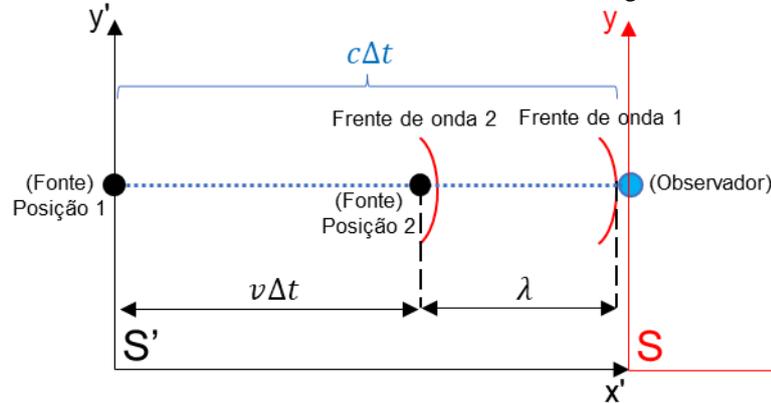
A necessidade da descrição relativística em relação ao efeito Doppler-Fizeau para OEM, deve-se ao fato de que na mecânica newtoniana é considerado um referencial inercial privilegiado e o tempo é absoluto. Além disso, a relatividade (transformação) de Galileu ao tratar da adição de velocidades em referenciais inerciais distintos, torna-se incompatível com a descrição das equações de Maxwell, pois a velocidade da luz é constante para qualquer direção e sentido de propagação (MACHADO, 2002).

Ao introduzir a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), desenvolvida por Einstein em 1905, tem-se dois postulados que em linhas gerais descrevem as leis da física permanecendo iguais para quaisquer referenciais inerciais e a velocidade da luz constante com velocidade definida (c) (PIRES, 2011).

A partir disso, os efeitos estendem-se para o estudo das ondas eletromagnéticas, uma vez que possuem velocidade (c), conseqüentemente implicando no efeito Doppler-Fizeau, resultando em alterações no tempo de detecção com os incrementos do fator de dilatação temporal (transformação de Lorentz), comprimento de onda e frequência aparente.

Na Figura 17 abaixo demonstra-se a situação utilizada para explicitar a dedução matemática que descreve tal fenômeno ondulatório.

Figura 17 – O movimento de uma fonte emissora de onda eletromagnética com observador em repouso.



Fonte: autor (2023).

Nota-se que a distância percorrida pela fonte está descrita como $v\Delta t$, onde $c\Delta t$ representa a distância percorrida pela frente de onda 1, com c sendo a velocidade de propagação da luz emitida, e o comprimento de onda λ descrevendo a distância entre duas cristas. A fonte assume duas posições, em que a posição 1, caracteriza-se como o momento de emissão da frente de onda 1, enquanto que a posição 2 refere-se ao momento em que a frente de onda 2 é emitida. Portanto, a frente de onda 2 foi emitida quando a fonte e a frente de onda 1 assumiram as posições descritas na Figura 11 acima.

Dessa forma, a frequência detectada pelo observador, é dada por

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Das descrições do problema na figura anterior, temos

$$c\Delta t = v\Delta t + \lambda$$

$$\lambda = \Delta t(c - v) \quad (43)$$

Sabendo que,

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Substituindo em (25),

$$\begin{aligned} \frac{c}{f} &= \Delta t(c - v) \\ f &= \frac{c}{\Delta t(c - v)} \end{aligned} \quad (44)$$

De acordo com a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), os tempos nos referenciais são diferentes, logo,

$$t_0 = \text{tempo próprio}$$

$$t = \text{tempo para o observador}$$

Sendo, o tempo próprio referente ao referencial S' da fonte, na qual as ondas são emitidas em intervalos de tempo iguais, porém para o observador há divergência no tempo de detecção, assim, de acordo com a TRR, o intervalo de tempo para o observador é descrito pela relação

$$\Delta t = \gamma t_0 \quad (45)$$

Onde o termo γ , fator relativístico, é dado por,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Sendo que, relacionando o tempo próprio com o período, temos

$$t_0 = T_0 = \frac{1}{f_0}$$

Que descreve o período de oscilação da onda, dado pelo inverso da frequência própria.

Assim, substituindo na equação (45), fica,

$$\Delta t = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{T_0}{\sqrt{\frac{c^2 - v^2}{c^2}}} = \frac{T_0}{\frac{1}{c}\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{T_0 c}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{c}{f_0 \sqrt{c^2 - v^2}} \quad (45.1)$$

Substituindo em (44),

$$f = \frac{c}{\frac{c}{f_0 \sqrt{c^2 - v^2}}} = f_0 [(c + v)(c - v)]^{1/2} (c - v)^{-1} = f_0 (c + v)^{1/2} (c - v)^{-1/2}$$

Assim,

$$f = f_0 \sqrt{\frac{c + v}{c - v}} = f_0 \sqrt{\frac{c \left(1 + \frac{v}{c}\right)}{c \left(1 - \frac{v}{c}\right)}}$$

Onde,

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Obtém-se,

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \quad (46)$$

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} \quad (46.1)$$

A equação (46) acima, descreve o movimento de aproximação da fonte em relação ao observador estático, e analogamente, invertendo os sinais devido o sentido da velocidade para o caso de afastamento, temos a equação (46.1).

2.3. Trabalhos de efeito Doppler no ensino de física

Nesta seção, serão discutidos trabalhos voltados para o ensino de física na temática do efeito Doppler, tendo como filtro o uso de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) no processo de ensino-aprendizagem e aplicação no âmbito do ensino médio.

No trabalho de (GÓMEZ-TEJEDOR, et al., 2014), propõe-se a aplicação de um software para smartphone, nomeado “*Frequency Analyzer*”, desenvolvido pelos próprios autores, com o intuito de analisar o efeito doppler em tempo real e determinar a velocidade de um corpo em movimento retilíneo. No trabalho, os autores recomendam alunos de graduação para a realização deste trabalho. Os resultados apresentados com a observação do efeito Doppler em uma onda sonora através do experimento usando o software, possuem boa concordância com as previsões teóricas.

O trabalho desenvolvido por (FERNANDES et al., 2016) consistiu em propor um aparato simples de experimentação para observar o efeito Doppler através de uma onda sonora, utilizando um tablet e smartphone. Esta prática culminou na medida da velocidade de um skate em movimento relativo ao observador. Para isso, os autores utilizaram dois softwares (*Frequency Sound Generator* e *Frequency Analyzer*), emissor, de uma onda sonora com frequência fixa, e receptor, respectivamente. No trabalho são discutidos os detalhes de como aplicar o experimento, que além desses programas, foi utilizado outra ferramenta denominada *Tracker*, visando medir a velocidade do tablet disposto em um skate através do efeito Doppler. Com os dados coletados do aparato experimental, os autores constataram que os resultados apresentaram medidas confiáveis e, portanto, podem ser aplicados em sala de aula.

Na dissertação de mestrado do autor (NASCIMENTO, 2019), teve-se como objetivo determinar a velocidade de um skate por Efeito Doppler, no qual foi aplicado em uma escola de ensino médio. Neste trabalho, evidenciaram-se as tendências de ensino que envolvem práticas ativas, embasadas na Teoria de Aprendizagem Significativa de Ausubel. O período de aplicação desta sequência didática foi de 5 dias (2 aulas por dia), contemplando 10 aulas de 50

minutos. Observa-se que este trabalho consistiu na aplicação em sala de aula do artigo desenvolvido por (FERNANDES et al., 2016), utilizando dos mesmos recursos descritos anteriormente. O autor deste trabalho, descreve em seus resultados ganhos nas práticas metodológicas e melhorias na aprendizagem, porém, ressalta a ausência de suporte no laboratório de informática da escola, e a necessidade de tablet, pois em smartphone a tela é pequena para observar os dados da prática experimental.

O artigo dos autores (SOUSA, et al. 2021) remete-se à mesma modalidade de aplicação dos trabalhos anteriores, o efeito Doppler, para uma onda sonora detectada por um software instalado em um smartphone. Neste trabalho, usa-se uma motocicleta para realizar o movimento relativo e provocar a observação desse fenômeno. Os resultados coletados pelos autores corroboram com a descrição teórica do efeito, possibilitando contribuir no processo de aprendizagem do estudante.

Os autores (KLEIN, P. et al. 2014) realizaram uma revisitação experimental a partir de um smartphone para observar o efeito Doppler. O experimento consiste em usar o smartphone com o software “*Spektroskop*” e “*Audio Kit*”, receptor/observador e fonte, respectivamente. Na atividade proposta, os autores utilizam uma base que possibilite a fonte (alto-falante do smartphone) rotacionar e assim verificar as alterações da frequência a partir de um observador próximo ao disco de rotação (microfone do smartphone). Os resultados analisados desta atividade demonstraram uma boa prática a ser realizada no ensino de física.

O trabalho intitulado “Utilização de *apps* para o ensino do efeito Doppler”, de autoria (SILVA, et al., 2019), propõe um experimento utilizando dois aplicativos para smartphone, “*PHYPHOX*” e “*Frequency Sound Generator*”, receptor/observador e fonte, respectivamente. Os autores apontam que os experimentos, agregados com os aplicativos utilizados, podem ser potencializadores na aprendizagem do efeito doppler acústico.

De acordo com os trabalhos observados na vertente do efeito Doppler com uso de TICs, percebe-se que há experimentos consolidados para a abordagem do efeito Doppler acústico no ensino de física, e que os resultados condizem com as previsões teóricas do fenômeno, tornando tais propostas válidas para aplicação em sala de aula. Dessa forma, é notório que para ondas sonoras, dispõe-se de várias abordagens a partir do uso de smartphone, possibilitando ganhos na aprendizagem e suprimindo a ausência de um laboratório de ciências. Logo, ao analisar os trabalhos aqui mencionados e tantos outros que seguem a mesma linha de pesquisa, destaca-se que não foram identificados trabalhos que visem o ensino do efeito Doppler-Fizeau para ondas eletromagnéticas, sendo que este fenômeno ocorre em ondas de modo geral. Assim, reforça-se a importância do conteúdo desta dissertação, cujo objetivo é

analisar os impactos na aprendizagem que o uso de TIC associado com experimento aplicado ao efeito Doppler-Fizeau para ondas eletromagnéticas pode proporcionar a partir de uma sequência didática.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, serão discutidas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho. Dessa forma, apresentam-se os eixos estruturantes que nortearam a metodologia da pesquisa, destacando a premissa a ser investigada, seus objetivos e âmbito de aplicação, e para o ensino, expõem-se os referenciais norteadores acerca da teoria de aprendizagem e descrição da Sequência Didática.

3.1. Metodologia da pesquisa

A partir do levantamento bibliográfico e observações no cotidiano docente, indaga-se: quais impactos na aprendizagem o uso de experimentos com Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC), pode proporcionar para a abordagem da física moderna no ensino médio?

Com esse questionamento, para direcionar o presente trabalho, seguiu-se: (a) há trabalhos existentes com o uso de TICs em experimentos para abordar o efeito Doppler-Fizeau no ensino médio? (b) a partir de qual metodologia o uso de TIC em experimentos será utilizado? (c) Como será desenvolvido em sala de aula? (d) em que medida o uso de experimento com TIC pode contribuir, no âmbito da física moderna, para a efetiva aprendizagem significativa?

3.1.1. Local e agentes da pesquisa

Com esses eixos norteadores, aplicou-se a Sequência Didática (SD) em uma escola estadual de ensino médio que está localizada no município de Manacapuru/AM, a 98 km da capital Manaus.

Para a abordagem do efeito Doppler-Fizeau no âmbito da física moderna, usou-se uma turma de terceira série/ano do ensino médio, pois esse fenômeno é abordado na etapa anterior, segunda série/ano, logo, os estudantes possuem noções dos conceitos físicos basilares para promover a abordagem da aplicação do efeito em uma nova concepção, nas ondas eletromagnéticas, que corresponde a física moderna, componente da grade curricular desta última etapa do ensino médio.

Dessa forma, a turma possui 22 alunos matriculados, porém, apenas 15 destes participaram das aulas da sequência didática.

3.1.2. Experimento exploratório

A aplicação da pesquisa possui uma abordagem qualitativa, promovendo a análise dos impactos na aprendizagem que o uso de TIC aliado à experimentação poderá proporcionar. Na perspectiva do estudo prévio para embasar este trabalho, tem-se uma natureza exploratória, uma vez que não foram observados trabalhos voltados para a experimentação que permita visualizar o efeito Doppler-Fizeau em onda eletromagnética com uso de Arduino. Assim, busca-se, a partir

destas abordagens, a natureza descritiva dos resultados para possibilitar a análise das contribuições desta sequência didática no processo de ensino-aprendizagem da física moderna.

3.1.3. Método Utilizado

Para a análise desta pesquisa, usou-se o método indutivo, promovendo a visualização dos dados coletados de forma geral por meio de questionários elaborados pelo autor, roda de conversa, atividades práticas e aulas dialogadas.

3.1.4. Etapas da Pesquisa

Inicialmente realizou-se um levantamento bibliográfico voltado para trabalhos relacionados ao ensino de efeito Doppler-Fizeau com uso de TICs no ensino médio, e na etapa seguinte, a partir do que fora constatado, construiu-se uma sequência didática promovendo o contexto da física moderna aplicada ao efeito Doppler-Fizeau. Dessa forma, realizou-se a aplicação da sequência didática em uma turma do ensino médio, possibilitando a realização da última etapa: analisar os impactos na aprendizagem proporcionados pela aplicação desta SD.

3.1.5. Coleta de dados

Para a realização da coleta de dados, foram empregados questionários de sondagem prévia e roda de conversa, assim contempla-se o momento introdutório da pesquisa. No decorrer do desenvolvimento das atividades usaram-se mapas conceituais, aula dialogada e observação do envolvimento dos participantes. No momento conclusivo do trabalho, aplicou-se um questionário (final) com itens que necessitam de conexão entre os aprendizados, promovendo a extrapolação dos conceitos desenvolvidos, e registros/observações das explicações de cada participante nas atividades de simulação final.

3.1.6. Análise de dados

A partir dos pressupostos aplicados na coleta de dados e conforme o que preconiza a Teoria de Aprendizagem Significativa, usa-se uma abordagem qualitativa, buscando identificar as contribuições da sequência didática para cada participante, tendo como referencial as questões norteadoras, e os objetivos gerais deste trabalho.

3.2. Metodologia de ensino

Nesta seção, enfatiza-se o produto educacional desta sequência didática, destacando os métodos empregados para sua aplicação, englobando a teoria de aprendizagem norteadora, o conteúdo para o ensino de física, descrição do produto educacional e aplicação em sala de aula.

3.2.1. Teoria de Aprendizagem

O ramo docente engloba muito além do momento em sala de aula, previamente, deve-se associar teorias e métodos aos objetivos que se pretende alcançar. Para isso, o conhecimento

das teorias de aprendizagem torna-se importante nessa construção, tendo em vista que vários teóricos buscam desde um longo período melhorias e alternativas para potencializar o processo de ensino aprendizagem, possibilitando que as metodologias behavioristas (tradicionais) fiquem ultrapassados.

Nesse sentido, a teoria de ensino aprendizagem que irá nortear esta sequência didática, se baseia na perspectiva da **Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS)**, associada a metodologias ativas por meio das TIC, que serão discutidas a seguir.

A Teoria da Aprendizagem Significativa foi preconizada pelo norte-americano David Ausubel (1978), psicólogo e médico. Para MOREIRA (1995), A TAS de Ausubel descreve-se a partir do foco na aprendizagem cognitiva, na qual há um armazenamento organizado das informações, formando uma hierarquia de conceitos, sendo este conhecido como a estrutura cognitiva. Além disso, enfatiza-se nesta teoria o papel do professor em reconhecer aquilo que o aluno já sabe, fator esse primordial para ocorrer a aprendizagem, e a partir desse saber pré-existente, realizam-se associações com novos componentes do novo material apresentado proporcionando modificações (MOREIRA, 1999). Nessa perspectiva, nos próximos parágrafos serão discutidos os aspectos que contemplam a TAS de Ausubel.

Um dos pontos importantes descritos nesta teoria, diz respeito a atribuição dada por Ausubel sobre o conhecimento prévio do aluno especificamente relevante para uma nova aprendizagem, descrito como *subsunçor*, ou seja, para exercer a TAS deve-se considerar o subsunçor e relacioná-lo com o novo conhecimento, que após a interação, proporciona-se uma modificação ou extensão do subsunçor, processo esse nomeado de **ancoragem**. É interessante destacar que, esses subsunçores são relacionados hierarquicamente e dinâmicos, compondo a estrutura cognitiva, assim, pode haver deslocamentos entre a hierarquia dos subsunçores, devido à composição de um novo saber mais ou menos abrangente, ocorrendo uma incorporação, nomeada em sua teoria como **aprendizagem superordenada**.

Na ausência destes subsunçores, descreve-se que ocorra o uso da aprendizagem mecânica, prática descrita por Ausubel como aprendizagem arbitrária com pouco ou sem nexo a estrutura cognitiva existente, como forma de introduzir um conhecimento sem subsunçor, em tal ponto que se possa estabelecer essa estrutura prévia, mesmo que limitada, possibilitando estender para novas áreas posteriormente apresentadas. Para facilitar a inserção desses subsunçores, Ausubel aponta para o uso de **organizadores prévios**, definidos como uma estratégia que emprega materiais introdutórios para estabelecer conexão entre o conhecimento prévio e o que se deve saber para formar os subsunçores e possibilitar a aprendizagem do conhecimento desejado.

Dessa forma, para ocorrer a AS, deve-se considerar dois fatores: o material de aprendizagem **potencialmente significativo** e **predisposição para aprender**.

Ao mencionar o material como potencialmente significativo, afirma-se que o material a ser usado apresenta ao aprendiz significado lógico (não-arbitrário e não-literal), relacionando especificamente com a estrutura cognitiva apropriada, além de um subsunçor adequado para estabelecer essa relação.

Quanto ao material potencialmente significativo, MOREIRA (2007, pág. 8) destaca que **“É importante enfatizar aqui que o material só pode ser *potencialmente significativo, não significativo: não existe livro significativo, nem aula significativa, nem problema significativo, ..., pois o significado está nas pessoas, não nos materiais*”**.

Portanto, esta primeira condição estabelece que o material a ser utilizado deve ser potencialmente significativo, e o aprendiz é quem irá dar significado para o novo conhecimento apresentado, podendo ser atribuído de forma rápida ou lenta, dependendo das condições do aprendiz.

O segundo aspecto condicional para uma AS, a predisposição para aprender, está vinculada exclusivamente ao estudante, pois é necessário existir a vontade de relacionar o novo conhecimento de forma não-arbitrária e não-literal a estrutura cognitiva pré-existente, sendo assim, não se trata de memorização, e sim modificações, incorporando nos subsunçores os novos saberes adquiridos, permitindo assim novas perspectivas enriquecedoras. Contudo, essa condição é tão importante quanto a primeira, pois sem ela, de nada adianta existir o material potencialmente significativo e vice-versa.

Ao contemplar essas condições, como analisar se houve AS? Para isso, não se deve apenas observar se o aprendiz consegue recitar aqueles conceitos mais importantes do conhecimento discutido, mas propor situações que estejam fora do contexto usado na apresentação do novo conhecimento, evitando uma aprendizagem significativa simulada.

Dessa forma, analisam-se três possibilidades de aprendizagem significativa: representacional, de conceitos e proposicional. A **aprendizagem representacional** define-se como aquela que está vinculada a símbolos e seus significados referentes (específicos), e trata-se de uma aprendizagem que está subordinada aos demais tipos de aprendizagem por ser a mais básica. De outro modo, a **aprendizagem de conceitos** inclui a aprendizagem representacional, pois necessita ir além daquilo a que a própria palavra se refere, ou seja, o aprendiz trata de forma genérica tal símbolo, aplicando a outros conceitos relacionados. Por fim, a **aprendizagem proposicional**, como o próprio nome descreve, caracteriza-se na formação de proposições constituídas pelas palavras juntas descrevendo ideias, contradizendo a

aprendizagem representacional. Enfatiza-se nesta última forma de aprendizagem que esta possui o pré-requisito de atingir previamente as aprendizagens anteriores, não tratando como uma soma, mas, por serem de fato, requisitos para desenvolver as ideias com proposições.

Ausubel, sobre a assimilação, descreve que esta ocorre no momento das crianças na escola e na fase adulta, pois esta é amplamente desenvolvida por relações como a ampliação do vocabulário e demais contato com objetos, favorecendo a assimilação de conceitos. Assim, com a formação de ideias estabelecidas na estrutura cognitiva, relaciona-se de forma substantiva e não-arbitrária com o novo conhecimento ou material potencialmente significativo. Como descreve MOREIRA (1999), sistematicamente sobre a assimilação, ao receber uma nova informação **a** (potencialmente significativa) relacionada por um subsunçor **A**, ocorre dessa interação uma modificação, resultando em um produto interacional (novo subsunçor **A'a'**). Naturalmente, se houve de fato a retenção, compreensão de **a'** e **A'** enriquecidos pela interação entre eles, com o avanço temporal, ocorrerá o esquecimento de parte da informação modificada pela apresentação de **a**, mas que, de fato, o subsunçor estabelecido dessa interação (**a' + A' = A'a'**) será apenas **A'**, que constitui agora um novo subsunçor. Enfatiza-se que **A'** não pode ser tratado como o mesmo **A'** da primeira exposição, pois este é constituído de resíduos da interação com **a'**, processo esse chamado de **assimilação obliteradora**, pois **A'** é o resultado retido pela obliteração de **a'**.

A partir dos aspectos descritos a respeito da aprendizagem na TAS ausubeliana, mencionou-se até o momento apenas a aprendizagem **superordenada**, que compõe apenas um dos três tipos de aprendizagem desta teoria, sendo elas: **subordinada** e **combinatória**. A aprendizagem subordinada é caracterizada quando o novo conhecimento é apresentado ao aprendiz e ocorre a subordinação deste conhecimento com os subsunçores pré-existentes. Por outro lado, a aprendizagem combinatória, como sugere a palavra, consiste em uma combinação de conhecimentos novos com os existentes na estrutura cognitiva, de modo que, não será um conhecimento que subordina ou superordena o anterior, ou seja, haverá uma interação do subsunçor com o novo conhecimento por possuírem pontos em comum sem que ocorra uma mudança na posição da hierarquia conceitual.

A partir dos tipos de aprendizagens apresentadas, enfatizam-se dois processos que ocorrem durante a aprendizagem, sendo eles denominados como **diferenciação progressiva** e **reconciliação integrativa (integradora)**.

O processo de diferenciação progressiva pode ser descrito a partir da progressão em um conceito geral e, ao serem apresentadas especificidades daquele conceito, ocorrem diferenciações do subsunçor. Portanto, é um processo que ocorre na aprendizagem por

subordinação apresentado anteriormente. Enquanto isso, o processo de reconciliação integradora, comum na aprendizagem superordenada, supracitada, remete-se a relação que o aprendiz faz entre as ideias de modo a realizar combinações, possibilitando superar possíveis lacunas entre os conceitos, de forma integrativa.

Portanto, concluem-se condições básicas para ser possível ocorrer a aprendizagem significativa, devendo-se assim dispor de material relacionável aos subsunçores e o aprendiz precisa estar disposto para estabelecer as assimilações ao objeto de estudo de forma substantiva e não-arbitrária, logo não ocorrerá apenas por memorização literal.

Com a integração da TAS de David Ausubel ao presente trabalho, o uso de metodologias ativas se faz importante diante do contexto do processo educacional no Brasil, tendenciando para uma aprendizagem com formação voltada para um perfil integral.

Entende-se por metodologia ativa, um processo de construção em que o estudante possui postura ativa em relação ao seu aprendizado, utilizando-se de experiências que envolvam um contexto prático, instigando a busca por soluções que estejam relacionadas à realidade (ação-reflexão-ação) (FREIRE, 2006). Dessa forma, o discente é colocado no centro do processo de ensino-aprendizagem.

Para a abordagem das metodologias ativas, Anastasiou e Alves (2007) elencam formas que despertam práticas ativas, substituindo formas de ensino tradicional que possibilitam ganhos no processo ensino-aprendizagem: aula expositiva dialogada; estudo de texto; portfólio; tempestade cerebral; mapa conceitual; estudo dirigido; lista de discussão por meios informatizados; Phillips 66; grupo de verbalização e de observação (gv/go); dramatização; seminário; estudo de caso; júri simulado; simpósio; painel; fórum; oficina (laboratório ou workshop); estudo do meio; ensino com pesquisa. Dentre essas ferramentas, usaram-se para a realização deste trabalho aulas expositivas, estudo de caso e experimentação.

3.2.2. Conteúdo

Com esses norteadores, neste trabalho selecionou-se o estudo da ondulatória no ensino de física, e para o produto educacional, investigou-se o efeito Doppler-Fizeau enfatizando sua ocorrência em ondas eletromagnéticas.

3.2.3. Objetivo

Em concordância com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), para a estruturação da metodologia de ensino, utilizou-se a competência número 3: “Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e

comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC)”. Para isso, foram empregadas as habilidades: (EM13CNT301) e (EM13CNT308).

Com as escolhas de competência e habilidades, busca-se que o aluno possua um caráter crítico para o seu atual contexto científico e tecnológico, pois diante da inserção dos dispositivos tecnológicos, é imprescindível que o indivíduo reconheça os mecanismos mínimos de funcionamento de produtos que impactam nitidamente no modo de vida da sociedade a qual está inserido. Dessa forma, ao propor tais habilidades, instiga-se a criatividade, uma vez que, ao compreender como ocorre seu emprego e funcionamento, possibilita-se o surgimento de ideias para o uso destas ferramentas digitais visando o bem individual e coletivo.

Portanto, de modo geral, tem-se como objetivo: compreender a importância do desenvolvimento científico proporcionado pela física do efeito Doppler-Fizeau.

Para esta demanda, estimam-se os seguintes objetivos específicos:

1. Compreender as diferenças entre uma onda mecânica e eletromagnética;
2. Discutir o efeito Doppler-Fizeau e sua construção histórica;
3. Analisar a ocorrência desse efeito em onda mecânica e eletromagnética;
4. Aplicar o conhecimento da teoria física com uso de TICs.

3.2.4. A Sequência Didática

Como teoria norteadora para desenvolvimento deste trabalho foi utilizado a Teoria de Aprendizagem Significativa de Ausubel e como tendência de ensino fez-se uso de metodologias ativas, aprendizagem cooperativa, experimentação, etc., buscando de modo geral a participação ativa dos alunos no processo de aprendizagem.

A Sequência Didática (SD) foi desenvolvida em uma escola estadual que está localizada no município de Manacapuru-AM, a 98 km da capital, Manaus.

A escola possui 15 salas de aula, com 5 salas para cada série do ensino médio, além de laboratório de informática com computadores em pleno funcionamento. Dessa forma, os participantes são de uma turma do 3º ano do ensino médio do turno vespertino, composta por 22 alunos com idades entre 17 e 19 anos, porém, apenas 15 estudantes participaram da sequência didática, e os demais não possuem frequência regular nas aulas. A turma selecionada para aplicação possuía aulas de física em três dias da semana: segunda-feira, terça-feira e quarta-feira.

Ressalta-se que, dentre os 15 participantes, alguns não estiveram presentes em todas as etapas da aplicação da SD devido a fatores pessoais. Assim, corroborando com a TAS, buscou-se atender todos os alunos que estavam predispostos ao aprendizado e que

demonstraram esforços admiráveis para a realização das etapas que serão descritas posteriormente.

A proposta da Sequência Didática (SD) foi elaborada com base na análise do espaço físico da escola, dos recursos disponíveis e horários. É importante destacar que todo o material utilizado nas atividades foi de uso pessoal do professor mediador. A partir da aprovação da escola, os computadores do laboratório de informática, Figura 18 abaixo, foram preparados e, embora a sala possua 10 computadores, apenas 4 deles foram utilizados devido a restrições de uso nos demais.

Figura 18 – Laboratório de informática da escola.



Fonte: autor (2023).

Com todos os recursos preparados, buscou-se adequar o calendário da realização das atividades, pois a sala de informática era utilizada toda terça-feira por outro professor da escola, assim, para contornar tal problema, utilizou-se este dia para realização das aulas dialogadas na sala de aula da turma, necessárias para a compreensão das atividades. Com esses pressupostos, a SD ocorreu no total de 8 dias, sendo cada dia composto por uma aula de 48 minutos para realização das atividades.

A partir do planejamento para aplicação, utilizou-se para avaliação da pesquisa o caráter qualitativo conforme a TAS preconiza. Sabendo que se busca no processo de aprendizagem a compreensão dos conceitos, ao final será exposto o grau dos indícios de aprendizagem significativa (AS), pois o quantitativo de acertos ou rendimento dos participantes não deve ser fator conclusivo para constatar se houve AS. Assim, como parâmetro para esclarecer se a atividade foi exitosa, será analisada: a evolução conceitual de cada participante, o envolvimento dos alunos para a realização das atividades e os impactos nas aprendizagens envolvidas de forma geral.

3.2.4.1. Descrição da sequência didática

Com base nesses pressupostos, nesta seção será descrito o desenvolvimento da SD, possibilitando a reaplicação por outro docente que busque uma prática alternativa ao ensino apenas expositivo em sala de aula. As etapas da aplicação estão descritas conforme exposto na Tabela 1 abaixo, com objetivo de cada etapa, atividades realizadas e local de aplicação.

Tabela 1 – Organização dos dias de aplicação do produto educacional.

Momentos	Etapas	Objetivo	Atividade	Local
Introdução	Dia 1	Sondar os conhecimentos prévios.	Roda de conversa; questionário inicial.	Sala de Aula
	Dia 2	Revisar os conceitos de ondas.	aula dialogada: conceitos e classificação – mapa mental	Sala de Aula
	Dia 3	Revisar os conceitos básicos de ondas.	aula dialogada: grandezas ondulatórias – mapa mental	Sala de Aula
	Dia 4	Conhecer o microcontrolador Arduino.	Introdução ao Arduino: acionar um LED vermelho	Laboratório de Informática
Desenvolvimento	Dia 5	Manipular o microcontrolador Arduino.	Programando o Arduino: simular um semáforo	Laboratório de Informática
	Dia 6	Compreender o efeito Doppler-Fizeau nas ondas eletromagnéticas (OEM).	Aula dialogada: efeito Doppler-Fizeau – mapa mental	Sala de Aula
	Dia 7	Observar o efeito Doppler-Fizeau em OEM.	Efeito Doppler-Fizeau com Arduino	Laboratório de Informática
Conclusão	Dia 8	Observar o efeito Doppler-Fizeau em OEM.	Efeito Doppler-Fizeau com Arduino – Questionário final	Laboratório de Informática

Fonte: autor (2023).

A partir da visão panorâmica apresentada, nas seções a seguir, as referidas etapas (dias de aplicação) serão descritas de forma clara e objetiva expondo os métodos empregados em cada atividade.

3.2.4.2. Dia 1 – Roda de conversa e questionário inicial.

Neste momento inicial, o professor mediador irá contextualizar o assunto a ser abordado através de uma roda de conversa com os alunos dispostos em círculo, com duração entre 20 e 25 minutos, na qual, durante os diálogos, aponta-se para situações específicas da realidade dos alunos. Alguns focos que foram envolvidos nesta conversa permeiam, de modo geral, três ocasiões: (i) medidor de velocidade a distância – trânsito; (ii) portas automáticas – shopping/aeroportos; (iii) a Teoria do Big Bang – mudança no espectro para o azul ou vermelho de uma galáxia (expansão do universo).

Após expor essas situações, deve-se observar as hipóteses dos alunos, para que o mediador possa averiguar se os participantes conseguem relacionar estas aplicações com a física, e assim detectar os subsunçores dos estudantes.

Ao fim da roda de conversa, aplica-se um questionário inicial, Apêndice A, com itens voltados para os conceitos da ondulatória para a compreensão do efeito Doppler-Fizeau em OEM. Dessa forma, comenta-se brevemente sobre o que será realizado durante as atividades desta SD e se alguém já ouviu algo sobre o Arduino, assim, certamente os estudantes estarão instigados para compreender os pontos da roda de conversa e pesquisar sobre o Arduino, deixando assim o ambiente propício para instigar o interesse nas próximas aulas.

3.2.4.3. Dia 2 – Revisão de Conceitos fundamentais e classificação das ondas.

Na aplicação da segunda etapa, iniciam-se as revisões dos conceitos necessários para a compreensão do efeito Doppler-Fizeau, assim esta aula dialogada terá duração de 30 minutos, e serão abordados: conceito de onda; meios de propagação; classificação (natureza e direção de vibração). Para esta etapa usa-se um slide confeccionado pelo mediador e disponível no Apêndice B.

Os recursos a serem utilizados nesta etapa são: notebook; projetor; material didático (apostila). Para melhor fixação dos conceitos abordados, o material didático, construído pelo mediador e disponível no Apêndice C, dará suporte ao aluno para acompanhar o avanço da aula. Assim, o estudante fica encarregado de preencher as lacunas da apostila que serão esclarecidas durante a aula. Portanto, utiliza-se essa abordagem como estratégia para fixar a atenção dos participantes. Ao final da aula dialogada, solicita-se a confecção de um mapa conceitual da aula, que deve ser realizada em espaço indicado no material didático. Com o término desta etapa, o mediador deve observar como está sendo preenchido o material didático e os mapas conceituais, pois se pode averiguar como estão sendo compreendidos os conceitos abordados,

e conseqüentemente quais pontos do assunto precisam ser revisados ou enfatizados na próxima aula.

3.2.4.4. Dia 3 – Revisão de grandezas ondulatórias.

Nesta etapa de revisão das grandezas ondulatórias, busca-se enfatizar os conceitos de frequência e comprimento de onda, pois são parâmetros que serão observados para descrever o efeito Doppler-Fizeau. Para a realização desta etapa, disponibiliza-se para os alunos um novo material didático, disponível no Apêndice D, que possui perguntas correspondentes aos conceitos de grandezas ondulatórias e que devem ser preenchidas conforme a evolução da aula. Esse momento possui duração de 30 minutos.

Os recursos necessários para esta etapa são: notebook, projetor, quadro e pincel para quadro branco. Dessa forma, inicialmente o mediador buscará revisar a aula anterior para relacionar com os conceitos das grandezas ondulatórias. Após debater sobre os conceitos, expõe-se no slide da aula, disponível no Apêndice E, o espectro eletromagnético para contextualizar os usos e momentos em que as ondas eletromagnéticas estão presentes no cotidiano. Após esta etapa, solicita-se que os estudantes iniciem a confecção do mapa conceitual no local indicado no material didático.

Após a realização desta etapa, informa-se à turma que a próxima aula será realizada no laboratório de informática para que seja dada a introdução à programação e Arduino para observação do efeito Doppler-Fizeau.

3.2.4.5. Dia 4 – Introdução ao Arduino

Esta etapa possui o objetivo de introduzir a programação em C++ e possibilitar a compreensão do funcionamento do Arduino. Este momento demandará de uma aula que será dividida em duas partes: explicação dos hardwares e softwares (entre 15 e 20 minutos); atividade com o Arduino (entre 25 e 30 minutos). Dessa forma, conforme a quantidade de computadores disponíveis, dividem-se os alunos em equipes com quantidades equilibradas.

Assim, para a realização das atividades será necessário: 4 computadores ou mais; notebook (para o professor mediador); projetor; um kit de Arduino iniciante; Diodo Emissor de Luz (LED) vermelho; conectores (jumpers).

Inicialmente distribui-se para cada equipe um material didático, elaborado pelo mediador e disponível no Apêndice F, que contém explicações de cada material a ser usado, no qual será realizado a leitura junto aos participantes, dessa forma evita-se que alguma informação seja perdida e todos acompanhem as explicações.

Após a etapa de explicações dos materiais, inicia-se a atividade com Arduino, na qual os alunos terão acesso ao código de programação para acender um LED e poderão interagir com a oscilação de acionamento da luz. Enfatiza-se que neste momento é importante que os participantes compreendam como o Arduino interpreta o código escrito no computador através de sua IDE (local onde são inseridos os códigos para programar o Arduino). Após a escrita dos códigos, cada equipe deve realizar a montagem do circuito elétrico no Arduino para observar se o código funciona de acordo com o que foi planejado. Ao fim deste momento, cada equipe demonstrará seu código em funcionamento no circuito elétrico construído. Após o término da atividade anterior, os estudantes terão compreendido como o Arduino lê os códigos escritos e traduz a informação no circuito elétrico.

3.2.4.6. Dia 5 – Atividade com Arduino

Esta etapa possui duração de uma hora aula, 48 minutos, e o objetivo consiste em desafiar as equipes para desenvolver um código de programação para simular o funcionamento do semáforo, e para concluir esta etapa será necessário: projetor; notebook (para o professor mediador); kit de Arduino iniciante; Diodo Emissor de Luz (LED) verde, vermelho e amarelo; conectores (jumpers).

A princípio, as equipes receberão o mesmo material da aula anterior para usar como norteador no desenvolvimento do código de programação do semáforo, e é válido que as equipes troquem informações sobre a programação ou consultem o professor mediador em caso de dúvidas, enfatiza-se que o mediador deve interferir sem que seja dado a resolução do problema, fazendo assim breves apontamentos sobre o que pode estar errado.

Após a conclusão do código de programação, cada equipe montará o circuito elétrico no Arduino conforme exposto no material didático e realizará o teste. Em seguida, após o teste, o circuito é desmontado para a próxima equipe montar novamente, assim todos terão a experiência de construção do circuito elétrico. Caso a escola possua mais de um kit de Arduino Iniciante (*starter*), disponibiliza-se um kit para cada equipe.

Com o êxito nos desafios, observa-se a troca de experiência dos estudantes, onde seus relatos darão indícios da compreensão do funcionamento do Arduino, assim, após esta etapa, os estudantes estarão capacitados para aplicar o Arduino com o sensor HB100 na visualização do efeito Doppler-Fizeau.

3.2.4.7. Dia 6 – Aula dialogada de efeito Doppler-Fizeau

Nesta aula, foi abordado o aspecto teórico do efeito Doppler-Fizeau, e visa expor: breve construção histórica do fenômeno; efeito Doppler em ondas mecânicas e em ondas eletromagnéticas (luz) e aplicações. Dessa forma, estipulou-se 30 minutos para a aula

dialogada, e para isso foi usado uma apresentação em slide disponível no Apêndice G, e uso de um vídeo² demonstrando o efeito, e ao fim da aula solicitou-se dos participantes um mapa conceitual/mental com os aspectos observados na aula, com duração de 18 minutos. Para esta etapa, foi necessário: notebook, projetor, caixa de som pequena e material didático da aula disponível no Apêndice H.

Dessa forma, a aula contemplou os conceitos pertinentes ao fenômeno principal da aplicação e suas nuances devido à ocorrência em onda mecânica e eletromagnética. Após a aula, expõe-se aos alunos que no próximo dia de aplicação deverão estar novamente no laboratório de informática para analisar o efeito Doppler-Fizeau em uma onda eletromagnética. Destaca-se que a necessidade de avisar sobre a próxima atividade dá-se por conta de buscar envolver os alunos na aula de tal modo que se sintam instigados para as próximas atividades.

3.2.4.8. Dia 7 - O efeito Doppler-Fizeau: gráficos no Excel

O sétimo dia de aplicação, remete-se apenas ao efeito Doppler-Fizeau com uso de Tecnologia Digital de Informação e Comunicação (TDIC), com isso, este momento tem o intuito de analisar o potencial de aprendizagem que o conjunto Arduino-HB100 pode proporcionar e neste primeiro contato, averigua-se como visualizar o Efeito Doppler-Fizeau através de gráficos plotados pelo Arduino no Excel usando o software PLX-DAQ. Para esta prática será necessário: computador; projetor; kit de Arduino UNO iniciante, sensor HB100, conectores e material didático de apoio, disponível no Apêndice I. Para esta atividade estima-se uma hora aula de 48 minutos.

Inicialmente, solicita-se dos participantes que formem as mesmas equipes e dirijam-se para os computadores disponíveis. No computador deve-se ter disponível o software Excel, local onde serão visualizados os gráficos da frequência detectada pelo sensor HB100. Para isso, instrui-se a escrita do código de programação, disponibilizada pelo mediador no material didático. Após a escrita do código, inicia-se a montagem do circuito Arduino-HB100, e por fim aplica-se para que o público faça observações dos gráficos construídos instantaneamente pelo Arduino.

Ao fim desta atividade, motivam-se indagações sobre o que pode ser feito a partir das informações que o sensor aplicado ao Arduino pode proporcionar, e se é possível relacionar com alguma aplicação do cotidiano, para que assim possa ser dada margem para observar a criatividade. Dessa forma, ao chegar no fim desta etapa, pode-se avançar para expor as

² Vídeo disponível em: <https://youtu.be/Wg-9JPjasW8>.

aplicações do efeito Doppler-Fizeau, simulando algumas situações a partir do Arduino com o sensor HB100, que será realizado no dia seguinte.

3.2.4.9. Dia 8 - O efeito Doppler-Fizeau: velocímetro e porta automática

Com o êxito na aplicação da etapa anterior, no dia 8 da aplicação, tem como objetivo demonstrar o uso das informações do Arduino com sensor HB100 simulando situações do cotidiano, e para isso será necessário: notebook, computadores, projetor, Arduino UNO, sensor HB100, conectores e material didático, disponível no Apêndice J.

Nesta etapa, enfatizam-se duas simulações de aplicação deste fenômeno, a saber: medidor de velocidade por micro-ondas e porta automatizada por aproximação. Estima-se que para a realização das simulações sejam disponibilizados 35 minutos. É importante destacar que os participantes se mantenham em equipes e assim atribui-se um código de programação para que cada equipe, além de realizar a montagem do circuito, faça a escrita do código. Esse código de programação do Arduino com sensor HB100 é disponibilizado para os participantes através do material didático entregue para cada equipe no início da atividade. Assim, ao término da atividade prática, é feita a aplicação do questionário final, disponível no Apêndice K, contendo seis perguntas de vestibulares que abordam os aspectos do fenômeno explorado durante as atividades e para esta etapa usa-se 10 minutos. Ao término, pode-se realizar um breve momento de diálogo com os participantes para averiguar os impactos proporcionados pelas atividades e a conclusão da sequência didática.

3.2.5. Aplicação do produto educacional

A seguir será descrito a aplicação do produto educacional, dividindo-se em três momentos: etapa introdutória (4 aulas); etapa de desenvolvimento (2 aulas); etapa de conclusão (2 aulas).

3.2.5.1. Momento 1 - Etapa introdutória

O primeiro momento, de modo geral, foi elaborado com o caráter introdutório para a realização do trabalho. Assim, durante os 4 primeiros dias de aplicação, buscou-se contextualizar e revisar os conceitos de ondulatória com uso de mapas conceituais e apresentar o microcontrolador Arduino.

Para introduzir a SD, no primeiro dia foi realizada uma roda de conversa e aplicação de questionário inicial. No segundo dia, buscou-se revisar os conceitos e classificações das ondas, e ao final da aula foi realizado o mapa conceitual 1 (conceitos e classificação da onda). Para o terceiro dia de aplicação, foi revisado com os participantes as grandezas ondulatórias e confecção do mapa 2 (grandezas ondulatórias e espectro eletromagnético). No quarto e último

dia, introduziu-se o efeito Doppler-Fizeau e a produção do mapa conceitual 3 (efeito Doppler-Fizeau e aplicações). Dessa forma, foram desenvolvidos no total 3 mapas conceituais e aulas de revisão sobre os conteúdos mencionados. A seguir, serão descritos todos os procedimentos adotados na aplicação de cada aula.

Primeira aula

Para isso, inicialmente foi realizada uma roda de conversa com a turma, e como são alunos do 3º ano do ensino médio, os argumentos demonstraram que alguns participantes possuíam conhecimentos básicos necessários devido terem estudado ondulatória no ano anterior. Na roda de conversa, o professor mediador buscou apontar dispositivos empregados no uso cotidiano, como, por exemplo: “Como funciona a porta do shopping? Vocês perceberam que ela abre automaticamente?”; “durante o trânsito, em algumas vias, a velocidade do carro é medida à distância por um agente de trânsito, alguém sabe explicar como isso funciona?”. Além desses apontamentos e argumentos dos alunos, indagou-se a respeito do universo, como: “Já ouviram falar na teoria do *Big Bang*? O universo está expandido, estático ou contraindo? Alguém sabe descrever como podemos confirmar o comportamento de aproximação ou afastamento de uma galáxia?”. Portanto, nessa etapa, buscou-se avaliar se os alunos conseguiriam relacionar esses problemas expostos na roda de conversa com a teoria do Efeito Doppler-Fizeau e coleta de indícios do conhecimento prévio do participante. Esta etapa teve duração de 25 minutos.

Após a roda de conversa, aplicou-se um questionário, com 10 questões de vestibulares, livros e alguns itens elaborados pelo mediador. Esse questionário demandou do tempo restante da aula para ser concluído pelos alunos e pode ser visualizado no Apêndice B. A sondagem foi necessária para constatar o conhecimento dos conceitos fundamentais da ondulatória para desenvolver as atividades posteriores. Essa etapa pode ser visualizada na Figura 19 abaixo.

Figura 19 – (A) Roda de conversa com a turma e (B) alunos respondendo o questionário inicial.



Fonte: autor (2023).

Nesta etapa, buscou-se inserir a turma no contexto do estudo das ondas e averiguar os conhecimentos prévios (subsunçores) dos estudantes. Esta etapa teve duração de uma aula e percebeu-se a curiosidade dos alunos em explicar os pontos levantados na roda de conversa,

porém, tais respostas somente foram esclarecidas no segundo dia de aplicação, que será descrito a seguir.

Segunda aula

A segunda aula ocorreu no dia seguinte, e enfatiza-se que muitos alunos haviam realizado pesquisas para responder aos pontos da roda de conversa, fato que corrobora o empenho dos estudantes. Esta aula ocorreu com o uso de notebook e projetor para expor um Slide de apresentação dos conceitos fundamentais das ondas, slide disponível no Apêndice C, assim, foi revisado para os alunos: definição de onda; classificações: natureza, meios de propagação e direção de vibração (longitudinal e transversal).

Antes do início da aula, foi distribuído para cada aluno um material complementar, disponível no Apêndice D, que conforme o desenvolvimento da aula deveria ser preenchido, assim, a atenção dos alunos esteve voltada diretamente para a evolução dos conceitos. Os materiais didáticos usados nesta aula foram caracterizados como organizadores prévios, auxiliando na inserção dos novos conhecimentos para intermediar o desenvolvimento de subsunçores, corroborando com a TAS.

Após a aula dialogada, foi solicitado dos estudantes a confecção de um mapa conceitual, assim o professor mediador usou o quadro branco para desenvolver um breve mapa conceitual, de modo que observassem o que seria um mapa conceitual, é interessante notar que todos já haviam tido atividades com uso de mapas conceituais/mentais em outras disciplinas, fato esse que facilitou o desenvolvimento desta atividade. Enfatiza-se que a TAS destaca a importância de verificar a aprendizagem por meio do uso de mapas conceituais, mesmo que alguns dos participantes não fizessem da forma ideal, mas houve boas tentativas que permitem a avaliação da aprendizagem. Os mapas realizados pelos alunos serão discutidos nos resultados, e na Figura 20 abaixo, pode-se observar o desenvolvimento desta aula.

Figura 20 – Segunda aula: (A) aula dialogada; (B) e (C) alunos desenvolvendo seus mapas conceituais – mapa 1.



Fonte: autor (2023).

Terceira aula

Para a realização da terceira aula, aplicou-se a mesma abordagem da aula anterior, e para isso usou-se o notebook e projetor, sendo que a aula se voltou para os seguintes conceitos: grandezas ondulatórias e espectro eletromagnético, nos quais o mediador descreveu

atenciosamente as grandezas de comprimento de onda e frequência, slide da aula disponível no Apêndice F, continuando com a perspectiva dos organizadores prévios.

Antes do início da aula, os alunos receberam o material complementar, Apêndice E, para que os participantes fossem preenchendo as lacunas conceituais no decorrer da aula e comentassem suas dúvidas ou algo observado no cotidiano. Esta etapa teve duração de 30 minutos.

Destaca-se que na TAS, a SD é avaliada no decorrer de sua aplicação, pois, sempre era observado o comportamento dos estudantes diante das atividades e abordagem dos conceitos, assim como sua participação na aula expositiva, permitindo ao mediador constatar a interação dos novos conhecimentos de forma não-arbitrária e não-literal. Nos 18 minutos finais da aula, o material complementar indica o espaço destinado à confecção do mapa conceitual dos assuntos abordados. Vale ressaltar o empenho dos estudantes, pois muitos usaram régua e outros materiais para desenhar as formas geométricas em que os conceitos seriam organizados hierarquicamente. Na Figura 21 abaixo, observam-se alguns momentos dessa aula.

Figura 21 – Terceira aula: (A) aula dialogada; (B) e (C) alunos produzindo seus mapas conceituais – mapa 2.



Fonte: autor (2023).

Ao término dessa aula, averiguou-se que os estudantes estavam empolgados para a próxima aula que iria tratar da introdução ao Arduino, e muitos já haviam realizado pesquisas sobre o uso deste microcontrolador. A seguir, será descrita tal abordagem.

Quarta aula

A quarta aula, iniciou-se a partir da leitura do material didático com os participantes, Apêndice G, apresentando os hardwares e o software IDE (ambiente de desenvolvimento integrado) do Arduino, e após as devidas apresentações, os alunos foram divididos em quatro equipes para realização da atividade de programação. Corroborando com a TAS, a implementação de atividades em equipe, permite momentos em que ocorrerão trocas de significados entre os participantes e o mediador, pois nessa atividade os alunos manipularam o Arduino e discutiram entre si e com o mediador formas alternativas de realizar a escrita dos

códigos e a construção do circuito elétrico, permitindo observar o grau de compreensão da programação que eles escreveram no IDE e como é executado pelo microcontrolador.

Dessa forma, previamente, preparou-se uma pasta nos computadores com o material didático no formato digital e físico para a realização da atividade de acionar um LED vermelho. Na Figura 22 abaixo, é possível observar o momento inicial da aula.

Figura 22 – Apresentação do hardware Arduino e software IDE no laboratório de informática.



Fonte: autor (2023).

Durante a realização das atividades de programação, ficou explícito que alguns estudantes não tinham algumas noções de informática, e durante a escrita dos códigos foi necessário o mediador estar atento para correções de sintaxe da programação em C++. Esta etapa proporcionou aos estudantes um ambiente colaborativo, pois as equipes trocavam informação sobre os códigos, momento este exposto na Figura 23 abaixo.

Figura 23 – (A) Alunos desenvolvendo o código de programação e (B) equipes trocando informações sobre o código.



Fonte: autor (2023).

Para essa atividade, como havia apenas um kit de Arduino, cada equipe, ao terminar sua programação, deveria se deslocar para a mesa onde estavam os materiais para montagem do circuito elétrico e realizar posteriormente o teste do conjunto. Esta abordagem foi realizada para que todas as equipes pudessem experimentar como ocorre o processo de programar e testar a montagem do circuito elétrico. Esta etapa pode ser visualizada na Figura 24 a seguir.

Figura 244 – Equipes realizando a montagem do circuito elétrico Arduino-protoboard-LED vermelho.



Fonte: o autor (2023).

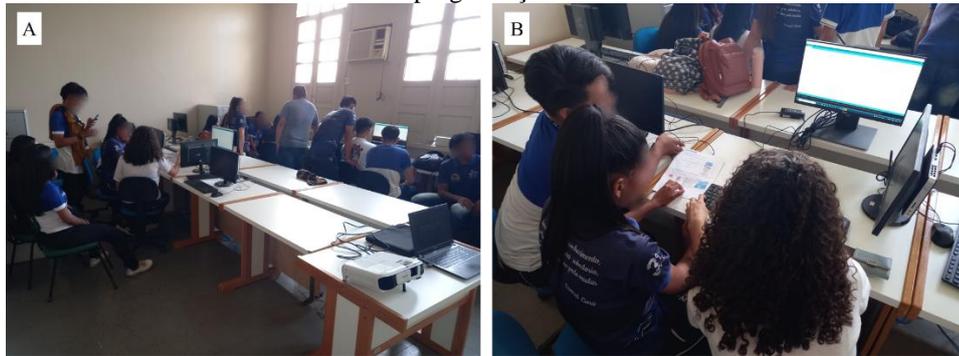
Dessa forma, ao término das atividades, os alunos demonstraram grande interesse nas atividades e esforço para compreender a lógica de programação do Arduino, expondo mediante relatos possibilidades para o que haviam desenvolvido, como, por exemplo, o semáforo. Com isso, a atividade introdutória mostrou-se eficaz, onde evidenciou a importância de atividades que possibilitem aos estudantes construir seu próprio conhecimento, conforme apontam as abordagens construtivistas, especificamente a TAS.

3.2.5.2. Momento 2 – Etapa de desenvolvimento

Quinta aula – Dia 5

Nesta aula, os alunos foram novamente dispostos em equipes e desafiados a desenvolver um código de programação para simular um semáforo a partir do código da aula anterior salva por eles no computador. Ressalta-se que esta atividade deveria ter sido realizada no dia anterior, porém, o tempo não foi suficiente. É interessante notar que cada equipe discutiu internamente sobre o que precisava ser ajustado no código para inserir outros dois LEDs, amarelo e verde. O mediador então lembrou que iriam precisar da função *delay* entre cada acionamento. Verificou-se nesta etapa que o grau de complexidade desta atividade exigiu uma boa compreensão da lógica de programação que deveria ser construída para acionar os LEDs em sequência e com determinado intervalo de tempo entre eles, ressaltando a inserção de atividades com um aprofundamento crescente, partindo de ideias gerais progredindo para aprendizagens específicas, proporcionando a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora, tal qual prevê a TAS. Na Figura 25 abaixo pode-se visualizar esta atividade.

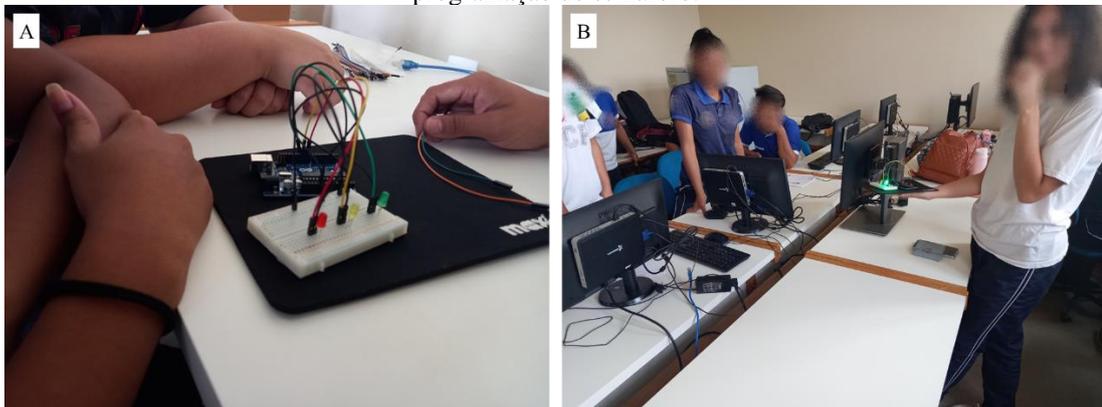
Figura 25 – (A) equipes desenvolvendo seu código de programação e (B) alunos discutindo a lógica de programação.



Fonte: autor (2023).

Destaca-se que neste dia de aplicação, o laboratório de informática havia sido contemplado com novas mesas, contribuindo ainda mais para o desenvolvimento das atividades, conforme observado na mudança do cenário acima. Após todas as equipes construírem seus códigos de programação, cada equipe fez a montagem do circuito elétrico no kit disponível e, em seguida, realizou o teste do conjunto. Nota-se que, conforme cada equipe realizava seus testes, o conjunto era desmontado e disponibilizado para outra equipe realizar a montagem e testar seu código, e na Figura 26 abaixo pode-se visualizar esta etapa.

Figura 26 – (A) alunos realizando a montagem do circuito elétrico do semáforo e (B) teste do código de programação do semáforo.



Fonte: autor (2023).

Com o término deste desafio, os alunos demonstraram muito entusiasmo, principalmente na realização dos testes, possibilitando brincadeiras entre as equipes, e isso reforça a percepção dos indícios de aprendizagem. Logo após esta atividade, viu-se que todos os alunos participantes das atividades estavam aptos para a próxima etapa: inserir o Arduino no contexto do estudo do efeito Doppler-Fizeau, que foi o tema das aulas seguintes.

Sexta aula – Dia 6

A sexta aula foi realizada na sala de aula da turma, em que foi utilizado um slide para a aula dialogada (Apêndice H) e material didático (Apêndice I) e trabalhou-se o último

momento de aula dialogada, destacando que os organizadores prévios aplicados nas aulas anteriores possibilitaram os subsunçores necessários para introduzir um novo conhecimento, com a temática voltada para o efeito Doppler-Fizeau para ondas eletromagnéticas, onde foi apresentado um breve histórico do desenvolvimento deste fenômeno, enfatizando como percebemos que houve aproximação ou afastamento devido o movimento relativo da fonte e observador. Na Figura 27 abaixo é possível observar o desenvolvimento da aula expositiva.

Figura 27 – Aula dialogada: (A) breve contexto histórico e (B) descrição do fenômeno para ondas eletromagnéticas.



Fonte: autor (2023).

Ao término desta aula, solicitou-se que os participantes elaborassem um mapa conceitual do fenômeno descrito na aula em local indicado no material didático, e dessa forma contemplaram-se os preceitos básicos necessários para a abordagem experimental computacional, possibilitando a verificação de indícios da AS, que será descrita na seção a seguir.

3.2.5.3. Momento 3 – Etapa de conclusão

Sétima aula – Dia 7

Inicialmente, os alunos formaram quatro equipes, onde três equipes eram responsáveis pela escrita do código de programação (Apêndice J) e uma direcionada para a montagem do circuito elétrico do Arduino com sensor HB100. Dessa forma, apresentaram-se os componentes que seriam utilizados na atividade, conforme pode ser visualizado na Figura 28 abaixo.

Figura 28 – Mediador apresentando o sensor HB100 com suporte para conectar ao Arduino.



Fonte: autor (2023).

Para cada equipe de programação, distribuiu-se a mesma atividade: visualizar o fenômeno por meio de gráfico no Excel. Assim, cada equipe dirigiu-se para um computador, e como o código é extenso, os alunos alternaram entre os componentes para que todos realizassem a escrita. O código possui funções que foram brevemente comentadas no decorrer desta etapa, explicando apenas a função de cada linha do código, pois o objetivo é que o estudante compreenda a importância do fenômeno para aplicação tecnológica no cotidiano, além de favorecer a aprendizagem do estudante que está na posição central do processo sistêmico de desenvolvimento do seu conhecimento, conforme a TAS. Em seguida, ao término da atividade de escrita do código no IDE do Arduino, as equipes realizaram o teste. Esta etapa pode ser verificada na Figura 29 abaixo.

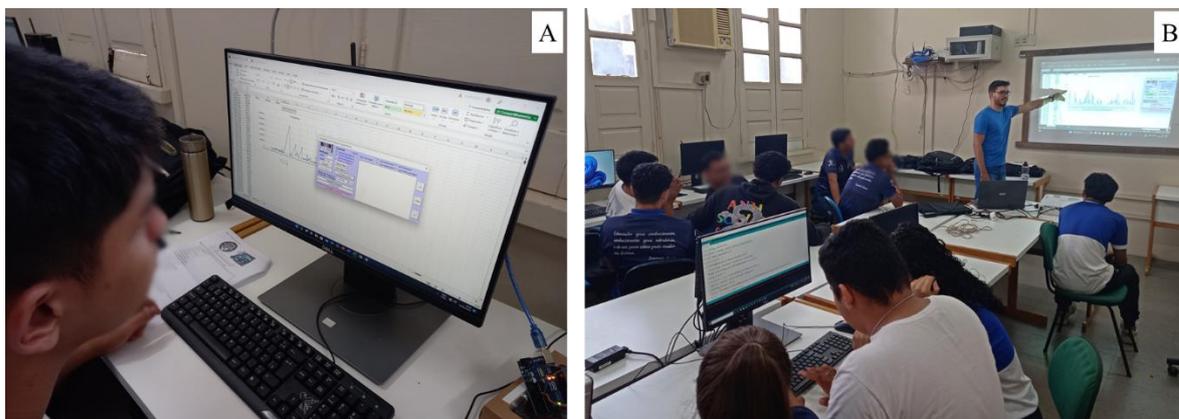
Figura 29 – etapas de verificação do gráfico do efeito Doppler-Fizeau: (A) equipes escrevendo o código do sensor HB100; (B) alunos da equipe de montagem do circuito elétrico; (C) alunos testando o Arduino com HB100.



Fonte: autor (2023).

Com a conclusão dos testes das equipes, a última atividade visou analisar o gráfico no Excel gerado pelo sensor acoplado ao Arduino e o professor mediador buscou avaliar se as equipes conseguiriam identificar o comportamento do gráfico relacionando a descrição do fenômeno com o que estava ocorrendo no receptor do HB100. Esta etapa pode ser visualizada na Figura 30 a seguir.

Figura 30 – (A) aluno analisando o gráfico plotado pelo Arduino com HB100; (B) professor mediador verificando com as equipes o gráfico do experimento.



Fonte: autor (2023).

Note que os gráficos são construídos instantaneamente, bastando aproximar ou afastar um obstáculo (mão, caderno, parede, etc.) em relação ao sensor HB100, e conseqüentemente a distorção na frequência emitida e recebida pelo sensor é detectada pelo Arduino e enviada ao Excel. Assim, com o fim desta aula, os alunos compreenderam como é realizado o uso do Arduino e a visualização gráfica da onda eletromagnética emitida pelo HB100 sofrendo efeito Doppler-Fizeau. Na próxima aula, serão realizadas as aplicações deste experimento.

Oitava aula – Dia

Neste último momento, realizou-se a conclusão do efeito Doppler-Fizeau em ondas eletromagnéticas proporcionando aplicações da informação obtida pelo Arduino e interpretada para verificar velocidade de um alvo e simular o funcionamento de uma porta automática normalmente encontrada em locais como Shopping, aeroportos e demais situações que envolvam a proximidade de um alvo para acionamento de algum mecanismo em dispositivos. A importância de mostrar questões que estão presentes na vida do estudante está intrinsecamente relacionada à perspectiva da TAS, pois reforçam os significados dos conceitos, permitindo que o lógico se torne um significado psicológico para o aprendiz (MOREIRA, 2017). Dessa forma, os alunos formaram novamente quatro equipes, com uma delas destinada para a montagem do circuito elétrico, sendo composta por alunos diferentes da etapa anterior, criando uma rotatividade entre as equipes na realização das atividades. Com isso, o mediador disponibilizou para os estudantes um material didático com os códigos de programação do sensor HB100 para medir velocidade de um alvo e simular o acionamento de uma porta (Apêndice K).

Cada equipe escreveu um código de programação e, no final, todos aplicaram no Arduino com o sensor HB100 conectado ao notebook do mediador. Isso foi feito para exibir no

projeto e verificar o que aconteceria ao enviar a programação para o Arduino. Na Figura 31 abaixo, podemos visualizar o recurso experimental.

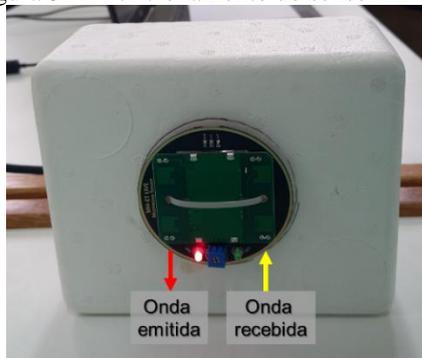
Figura 31 – Arduino e sensor HB100 conectados no notebook: (A) visão panorâmica; (B) visão frontal e (C) traseira do dispositivo experimental.



Fonte: autor (2023).

Após a conclusão da escrita do código realizada pelas equipes, todos constataram como podemos utilizar a informação de frequência aparente da onda recebida pelo sensor e, por fim, constatar o uso do efeito Doppler-Fizeau em aplicações do cotidiano. Ao observar a Figura 32, Figura 33 e Figura 34 a seguir, nota-se o desenvolvimento desta etapa.

Figura 32 – Funcionamento do sensor HB100.

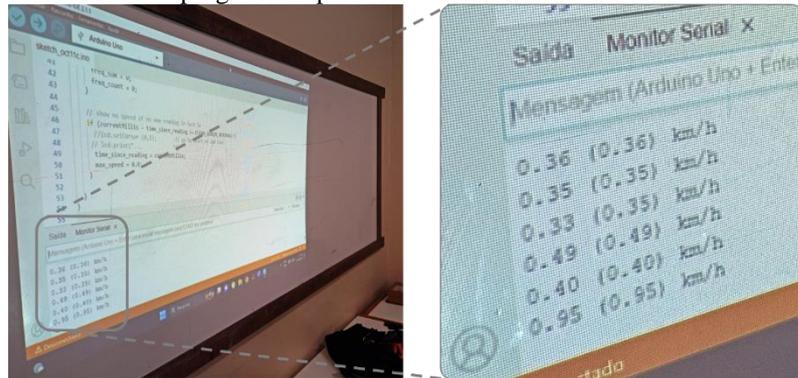


Fonte: autor (2023).

O sensor HB100, exposto na Figura 32 acima, é constituído de dois pares de antenas, transmissor/emissor (TX) e receptor (RX), que operam com ondas na faixa de micro-ondas (10,525 GHz) e é amplamente utilizado como sensor de movimento. Note que, com a informação da frequência aparente, o sensor pode ser programado para inserir esta informação na equação do efeito Doppler-Fizeau para uma onda eletromagnética, disponível do datasheet³ do sensor, e realizar alguma ação, conforme decisão do usuário.

³ Documentação do sensor disponível em:
https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Application_Note.pdf

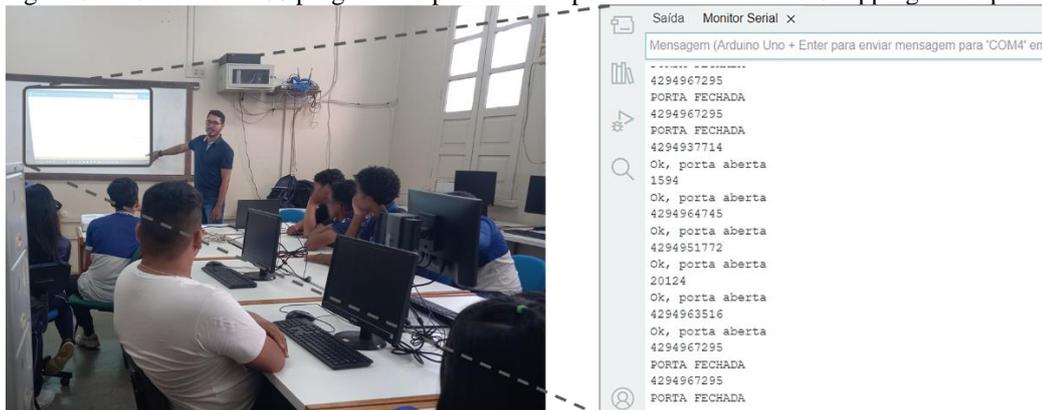
Figura 33 – Sensor HB100 programado para simular medidor de velocidade de veículos nas vias.



Fonte: autor (2023).

Na Figura 33 acima, é possível observar que o alvo está em movimento relativo e no campo de atuação do sensor, logo o fenômeno será percebido. Em uma situação em que não ocorrer movimento relativo entre o sensor e o alvo, a frequência não será divergente daquela emitida pelo sensor, logo a velocidade visualizada será zero.

Figura 34 – Sensor HB100 programado para simular porta automatizada do Shopping e aeroporto.



Fonte: autor (2023).

Na Figura 34 acima, é possível observar que, a programação no sensor foi ajustada para realizar a leitura da frequência recebida, com isso foi inserido um condicional na lógica de programação para imprimir no monitor serial a informação “porta aberta” ou “porta fechada”, dependendo da frequência alterada devido o movimento de aproximação realizado por alguém diante do sensor (porta automática). Interessante ressaltar que os estudantes ficam instigados e sugerem diversas possibilidades de aplicação desta tecnologia, expondo a criatividade das equipes.

Ao término desta atividade, aplicou-se o questionário final (Apêndice L) visando obter dados que mostrem indícios de AS. Esta etapa de conclusão das atividades pode ser visualizada na Figura 35 a seguir.

Figura 35 – Alunos respondendo o questionário final.



Fonte: autor (2023).

Com isso, a sequência didática foi concluída e os participantes demonstraram grande interesse. Vale ressaltar que as práticas no laboratório de informática despertaram outra perspectiva, pois os participantes afirmaram não imaginar como a física era utilizada nas aplicações tecnológicas, desde dispositivos de grande ou simples complexidade. Dessa forma, os resultados obtidos nos questionários (inicial e final), as práticas computacionais e os mapas conceituais, serão discutidos no capítulo seguinte.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

As seções a seguir discutem os resultados iniciais, decorrentes da sondagem prévia por meio de levantamento bibliográfico, e resultados finais, fornecidos mediante a aplicação da sequência didática e instrumentos de coleta de dados, questionários, roda de conversa e experimentação.

4.1. Resultados e análises iniciais

Os trabalhos analisados a partir do levantamento bibliográficos, possibilitaram visualizar a lacuna no ensino de física sobre o efeito Doppler-Fizeau em ondas eletromagnéticas, e diante desta realidade foi objetivado suprir essa demanda, sendo que a maioria dos trabalhos aplicados em sala de aula, produtos educacionais, são reproduções de artigos que validam tal abordagem. As obras verificadas utilizaram a computação como ferramenta para interpretar o efeito Doppler, com isso, percebe-se a potencialidade que a computação aliada ao ensino de física pode proporcionar, e o público destas práticas são nativos digitais, logo, as propostas educacionais com o uso das Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação tornam o ensino contextualizado podendo despertar o interesse dos estudantes para a física.

Dessa forma, a partir dos trabalhos avaliados, observou-se a importância de utilizar a experimentação aliada à TDIC para a observação do fenômeno do Efeito Doppler-Fizeau, sendo que este trabalho buscou suprir a demanda desse efeito para ondas eletromagnéticas. A princípio, houve alguns empecilhos para sua realização, dentre eles, destaca-se a ausência de experimentos aplicados para a visualização do efeito Doppler em OEM voltado para a educação básica. Sendo assim, optou-se por usar o Arduino com o sensor HB100, que através de pesquisas verificou-se ser possível abordar o efeito doppler, pois este dispositivo trata-se de uma antena que emite micro-ondas e por reflexão é detectada a frequência da onda retornada. Outro ponto a destacar, remete-se a construção do código de programação, que demandou de alguns dias para que pudesse funcionar da forma pretendida, sendo que inicialmente foi feito um código para visualizar a leitura da frequência detectada, em seguida acoplou-se a função no Excel para visualizar graficamente e propor a investigação do comportamento dessa onda durante a sequência didática. Com o código base em funcionamento, agregou-se duas funções, aplicação da informação da frequência na equação da velocidade acoplada na biblioteca (repositório) do sensor, e inserir um condicional a partir da frequência detectada para mostrar a informação de “Porta Aberta” ou “Porta Fechada”, simulando, por exemplo, a porta do shopping. Portanto, foram desenvolvidos três códigos de programação para cada uma das atividades desenvolvidas nos dias sete e oito da SD.

Para a realização de um estudo com melhor precisão dos dados da frequência, é necessário o uso de um amplificador, conforme recomendado pelo fabricante do sensor, porém, neste trabalho, não foi necessário, uma vez que o objetivo foi apenas a observação da OEM. De modo geral, o conjunto experimental foi construído e aplicado de forma satisfatória, e tais dificuldades foram superadas para o desenvolvimento da sequência didática.

Com relação a SD, durante sua elaboração, não foi previsto que os participantes teriam dificuldades no manuseio do computador, mas, no decorrer das atividades este fator ficou evidente para a maioria, na qual foi necessário dedicar atenção aos participantes para o manuseio básico de mouse e teclado. A partir disso, a aula no laboratório de informática promoveu a inclusão digital, onde os participantes puderam perceber o meio informatizado em que estão inseridos e como podem fazer parte desse ambiente, despertando o interesse nos participantes para a área computacional.

A física aliada com a computação, proporcionou um estudo prático das OEM e efeito Doppler-Fizeau, além de observar que o experimento com Arduino é compacto, facilitando o transporte e abordagem investigativa com os estudantes, que relataram interesse e não tinham o conhecimento da possibilidade de estudar a física com a computação, como visto em filmes e seriados na TV.

Quanto as aulas, de modo geral, ressaltam-se que para que ocorressem, demandou-se organização prévia com planos secundários para eventuais contextos de anormalidade, ajuste de horários de aplicação, pois a intenção estava em não perder a continuidade das etapas na semana, porém, a escola estava em período de transição de bimestre e houve alguns feriados, além de que, o laboratório de informática estava ocupado em um dos dias úteis de aula com outra turma. Dessa forma, com todos os percalços citados, foram feitas as adaptações, conforme as etapas descritas na metodologia, que tornaram as atividades possíveis.

Além disso, a turma pesquisada estava no contexto do ensino médio com três aulas semanais, e eram aulas em dias consecutivos, favorecendo a realização de atividades práticas. Assim, como a instituição possuía sala de informática e horários possíveis para explorar atividades com programação, tomou-se a decisão de realizá-las, pois a ideia inicial estava contida em apenas investigar o Efeito Doppler-Fizeau em OEM, e verificar a aprendizagem ao relacionar com as aplicações tecnológicas do cotidiano, no entanto, buscou-se o interesse do aluno a partir de atividades práticas com o computador, para que construíssem o aparato experimental e ao final fizessem tal análise.

4.2. Resultados e análises finais

Nesta seção, serão discutidos os resultados coletados e observados no decorrer de cada aula, com detalhes das atividades e discussões realizadas com os estudantes, contribuindo para avaliar a aprendizagem de acordo com as premissas da TAS e proporcionar ao leitor todas as impressões e sugestões de melhorias e potenciais a serem explorados em uma possível aplicação desta sequência ou parte dela. Assim, faz-se necessário abordar cada aula em seções individuais, descritas a seguir.

4.2.1. Aula 1

A primeira aula da SD, conforme mencionado, preocupou-se acerca do contato inicial com os estudantes na temática proposta do efeito Doppler-Fizeau na física moderna, onde foram apresentados a partir de uma **roda de conversa** e posteriormente aplicação do **questionário inicial**.

A roda de conversa, inicialmente, buscou criar um ambiente que relacionasse os saberes da física e o cotidiano dos estudantes, no qual o mediador destacou os ramos da física e algumas relações com as aplicações tecnológicas buscando incentivar a discussão, e ao perceber a interação dos alunos, realizou-se perguntas sobre a física de modo geral e gradualmente especificando aplicações tecnológicas no cotidiano para verificar se os participantes possuíam algum conhecimento que explicasse aplicações advindas do conhecimento do efeito Doppler-Fizeau, porém, sem sucesso, até que, através da intervenção do mediador, realizaram-se indagações-chave para a temática, destacando algumas delas a seguir.

Na primeira pergunta da roda de conversa: *“como funciona a porta do shopping?”*, 13 de 15 alunos argumentaram de modo geral que ocorre devido a um sensor (sem descrições precisas) e um campo magnético instalado na porta. É interessante notar que cada um contribuía com as falas dos outros, de modo que se chegava a um consenso na tentativa de explicar, evidenciando a relação da física nas tecnologias, porém, sem menção ao efeito Doppler-Fizeau.

Para a segunda pergunta: *“durante o trânsito, em algumas vias a velocidade do carro é medida à distância por um agente de trânsito, alguém sabe explicar como isso funciona?”*, apenas 5 alunos descreveram situações ou hipóteses, como: *“é um aparelho que os guardas seguram, já vi em um filme(...)”*; *“na estrada de Presidente Figueiredo (município do Amazonas) tem esses medidores em um poste na beira da via”*; *“acho que ocorre por radiação”*; os demais não souberam explicar. Dessa forma, pode-se observar que relacionaram com observações cotidianas, e apenas um participante aproximou-se da resposta, no entanto, não houve qualquer relação com o efeito Doppler-Fizeau.

Em uma abordagem na astronomia/astrofísica, indagou-se acerca de: “*Já ouviram falar na teoria do Big-Bang?*”; “*O universo está expandido, estático ou contraindo?*”; “*Alguém sabe descrever como podemos confirmar o comportamento de aproximação ou afastamento de uma galáxia?*”. Notou-se que a turma toda participou, e muitos destacaram filmes que tratavam desta temática, documentários e podcasts no *Youtube*. Todos os alunos conheciam a ideia da teoria do Big Bang e entraram em consenso na conversa sobre o universo estar expandindo e a existência dos telescópios Hubble e James Webb, mas novamente sem relações com o efeito Doppler-Fizeau.

Desta maneira, evidencia-se que os estudantes estão inseridos em um meio vasto de aplicações tecnológicas, porém, restringem-se apenas ao uso das ferramentas. As questões levantadas na roda de conversa não foram explicadas e instigou na maioria dos participantes a curiosidade, onde somente seriam esclarecidas no decorrer das próximas aulas. Portanto, foi observado a ausência de explicações físicas, mas percebeu-se o interesse quando foram questionados.

O questionário prévio constituía-se de 10 itens voltados para o aspecto conceitual, sendo o primeiro item discursivo: “*O que são ondas? Quais tipos de ondas você conhece?*”, buscou averiguar se os alunos lembravam dos conceitos fundamentais da ondulatória, e apenas 5 estudantes souberam descrever exemplos e tentativas de definição do conceito de onda.

Nos itens 2, 3 e 4, houve 10, 12 e 5 acertos, respectivamente, dos quais 7 participantes acertaram os itens 2 e 3, e apenas 1 estudante com acerto nos três itens. É importante destacar que se verificou nesses itens a diferença entre ondas mecânicas e eletromagnéticas em abordagens diferentes.

O último item do grupo de questões sobre conceitos fundamentais, item 5, foi sobre o reconhecimento da equação fundamental da ondulatória, e neste item houve apenas 5 acertos. Muitos relataram reconhecer a equação e a inversão de proporcionalidade entre a frequência e o comprimento de onda, mas não souberam reconhecer matematicamente a escrita linear da equação.

Quanto ao item 6 do questionário, no formato de múltipla escolha, foi proposta uma situação de dois observadores parados em relação a uma fonte sonora em movimento, buscando averiguar se os estudantes lembravam do efeito Doppler do som. Neste item, apenas uma pessoa marcou a alternativa correta, interessante destacar que se trata do mesmo estudante que acertou as questões 3, 4 e 5. Portanto, é notório que, devido à assimilação obliteradora descrita pela TAS, algo específico como um fenômeno dentro de toda a ondulatória, sofreria obliteração, e

observaram-se os estudantes lembravam da palavra Doppler do ano anterior, mas com pouca descrição física do fenômeno.

Os itens 7, 8 e 9 foram direcionados para ondas eletromagnéticas, em que tiveram quantitativos de acertos de 4, 2 e 3, respectivamente. Esses itens foram propostos em múltipla escolha com apenas uma alternativa correta, e averiguou-se a relação frequência e comprimento de onda do espectro visível, e o efeito Doppler-Fizeau para ondas eletromagnéticas. Através dos índices de acertos, constata-se que muitos não detinham o conhecimento sobre ondas eletromagnéticas sofrendo o efeito Doppler-Fizeau, e tal fato justifica-se pelo relato dos participantes ao afirmarem que é uma onda “abstrata”, logo, como seria possível observar tal efeito?

No item 10, elaborado de forma discursiva, buscou-se analisar a percepção no cotidiano do emprego do fenômeno Doppler-Fizeau, e 8 estudantes souberam descrever de forma unânime para a onda sonora, exemplificando a ambulância em movimento ou veículo buzinando ao deslocar-se, citando a alteração na frequência detectada pelo observador.

De modo geral, levando em consideração o quantitativo de acertos nos itens de múltipla escolha, a Figura 36 expõe o gráfico que denota a situação inicial.

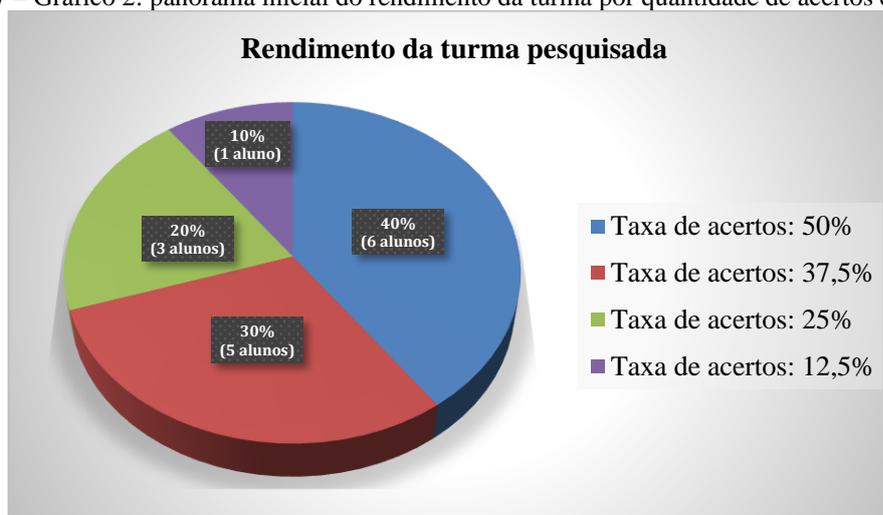
Figura 36 – Gráfico 1: panorama inicial de acertos e erros de cada participante identificados por letras.



Fonte: autor (2023).

Nota-se que no Gráfico 1, a quantidade de erros é superior ou igual à quantidade de acertos, e na Figura 37, Gráfico 2 abaixo, observa-se o panorama da turma, destacando a representação da porcentagem dos alunos e seu rendimento.

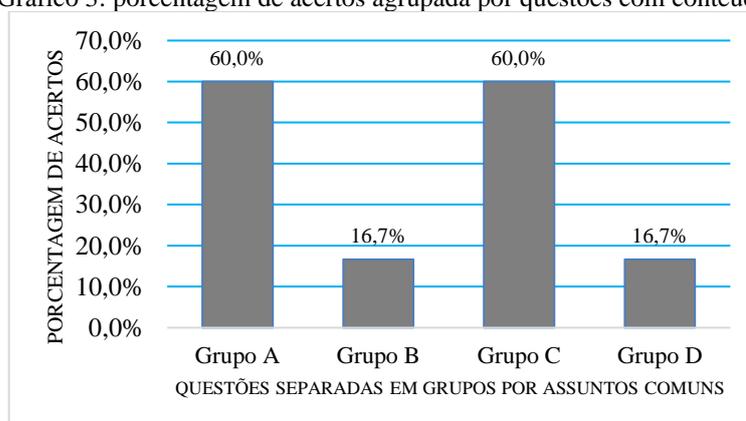
Figura 37 – Gráfico 2: panorama inicial do rendimento da turma por quantidade de acertos em comum.



Fonte: autor (2023).

Destaca-se que a maioria dos participantes (60%) não conseguiu acertar a metade dos itens, e ao analisar o Gráfico 3 abaixo, Figura 38, pode-se observar que os itens estão separados por grupo de conhecimento.

Figura 38 – Gráfico 3: porcentagem de acertos agrupada por questões com conteúdo semelhante.



Fonte: autor (2023).

Os grupos com uma taxa de acerto em 60% do total de participantes, representados por Grupo A (questões 2, 3 e 4), estão relacionados aos conceitos básicos de ondulatória (natureza e meios de propagação) e Grupo C (item 6), referente ao efeito Doppler-Fizeau do Som.

Os grupos com 16,7% dos acertos da turma pesquisada, representados por Grupo B (questões 5 e 7), tratam de grandezas ondulatórias, e Grupo D (questões 8 e 9) sobre o efeito Doppler-Fizeau para ondas eletromagnéticas. Estes resultados, fornecem indícios de significados insuficientes atribuídos as grandezas ondulatórias e quando comparado os dados das questões de efeito Doppler-Fizeau no som e na luz, observa-se uma discrepância, permitindo avaliar que ocorre uma limitação da abordagem desse efeito voltado para ondas

mecânicas (som), sendo que as aplicações do cotidiano dos estudantes refletem o uso tecnológico nas ondas eletromagnéticas.

Diante destes resultados, é importante destacar que a quantidade de acertos não representa o grau de conhecimento dos estudantes diante do assunto, pois ao fim da aplicação do questionário inicial, alguns estudantes relataram o esquecimento devido o tempo sem interação com o estudo destes conceitos, enquanto alguns descreveram não terem estudado no ano anterior. Além disso, esses dados foram importantes para evidenciar as lacunas que deveriam ser revisadas na aula dialogada expositiva no dia seguinte.

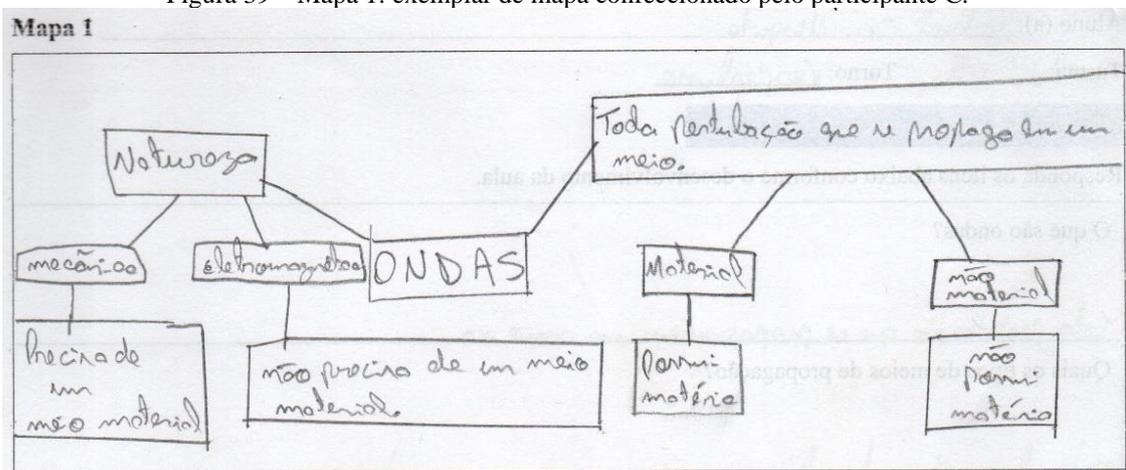
4.2.2. Aula 2

Nesta etapa da SD, foi realizada uma aula expositiva dialogada e objetivou revisar os conceitos fundamentais da ondulatória, para isso usou-se um slide elaborado pelo mediador, e buscou-se abordar os conceitos de forma dinâmica, por meio de indagações e relatos dos participantes. Inicialmente, foi distribuído para cada participante um material de acompanhamento, onde constavam perguntas/lacunas que reforçassem os conceitos físicos e foram preenchidos no decorrer da aula, abordando a classificação das ondas quanto sua natureza, vibração e propagação, e a confecção de um mapa conceitual.

Observa-se que, por ser uma revisão, a maioria recordou com facilidade os conceitos, e alguns participantes tiveram contribuições significativas, pois haviam pesquisado em sua casa as respostas para as lacunas da roda de conversa do dia anterior.

Consequentemente, a construção dos mapas conceituais foi realizada rapidamente por alguns estudantes, enquanto outros estavam dedicados em entregar um mapa detalhado. Ao analisar estes materiais, verifica-se que alguns participantes divergiram na entrega do que foi solicitado, sendo confundidos com um mapa mental. Na Figura 39 é exposto o mapa conceitual (Mapa 1) de um dos participantes.

Figura 39 – Mapa 1: exemplar de mapa confeccionado pelo participante C.



Fonte: autor (2023).

É possível observar que no mapa acima, houve uma boa aproximação da construção de um mapa conceitual, e percebe-se a ausência dos verbos de ligação nas linhas que conectam as estruturas retangulares, ressaltando que o estudante em questão conseguiu descrever de forma hierarquizada os conceitos trabalhados na aula e explicar o porquê da estrutura estabelecida, alegando que a palavra “onda” posta como principal ao meio do mapa dá-se por ser a temática que estava descrevendo e as demais estruturas sendo menos relevantes.

Com isso, os mapas conceituais, ao serem introduzidos em uma atividade como forma de avaliar, devem proporcionar a aprendizagem significativa, afastando-se da aprendizagem comportamentalista, uma vez que não há mapa conceitual correto ou errado, o mediador precisa avaliar qualitativamente sua construção, negociando conceitos e suas posições na hierarquia descrita, possibilitando ao estudante dar significado a hierarquia de conceitos ali elaborada (MOREIRA, 2017).

Portanto, nota-se que, após esta aula, os estudantes conseguiram relembrar os conceitos e argumentaram a necessidade de mais aulas com essa metodologia. Com isso, evidenciaram-se os aspectos da assimilação obliteradora e a importância do uso dos mapas conceituais para analisar como é atribuído o significado aos conceitos.

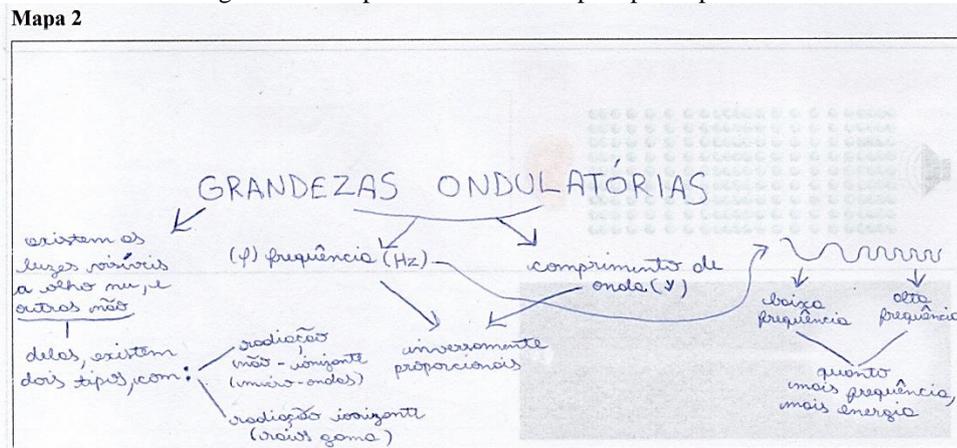
4.2.3. Aula 3

Nesta aula, foram abordados os conceitos de comprimento de onda e frequência, destacando a relação de proporcionalidade inversa e o espectro eletromagnético. Os participantes receberam o material didático complementar para dar continuidade e preencherem as lacunas conforme o desenvolvimento da aula. Ao término, foi solicitado a confecção de um mapa conceitual (Mapa 2) sobre frequência e comprimento de onda (grandezas ondulatórias).

Ao analisar a aula, observou-se que os participantes discutiram sobre situações do dia a dia relacionadas ao uso das ondas presentes no *slide* da aula que mostrava o espectro eletromagnético, onde o mediador ressaltou que na Aula 6 e 7 seriam desenvolvidos mecanismos para aplicar as ondas de micro-ondas em sala por meio de ferramentas digitais, despertando grande interesse na turma.

Os mapas desenvolvidos visaram observar a conceitualização de frequência e comprimento de onda, além de analisar como seria estabelecida a conexão entre essas grandezas ondulatórias. Na Figura 40 abaixo, é possível observar um dos exemplares produzidos pelos estudantes.

Figura 40 – Mapa 2 confeccionado pelo participante O.



Fonte: autor (2023).

Podemos observar que há distinção clara entre as grandezas e um esboço de forma de onda, justificando a relação entre frequência e comprimento de onda. A importância dessa distinção se dá pelo fato de ser a base para o entendimento do efeito Doppler-Fizeau que foi abordado nas aulas posteriores. Destaca-se que todos os participantes fizeram mapas, porém, 5 participantes desenvolveram mapas mentais, tangenciando a atividade proposta.

Dessa forma, é possível notar que houve envolvimento da turma nas atividades, e muitos relataram que no ano anterior esses conceitos pareciam ser complexos, no entanto, perceberam maior facilidade para desenvolver as especificidades de cada grandeza ondulatória. Ficou notório a existência de subsunção devido à facilidade percebida na participação da aula dialogada e confecção do Mapa 2. Enfatiza-se que, mesmo com grande participação nas aulas e atividade de mapa conceitual, a atenção de todos não era sempre conquistada, alguns ficavam dispersos ou se evadiam da sala de aula antes do início das atividades, e o interesse do participante é fator condicional para ocorrer a significação dos conceitos, conforme mencionado na TAS.

4.2.4. Aula 4

Nesta aula, realizou-se a introdução ao Arduino e programação C++, que culminou em uma atividade prática para acionamento de um LED vermelho.

Destaca-se que ao fim da aula anterior, foi avisado aos alunos que esta aula ocorreria no laboratório de informática da própria escola, e no dia seguinte muitos chegaram na escola antes do horário normal de aula, evidenciando a curiosidade pelo que seria feito, pois muitos relataram não conhecer a sala e interesse em computação.

Antes da apresentação dos materiais utilizados, o mediador repassou as informações básicas sobre o Arduino, apontando os cuidados para não danificar o material. Com a turma

organizada em 3 equipes, foi entregue o material didático impresso, elaborado pelo mediador, em que havia instruções para a realização da atividade de acionamento de um LED.

Dessa forma, evidenciou-se participação total da turma e um momento de aprendizagem colaborativa entre as equipes, pois muitos não tinham o conhecimento computacional básico de manuseio do *mouse* e teclado, demonstrando dificuldade na escrita dos códigos de programação, mas, por meio da consulta ao mediador e demais colegas, as atividades foram desenvolvidas com êxito.

Além da atividade de escrita dos códigos no computador, a segunda atividade contemplou em construir o circuito elétrico (Arduino e LED vermelho), proposto no material didático, e teste de funcionamento do código e circuito de cada equipe. Enfatiza-se que este momento proporcionou aos participantes externalizar o interesse na atividade, pois ficaram bastante animados ao observarem que seu trabalho havia funcionado, mesmo que acionar um LED com Arduino seja algo simples, para aqueles estudantes, certamente impactou na visualização do emprego do conhecimento tecnológico (linguagem de programação) em um simples piscar de LED.

Portanto, foi positivamente observado o ânimo dos estudantes com o uso dos computadores, e metade da turma não sabia manusear o computador, logo, esta atividade proporcionou inclusão digital do público que sugeriram até mesmo ideias para outras aplicações, despertando interesse na área computacional. Por outro lado, o tempo de aula (45 minutos) deve ser bem aproveitado, pois é um período curto para a demanda da atividade, uma vez que a execução das atividades foi trabalhosa, demandando de preparação dos computadores e sala de informática com antecedência.

4.2.5. Aula 5

Esta aula contemplou a continuidade da programação com Arduino, culminando na construção do código de programação para simular o funcionamento de um semáforo. Os materiais utilizados foram disponibilizados pelo mediador que, durante as atividades, acompanhou o trabalho de cada equipe, intervindo sempre que necessário.

No momento inicial da aula, as equipes sabiam prontamente o acionamento de um LED e logo começaram a esquematizar a lógica para o acionamento de três LEDs (vermelho, verde e amarelo) em sequência com intervalos de tempos de acionamento distintos. Interessante que foram observadas as discussões das equipes na manipulação do código para estender para três semáforos, e notou-se que cada equipe elaborou o código de forma diferente, com pinos e nomenclatura dos leds distintos uns dos outros.

Após a elaboração do código, cada equipe realizou a montagem do circuito elétrico e testou a programação elaborada, destacando que algumas equipes ajustaram o tempo de acionamento (*delay*) neste momento, pois ao visualizar na prática constataram que estava com o tempo de acionamento curto de cada LED. Lembrando que o Arduino identifica o *delay* de cada pino dos LEDs no formato de milissegundos, gerando a discussão de quanto seria o tempo de cada farol do semáforo, até entrarem em consenso.

A montagem do circuito, Arduino e protoboard com LEDs, despertou o interesse de alguns alunos, enquanto outros identificaram-se com a atividade de escrita e desenvolvimento das programações. Além do novo conhecimento de introdução ao Arduino, exigiu-se dos alunos as conexões do LED com as polaridades corretas, caso contrário o material seria danificado devido à polaridade invertida (anodo e catodo), conhecimentos de eletricidade trabalhados em aulas anteriores no decorrer do ano.

De modo geral, esta aula possibilitou aos estudantes uma visão do meio tecnológico que estão inseridos, na perspectiva de compreensão do uso da computação no dia a dia, mesmo que aplicada a lógica de funcionamento de um semáforo, que proporcionou comentários sobre as possibilidades no mercado de trabalho e a perspectiva para curso de graduação na área computacional, tendo em vista que estavam na última série do EM. Assim, verificou-se a contextualização da inclusão digital para os participantes, e conforme o mediador recomendou que este conhecimento seria necessário nas aulas posteriores para aplicação na física, despertou-se ainda mais o interesse dos participantes.

4.2.6. Aula 6

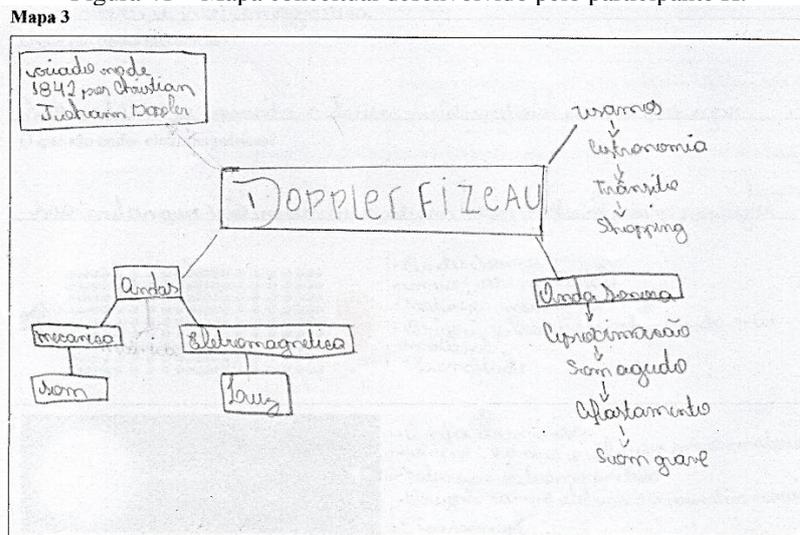
Para fundamentar e discutir o conteúdo norteador deste trabalho, o efeito Doppler-Fizeau, dedicou-se esta aula para subsidiar as atividades posteriores de aplicação, onde foi tratado o aspecto histórico do desenvolvimento da teoria, a ocorrência em ondas mecânicas e eletromagnéticas, equações e aplicações tecnológicas no cotidiano, que esclareceu as discussões da roda de conversa.

Na aula expositiva dialogada, usou-se um slide para melhor explanação do fenômeno. Ressalta-se que muitos não sabiam da existência de um efeito Doppler-Fizeau para a luz, e ao relacionar a frequência das cores do espectro visível com o afastamento ou aproximação de uma fonte para um observador estático, evidenciou-se a relação que os estudantes identificaram ao visualizar a distorção que a frequência sofre e a manifestação desta alteração expressa no espectro visível, em que o mediador mencionou o desvio do espectro para o azul (maior frequência devido aproximação) ou vermelho (menor frequência devido afastamento), implicando na aplicação da astronomia. Para o espectro de micro-ondas, foi explicado aos

participantes que se dá em dispositivos para medir velocidade nas vias, seja por um agente estático na via ou um poste com as “araras” eletrônicas fiscalizando a velocidade dos condutores.

Ao fim da aula dialogada, os alunos confeccionaram os mapas conceituais, e desta vez a maioria desenvolveu um mapa com boa estruturação dos conceitos. Na Figura 41 abaixo, tem-se um exemplar.

Figura 41 – Mapa conceitual desenvolvido pelo participante H.

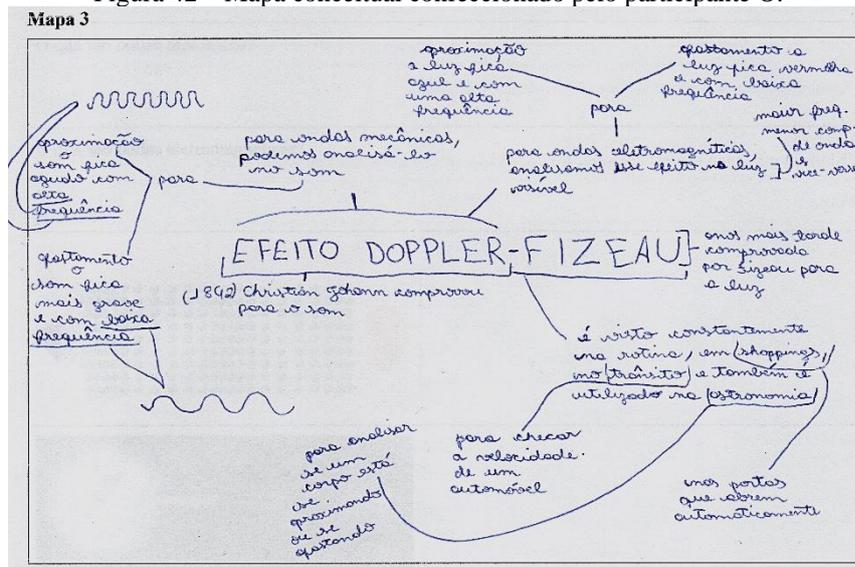


Fonte: autor (2023).

Um fator a ser observado nas atividades de mapas conceituais, foi a evolução dos estudantes, pois melhoraram nitidamente suas habilidades e os conceitos abordados anteriormente iam ganhando novas posições, mesmo quando não eram mencionados, como foi o caso desta aula, onde o participante H posiciona a natureza das ondas e exemplifica a luz e o som, resgatando conceitos das aulas anteriores, sendo este um indício de diferenciação progressiva.

Na Figura 42 abaixo, podemos observar outro mapa conceitual, com informações que apontam uma evolução do mapa desenvolvido por este participante exposto anteriormente na Figura 41.

Figura 42 – Mapa conceitual confeccionado pelo participante O.



Fonte: autor (2023).

A partir de uma abordagem qualitativa, percebe-se que o participante relaciona conceitos com palavras de ligação, apontando representações de ondas e aplicações conforme discutido na aula dialogada, e ao explicar a construção descreveu a evolução nas diferenciações elencadas, que são aspectos ondulatórios, relacionando o estudo de onda e o efeito Doppler-Fizeau discutido, comentários estes que indicam para uma reconciliação integrativa no processo de aprendizagem. Interessante comentar que todos assistiram à mesma aula, com a mesma abordagem e no mesmo contexto, porém, não há mapas que partem de uma mesma estrutura, todos possuem sua característica individual, onde cada participante expressou nesta atividade sua compreensão dos conceitos abordados.

Ao obter tais resultados desta aula, observou-se a compreensão da turma diante da ocorrência desse efeito para as ondas mecânicas e eletromagnéticas. Assim, a aula experimental poderia ser iniciada.

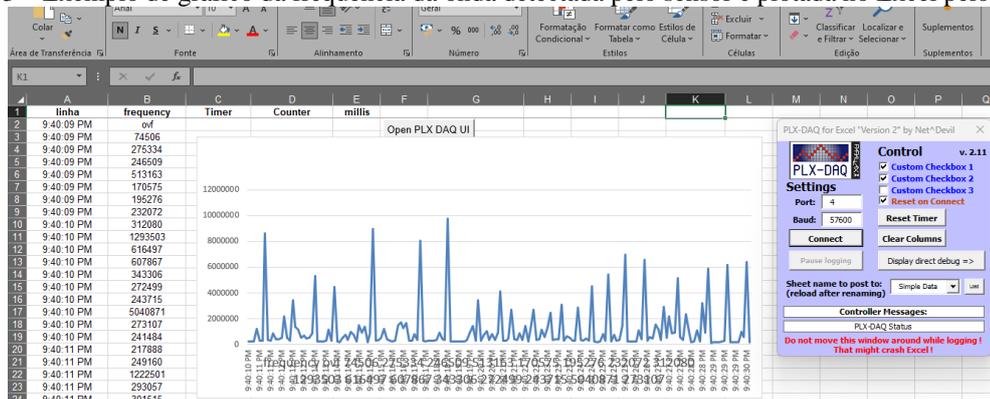
4.2.7. Aula 7

A partir do desenvolvimento das atividades anteriores, introduziu-se o uso do Arduino para aplicação prática do efeito Doppler-Fizeau para ondas eletromagnéticas. Inicialmente, os estudantes escreveram o código de programação no terminal do computador para enviar ao Arduino e, ao final da aula, construíram o circuito elétrico para teste de funcionamento do sensor Doppler Radar (HB100).

O conjunto experimental usado nesta aula traz versatilidade para aplicação em aulas, possibilitando a abordagem deste efeito de forma dinâmica, pois os componentes são compactos e de fácil aquisição em sites de eletrônicos na internet. O sensor funciona emitindo ondas na faixa de micro-ondas e, com a devida programação, as informações de frequência podem ser

plotadas em gráficos no Excel. Com isso, o mediador repassou o código de programação e, após as equipes concluírem a tarefa, os participantes foram questionados sobre o comportamento observado no gráfico da onda, apontado as causas dos picos e o que significava tais ondulações. Na Figura 43 abaixo é possível observar o gráfico da onda.

Figura 43 – Exemplo de gráfico da frequência da onda detectada pelo sensor e plotada no Excel pelo Arduino.



Fonte: autor (2023).

Os estudantes escreveram que ao aproximar a mão do sensor, o gráfico no Excel apresentava uma crista, um pico, e ao afastar ocorria uma queda brusca, onde relacionaram ao efeito Doppler-Fizeau que a onda apresentava, pois quando deixavam a mão parada na frente do sensor observavam que não ocorria ondulação. O mediador explicou que o fato de não ocorrer ondulação, significava que o sensor ao detectar a onda por reflexão, identificava a mesma frequência da onda emitida, logo não havia efeito Doppler-Fizeau da onda propagada pelo sensor, explicando dessa forma que a variação dessa frequência possibilitava gerar dados para obter informações como velocidade e posição de um alvo.

Durante essa atividade, foi observada pouca familiaridade na interpretação gráfica, fator este que implicou na necessidade de averiguar no questionário final se conseguiriam compreender a formação da onda em função do tempo.

Portanto, foi constatado a eficiência do dispositivo experimental, mostrando-se eficaz para uma introdução dinâmica e investigativa da ocorrência do gráfico plotado, porém, a leitura de gráfico deve ser enfatizada, pois se observou certa dificuldade matemática na interpretação das informações expostas. Ao fim desta aula, todos mostraram interesse em como usar a informação da frequência detectada pelo sensor, que será discutida na seção seguinte.

4.2.8. Aula 8

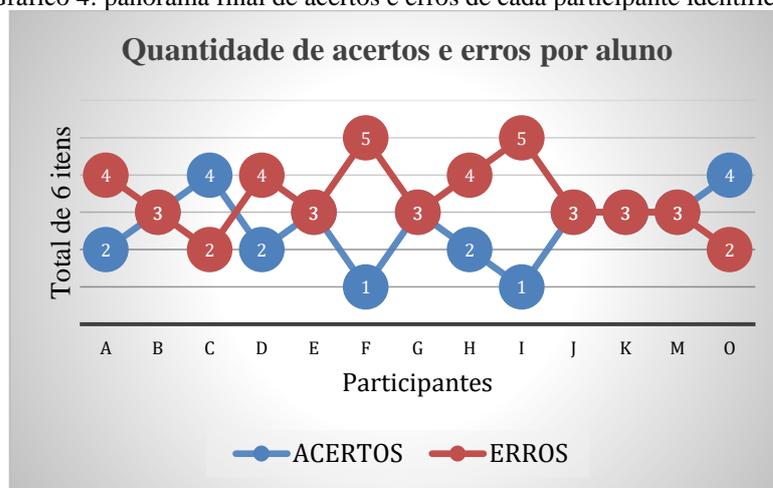
Nesta última aula, foi realizada a aplicação do sensor HB100 com Arduino, simulando um medidor de velocidade e porta automática por aproximação. Estas aplicações ficaram para o último dia devido aos conhecimentos prévios necessários para compreender a complete

destas tecnologias, assim, inicialmente, os estudantes realizaram a escrita do código de programação com auxílio do mediador para explicar o significado das linhas de programação. Por fim, após todas as investigações realizadas sobre a aplicação do sensor, avaliaram-se as aprendizagens desenvolvidas através do questionário final.

Observa-se que o material experimental facilita a abordagem do efeito Doppler-Fizeau nas ondas eletromagnéticas, proporcionando a interação dos participantes com o experimento, pois eles construíram o material experimental e ao final atribuíram significados, interligando os conceitos desenvolvidos anteriormente com a prática. É nítido o interesse que os estudantes despertaram na área da física agregada a computação, pois estão inseridos no contexto digital, e agregar essa realidade ao conhecimento físico, potencializa a aprendizagem, pois em todos os momentos foram notadas justificativas do desinteresse em outras aulas por não relacionarem os fenômenos teóricos com a realidade do estudante.

Os resultados coletados no questionário final, expostos na Figura 44, gráfico 4 abaixo, corroboram com as observações destacadas em cada atividade realizada nas aulas.

Figura 44 – Gráfico 4: panorama final de acertos e erros de cada participante identificados por letras.



Fonte: autor (2023).

Estes resultados revelam melhorias no quantitativo de acertos de cada participante, em que dois participantes (C e O) obtiveram resultados acima da média, seis participantes com 3 acertos e outros cinco com acertos abaixo da média. É importante destacar que, as 6 questões desta avaliação final, divididas igualmente para onda mecânica e eletromagnética para o efeito Doppler-Fizeau, foram retiradas de processos seletivos do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Universidade de Brasília (UnB) e Universidade de Passo Fundo (UPF). Assim, observa-se que a maioria, 8 de 13 alunos, teve rendimento maior ou igual a 50% nos problemas propostos, sendo situações diferentes daquelas

abordadas nas aulas e que exigiam maior compreensão. A partir destes dados, podemos observar o panorama da turma, que está exposto no Gráfico 5 da Figura 45 abaixo.

Figura 45 – Gráfico 5: panorama final do rendimento da turma por quantidade de acertos em comum.

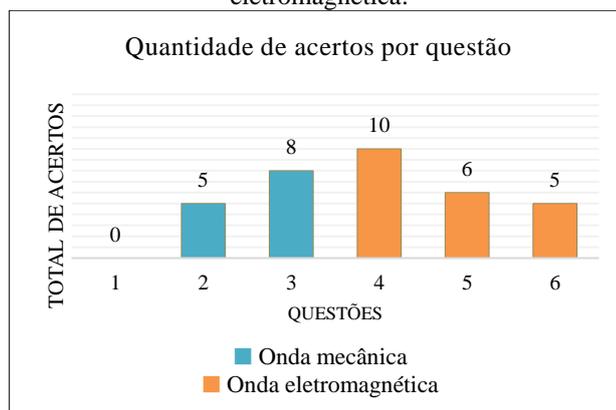


Fonte: autor (2023).

Destaca-se que houve uma crescente no quantitativo do rendimento da turma, que nos possibilita observar indícios de aprendizagem, uma vez que, inicialmente, conforme o Gráfico 2, não houve rendimento acima de 50%, enquanto neste cenário pós-sequência didática, observa-se tal evolução em um contexto com questões de maior complexidade. É interessante destacar que os alunos com baixo rendimento justificaram-se devidos fatores externos, problemas familiares, e que durante as atividades práticas nas aulas anteriores não demonstraram esforços, distanciando-se da possível aprendizagem significativa dos conceitos do fenômeno estudado, fato este dentro da normalidade, além de que alguns estudantes não possuem interesse na abordagem computacional.

Na Figura 46 abaixo, Gráfico 6, estão expostos os dados que apontam a quantidade de acertos com relação ao grupo de questões relacionadas ao efeito Doppler-Fizeau de onda mecânica (1 a 3) e eletromagnética (4 a 6).

Figura 46 – Gráfico 6: rendimento da turma diante das questões de efeito Doppler-Fizeau para onda mecânica e eletromagnética.



Fonte: autor (2023).

É observado nos resultados uma quantidade significativa de acertos para a abordagem da onda eletromagnética, tendo em vista que esta foi o alvo da aplicação, em que envolvia aplicação deste efeito na astronomia, pois não foram encontradas questões conceituais sobre a aplicação em demais situações.

Destaca-se que não houve acerto no item 1, sendo que este item exigia dos estudantes conhecimentos sobre a construção de gráficos, e verificou-se esta lacuna na interpretação da frequência em função do tempo, com uma fonte de som aproximando e depois afastando-se do observador estático, algo que não foi priorizado na construção das atividades.

De posse destes resultados, constata-se que nesta aula foi possível verificar a OEM de micro-ondas sofrendo efeito Doppler-Fizeau de forma dinâmica, onde os participantes realizavam a interação com o experimento que desenvolveram, além da abrangência dos conhecimentos de computação e física estudados em sala de aula constatando o funcionamento das tecnologias no cotidiano. Destaca-se que alguns estudantes possuíam o entendimento de que uma radiação eletromagnética é algo relacionado a danos à saúde, como foi relatado por alguns participantes, e comprovado que há um espectro associado ao tipo de radiação.

Portanto, esta aula superou os resultados esperados, onde se buscava analisar apenas a aprendizagem do Efeito Doppler-Fizeau, porém observaram-se relatos esclarecedores sobre as radiações eletromagnéticas e o despertar para a abordagem da física computacional, algo até então desconhecido pelos estudantes. Dessa forma, o conjunto experimental mostrou-se eficiente e promissor para novas aplicações que podem transcender a sala de aula.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi elaborado a partir do interesse do autor em investigar as contribuições que o uso de Tecnologia Digital de Informação e Comunicação pode proporcionar na abordagem da física moderna e contemporânea, realizada por meio de uma sequência didática, destacando-se do ensino que na maioria das vezes é abordado de forma tradicional e restringida a física clássica.

Dessa forma, foram propostas quatro atividades práticas usando o Arduino, sendo a primeira uma introdução à programação (C++) e as demais, experimentos referentes a informação da frequência detectada por reflexão através de um sensor de micro-ondas, cujo conjunto integrou uma SD, composta de oito etapas com avaliações diagnósticas inicial e final, além de sondagem contínua (confeção de mapas conceituais e observação) do desenvolvimento das atividades

Este trabalho surgiu de um conjunto de interesses do autor que foi despertado a partir do levantamento bibliográfico e necessidade ao abordar em sala de aula o efeito Doppler-Fizeau, que na maioria das vezes é limitado a abordagem teórica e observação do fenômeno para uma onda mecânica, uma vez que este fenômeno também ocorre para ondas eletromagnéticas. Enfatiza-se que, mesmo sem um laboratório de ciências na escola, o conjunto experimental proposto pelo autor supre esta ausência, pois o Arduino e o sensor HB100 podem ser facilmente obtidos em lojas virtuais e com baixo custo. Dessa forma, acredita-se que este trabalho irá despertar o interesse em outros professores para poderem aplicar em suas aulas e contribuir para o estudo e a aprendizagem dos estudantes.

Para a realização deste trabalho, demanda-se de empenho do professor mediador, pois é necessários conhecimentos extracurricular da física, e além do preparo do profissional, ao projetar as atividades em escolas públicas, verifica-se um cenário desafiador, pois será necessário contornar diversos obstáculos: período de aula reduzido pelo novo ensino médio implicando no aumento de turmas por professor, pouca ou nenhuma infraestrutura adequada para realização de atividade experimental, superlotação nas salas de aula, público alvo com subsunçores adequados, e dentre outras observações nas instituições de ensino da educação básica.

Com isso, a partir dos resultados obtidos, observa-se um bom impacto na aprendizagem, que contemplou a inserção de metodologias ativas com uso de computação na física, assim, a partir dos diagnósticos realizados, foi observado uma prática potencial de aprendizagens, conceitos físicos, inclusão digital e conseqüentemente compreensão das tecnologias no cotidiano.

Portanto, ao discutir as observações nas etapas da SD e resultados obtidos, espera-se que o leitor possa visualizar a amplitude deste trabalho e sinta-se motivado em reaplicar, propondo melhorias para agregar na aprendizagem dos estudantes, que ao ser posto como autor principal para o andamento das atividades, torne-se o autor de seu aprendizado. Assim, este trabalho foi a soma de esforços realizados pelo autor para contribuir, junto de tantos outros profissionais da educação, com metodologias alternativas que contribuam com o ensino de física na educação básica.

Dessa forma, os objetivos da pesquisa foram alcançados, pois o uso de TDIC nesta SD possibilitou abordagens que contribuem com a formação integral do estudante, e ao visualizar as discussões teóricas em sala de aula e posterior aplicação e investigação experimental, proporcionou aos participantes um olhar crítico diante da realidade tecnológica em que estão inseridos. Portanto, a partir da aplicação da SD, observou-se que os participantes puderam compreender a importância do efeito Doppler-Fizeau, que está presente em diversas situações, verificando que pode ser constatado através da percepção de som, no regime clássico, quanto sob efeito relativístico por meio das ondas eletromagnéticas, sendo amplamente utilizado em sistemas de acionamento de porta, medidores de velocidade e teoricamente utilizado para explicar a expansão do universo.

De modo geral, as pesquisas realizadas para nortear a confecção desta obra, foram desafiadoras, pois não há trabalhos voltados para o estudo experimental das ondas eletromagnéticas na educação básica, logo, tem-se um caráter inédito para esta aplicação, e sua elaboração fora tão trabalhosa quanto sua aplicação em sala de aula. Contudo, acredita-se no potencial desta abordagem, corroborado pelos resultados observados e diante da satisfação da maioria dos participantes comprovada no decorrer das atividades.

De posse destes comentários, tem-se a intenção de realizar novas pesquisas de cunho quantitativo acerca do sensor HB100 com Arduino, em que a abordagem matemática se faz importante, pois é integrante do desenvolvimento científico da física, e outras abordagens qualitativas investigativas, pois o conjunto experimental mostrou-se promissor para uso em sala de aula. Para futuras aplicações, no campo imaginário, poderiam ser propostas diversas aplicações, seja na cinemática, eletromagnetismo ou astronomia, pois ao tratar de ondas eletromagnéticas esta pode ser analisada em várias perspectivas, e ao mencionar o efeito Doppler em sala de aula, espera-se que a partir deste trabalho, o professor possua uma alternativa para abordar as ondas eletromagnéticas, rompendo a limitação antes encontrada apenas na abstração, fazendo-se assim com o caráter experimental.

REFERÊNCIAS

- ANASTASIOU, Lea das Graças Camargo; ALVES, Leonir Pessate. **Processos de ensinagem na universidade: Pressupostos para as estratégias de trabalho em aula**. Ed. Joinville, SC, 2007.
- ARDUINO.CC, **Arduino Hardware**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/hardware>>. Acesso em 17 de março de 2023.
- BASSALO, J. **SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://seara.ufc.br/wp-content/uploads/2019/03/folclore107.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2023.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018.
- BRASIL. **Parâmetros curriculares nacionais: terceiro e quarto ciclos do ensino fundamental: introdução aos parâmetros curriculares nacionais / Secretaria de Educação Fundamental**. Brasília: MEC/SEF, 1998.
- DOPPLER, C. A. **Sobre a luz colorida as estrelas duplas e outras estrelas do céu. Tentativa de uma teoria geral que contém como parte Integrante de si o Teorema da Aberração de Bradley**. 1. ed. Praga: in Commission bei Borrosch & André, 1842. v. 1
- FERNANDES, A, Auler, L, Huguenin, J e Balthazar, W. **Efeito Doppler com tablet e smartphone**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol: 38 (3) pp: e3504-1 - e3504-8, 2016.
- FREIRE, Paulo. **Pedagogia do Oprimido**. São Paulo: Paz e Terra, 2006.
- GÓMEZ-TEJEDOR J, CASTRO-PALACIO J e MONSORIU J. **The acoustic Doppler effect applied to the study of linear motions**. European Journal of Physics. Vol.: 35 (2), pp: 025006 (9pp), 2014.
- GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3a Edição, Pearson Edition, São Paulo (2013).
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física. Vol. II**. Grupo Gen-LTC, 2016.
- HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. 12ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- KLEIN, P.; HIRTH, M.; GRÖBER, S.; KUHN, J.; MÜLLER, A. Classical experiments revisited: **smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics**. Physics Education, v. 49, n. 4, 2014.
- MACHADO, K. D. **Teoria do eletromagnetismo**. Volume 2. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2002.
- MOREIRA, M.A. (1995). Monografia nº 10 da *Série Enfoques Teóricos*. Porto Alegre. Instituto de Física da UFRGS. Originalmente divulgada, em 1980, na série "Melhoria do Ensino", do Programa de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino Superior (PADES)/UFRGS, Ne 15. Publicada, em 1985, no livro "**Ensino e aprendizagem: enfoques teóricos**". São Paulo, Editora Moraes, p. 61-73. Revisada em 1995.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: EPU, 1999.
- MOREIRA, M. A. **Ensino e aprendizagem significativa**. LF Editorial, 2017.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa: da visão clássica à visão crítica.** Conferência de encerramento do V Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, Madrid, Espanha, setembro de 2006 e do I Encuentro Nacional sobre Enseñanza de la Matemática, Tandil, Argentina, abril de 2007. Disponível em: www.if.ufrgs.br/~moreira/visaoclasica/visaocritica.pdf

NASCIMENTO, Marcílio da Silva. **Efeito doppler no ensino médio: uma sequência de ensino de ondulatória com prática, uso de TICs e metodologia ativa.** Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense. Volta Redonda, p. 120. 2019. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/13269/Dissertacao%20Marc%c3%adlio%20Da%20Silva%20Nascimento.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 9 mar. 2023.

NUSSENZVEIG, HERCH MOYSÉS. **Curso de física básica, volume 2: Fluidos, Oscilações e ondas, Calor.** Moysés Nussenzveig, 5ª edição. São Paulo. Editora Blucher. 2014.

PIRES, A. S. T. **Evolução das ideias da física.** 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

SILVA, K. W.; SANTOS, B. M.; SILVA, L. R. **Utilização de apps para o ensino do efeito Doppler.** In: I Encontro Regional do MNPEF Centro-Oeste/Norte, Revista do Professor de Física, v. 3, n especial (2019), pág. 89 – 90.

SOUSA, M. A. A. de, SILVA, B. C., SANTOS, L. de M., & SOUZA, E. V. de. **Análise do efeito Doppler, aplicações e experimento com uso de TIC's designado para ensino-aprendizagem.** International Journal Education and Teaching (IJET – PDVL), v. 4, n. 3, 19-33, set./dez. 2021. Disponível em: <http://ijet-pdvl.com/index.php/pdvl/article/view/195>. Acesso em: 18 de jun. 2023.

TIPLER, P.A. e LLEWELLYN, R.A., **Física moderna**, LTC, São Paulo, 2014.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Sears e Zemansky. **Física III: Eletromagnetismo.** 10. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2004.

YOUNG, H. D. et al. **Física II - ótica e física moderna.** 14. ed. Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2016.

YOUNG, H. D. et al. **Física III - eletromagnetismo.** 14. ed. Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2016.

APÊNDICE A – Questionário inicial

Auno (a): _____

Turma: _____ Turno: _____

1. O que são ondas? Quais tipos de ondas você conhece?

2. Qual é a diferença entre uma onda mecânica e uma onda eletromagnética?

- a) A onda mecânica se propaga apenas em meios materiais, enquanto a onda eletromagnética pode se propagar no vácuo;
- b) A onda mecânica transporta matéria, enquanto a onda eletromagnética transporta energia;
- c) A luz e o som são ondas mecânicas e as ondas do Wifi são ondas eletromagnéticas;
- d) Não há diferença entre as duas.

3. Suponha que haja uma explosão no espaço sideral e um astronauta estivesse próximo:

- a) ele ouviria o som da explosão;
- b) ouviria o som da explosão, mas não enxergaria a luz da explosão;
- c) não ouviria o som da explosão, mas enxergaria a luz da explosão;
- d) não ouviria o som nem a luz da explosão.

4. (Mackenzie-SP) Considere as seguintes afirmações:

- I. As ondas mecânicas não se propagam no vácuo.
- II. As ondas eletromagnéticas se propagam somente no vácuo.
- III. A luz se propaga tanto no vácuo como em meios materiais, por isso é uma onda eletromecânica.

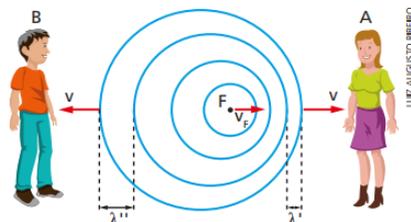
Assinale:

- a) se somente a afirmação I for verdadeira.
- b) se somente a afirmação II for verdadeira.
- c) se somente as afirmações I e II forem verdadeiras.
- d) se somente as afirmações I e III forem verdadeiras.

5. Qual é a relação entre o comprimento de onda, a frequência e a velocidade de propagação de uma onda?

- a) $\lambda = v \cdot f$;
- b) $v = \lambda \cdot f$;
- c) $f = v \cdot \lambda$;
- d) $v = f/\lambda$.

6. Uma ambulância (fonte sonora F) movimenta-se em relação a duas pessoas (observadores A e B) paradas. A figura abaixo refere-se a qual fenômeno físico?

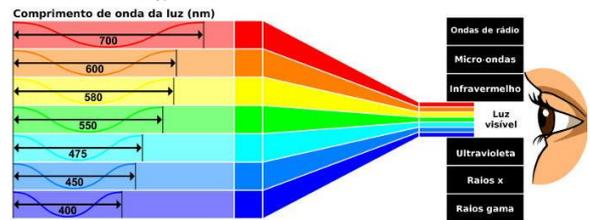


O fenômeno da figura acima descreve o:

- a) Efeito de Doppler-Fizeau, com frequência maior no observador B e menor para o observador A;
- b) Efeito Doppler-Fizeau, com frequência menor no observador B e maior para o observador A;

- c) Efeito Doppler-Fizeau, com comprimento de onda e frequência maior no observador B do que para o observador A;
- d) Efeito Doppler-Fizeau, com comprimento de onda e frequência iguais no observador A e observador B;

7. Observe a imagem abaixo:



Podemos afirmar que:

- a) A luz de cor Verde possui maior frequência que a cor azul;
- b) A luz de cor Vermelho é a que possui maior frequência e menor comprimento de onda dentre todas as luzes visíveis;
- c) A cor azul é a que possui maior frequência e menor comprimento de onda dentre todas as luzes visíveis;
- d) A luz que possui maior comprimento de onda possui também maior frequência.

8. O fenômeno do efeito Doppler-Fizeau:

- a) ocorre somente para ondas sonoras;
- b) ocorre somente para ondas luminosas;
- c) pode ocorrer em ondas mecânicas e eletromagnéticas;
- d) pode ocorrer desde que os observadores e a fonte estejam em repouso no mesmo referencial.

9. O Efeito Doppler-Fizeau descreve que:

- a) Não ocorre em ondas sonoras enquanto que para a onda luminosa percebe-se luz vermelha (aproximação) e azul (afastamento);
- b) Para a onda sonora percebe-se um som agudo (aproximação) ou (afastamento) e para a onda luminosa não é possível ocorrer esse fenômeno;
- c) Para a onda sonora percebe-se um som grave (aproximação) ou agudo (afastamento) e para a onda luminosa percebe-se luz vermelha (aproximação) e azul (afastamento);
- d) Para a onda sonora percebe-se um som agudo (aproximação) ou grave (afastamento) e para a onda luminosa percebe-se luz azul (aproximação) e vermelho (afastamento).

10. Você sabe onde pode ser aplicado o Efeito Doppler-Fizeau em nosso cotidiano? Se possível, cite exemplos

APÊNDICE B – Slide aula 1: conceitos fundamentais das ondas.

Efeito Doppler

Prof. José Victor

Ondas – conceitos fundamentais

O que são ondas?

Toda perturbação que se propaga em um meio.



Ondas – conceitos fundamentais

Quais os tipos de meios de propagação?

Material e não material.

O que seria um meio material?

Meio constituído de partículas (matéria): sólido, líquido gasoso.

O que seria um meio não material?

Meio em que não é constituído por partículas (ausência de matéria): vácuo.

Ondas – conceitos fundamentais

Qual a natureza das ondas?

Mecânica e Eletromagnética

O que são ondas mecânicas?

São ondas que necessitam de um meio material para se propagar.

O que são ondas eletromagnéticas?

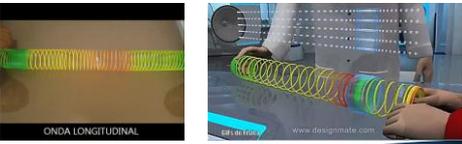
São ondas que NÃO necessitam de um meio material para se propagar.

Ondas – conceitos fundamentais

As ondas podem ser classificadas quanto a sua direção de vibração e propagação.

Ondas Longitudinais

A direção do movimento de vibração coincide com à de propagação.

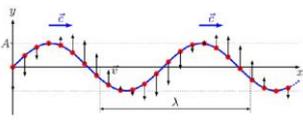


Ondas – conceitos fundamentais

As ondas podem ser classificadas quanto a sua direção de vibração e propagação.

Ondas Transversais

A direção do movimento de vibração é perpendicular à de propagação.



Ondas – conceitos fundamentais



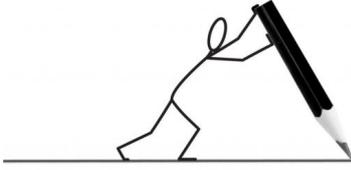
- Onda sonora
- meio: ar (material)
- Natureza: mecânica
- Origem: vibração (partículas) do meio material
- Longitudinal



- Onda luminosa
- meio: vácuo e alguns meios materiais
- Natureza: eletromagnética
- Origem: campo elétrico e magnético variáveis
- Transversal

Ondas – Atividade 1: mapa 1

Atividade 1: faça um mapa mental/conceitual dos assuntos abordados neste momento.



APÊNDICE C – Material didático 1: conceitos fundamentais

Aluno (a): _____

Turma: _____ Turno: _____

Conceitos fundamentais

Responda os itens abaixo conforme o desenvolvimento da aula.

O que são ondas?

Quais os tipos de meios de propagação?

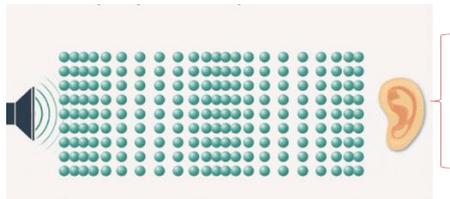
O que seria um meio material?

O que seria um meio não material?

Qual a natureza das ondas?

O que são ondas mecânicas?

O que são ondas eletromagnéticas?



Elabore um mapa conceitual dos assuntos abordados no espaço abaixo indicado **Mapa 1**

Mapa 1

APÊNDICE D – Material didático 2: grandezas ondulatórias.

Grandezas Ondulatórias

Responda os itens abaixo conforme o desenvolvimento da aula.

O que são grandezas ondulatórias?

Quais grandezas ondulatórias foram estudadas?

Qual a relação existente entre essas grandezas analisadas?

Elabore um mapa conceitual dos assuntos abordados no espaço abaixo indicado **Mapa 2**

Mapa 2

APÊNDICE E – Slide aula 2: grandezas ondulatórias

Ondas – Grandezas Ondulatórias

Quais grandezas analisaremos nas ondas?

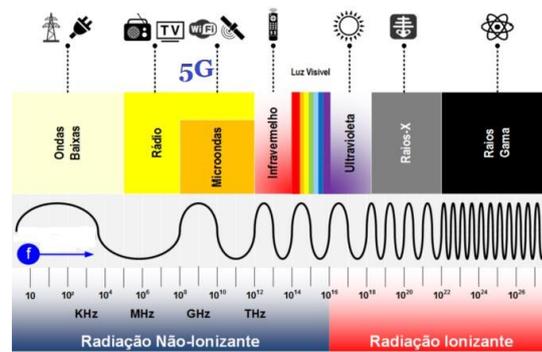
Frequência (Hz)

Comprimento de onda (λ)

Energia

Lembre-se: Essas grandezas são **inversamente proporcionais !!**

Ondas – Grandezas Ondulatórias



Ondas – Atividade2: mapa 2

Atividade 2: faça um mapa mental/conceitual dos assuntos abordados neste segundo momento.



APÊNDICE F – Material didático 3: Introdução a programação de Arduino com Led.

Introdução ao Arduino e programação.

Conhecendo o Arduino

➤ O que é o Arduino?

O Arduino consiste em uma placa com processador microcontrolador, com entradas e saídas digitais e analógicas, possibilitando a ligação com sensores e cada sensor possui uma função específica.



➤ Como nos comunicamos com o Arduino?

Para que o conjunto (placa e sensores) funcione, usa-se o aplicativo IDE (Ambiente Integrado de Desenvolvimento), assim usamos **Linguagem de Programação para construir os códigos de programação** e possibilitar a comunicação do Arduino com os sensores conectados.

➤ O que é código de programação?

Para que o Arduino controle os sensores, é necessário enviar esse comando ao Arduino, caso contrário nada acontecerá. Assim, você construirá o código de programação, usaremos a linguagem de programação C++, que irá comunicar-se com o microcontrolador Arduino e este controlará os sensores que você conectou.

Cada sensor possui funções próprias (bibliotecas), que estão disponíveis no IDE ou sites de desenvolvedores (Arduino.CC, GitHub e blogs).

OBSERVAÇÃO: Formem 4 grupos buscando quantidades iguais de alunos, em seguida cada equipe deve ficar em uma das mesas.

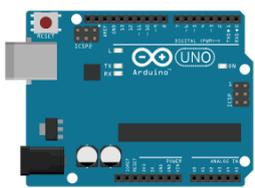
Atividade prática com Arduino

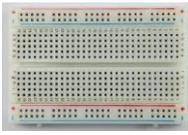
➤ Qual o objetivo?

Compreender o funcionamento do Arduino através do acionamento de um LED vermelho.

➤ Quais componentes serão utilizados?

Os componentes usados estão dispostos na Tabela 1 abaixo:

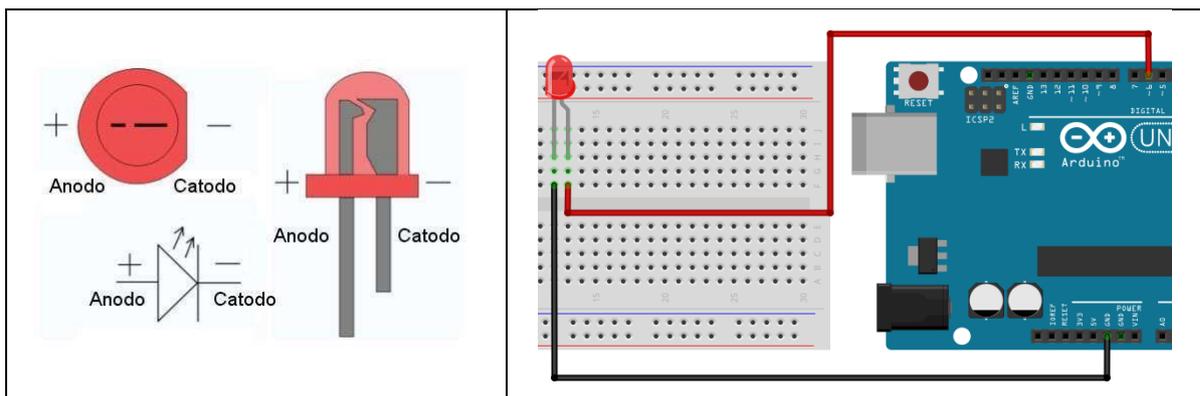
Arduino Uno	
7 Jumper (conectores tipo macho-macho)	

Protoboard	
Cabo Serial USB	
LEDs	

Para que o Arduino controle os sensores, é necessário enviar esse comando ao Arduino através da IDE, caso contrário nada acontecerá. Assim, você construirá o código de programação (usaremos a linguagem C++).

Fazer: acionar um LED.

Ação 1 - monte o circuito elétrico abaixo:



Ação 2 - Escreva o código de programação abaixo na IDE do Arduino:

```
void setup ()
{
  pinMode (6, OUTPUT);
}
void loop ()
{
  digitalWrite (6, HIGH);
  delay (1000);
  digitalWrite (6, LOW);
  delay (1000);
}
```

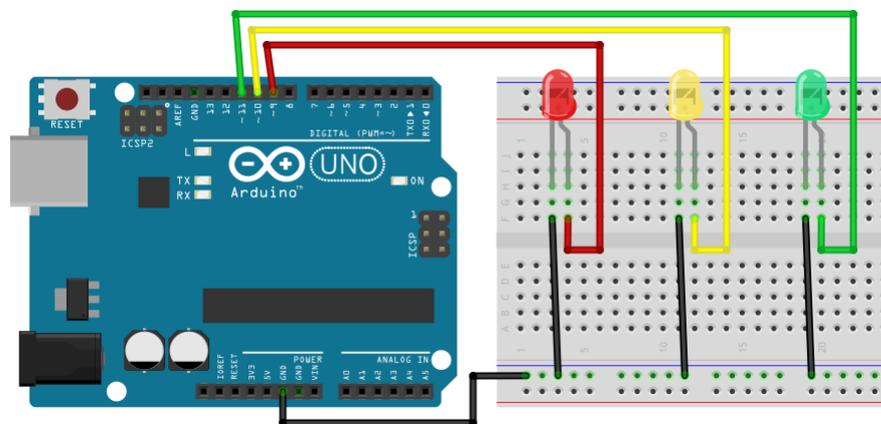
Ação 3 – auxilie as equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

Atividade prática com Arduino

Desafio: construir lógica de programação de um semáforo

Com base no que foi feito para acionar um LED, desenvolva um código e crie um semáforo. Use o circuito elétrico abaixo:

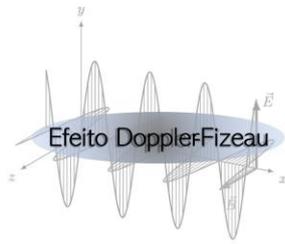
Ação 1 - monte o circuito elétrico abaixo:



Ação 2 – A partir do código anterior, **construa** o código de programação na IDE do Arduino simulando um semáforo:

Ação 3 – auxilie as demais equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

APÊNDICE G – Slide aula 3: efeito Doppler-Fizeau



O Efeito Doppler-Fizeau

No ano de 1842, **Christian Andreas Doppler** descobriu o fenômeno conhecido como "**efeito doppler**". Austríaco matemático e professor de física experimental pela universidade de Viena



Comprovou o efeito doppler para o **som** através de experimentos e **previu** o mesmo efeito para a **Luz**.



Anos mais tarde, **Fizeau** (físico francês) comprovou devidamente esse efeito para a luz.

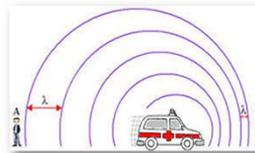
O Efeito Doppler-Fizeau: Vídeo



Onda – Efeito Doppler

O efeito Doppler explica a **alteração aparente da frequência de uma onda quando existe movimento relativo entre a fonte e o observador**

Para ondas **mecânicas**



Aproximação: som agudo/alto
Alta Frequência

Afastamento: som grave/baixo
Baixa Frequência

Onda – Efeito Doppler

O efeito Doppler explica a **alteração aparente da frequência de uma onda quando existe movimento relativo entre a fonte e o observador**

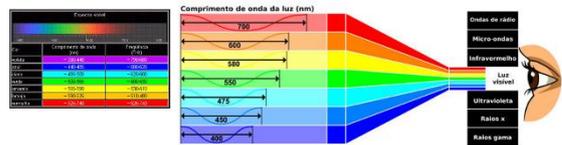
Para ondas **eletromagnéticas**

Cor	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)
roxo	380-450	690-790
verde	495-570	520-600
laranja	590-625	480-510
vermelho	625-740	400-480

Onda – Efeito Doppler

O efeito Doppler explica a **alteração aparente da frequência de uma onda quando existe movimento relativo entre a fonte e o observador**

Para ondas **eletromagnéticas**



Onda – Efeito Doppler-Fizeau

O efeito Doppler-Fizeau explica a **alteração aparente da frequência de uma onda (eletromagnética) quando existe movimento relativo entre a fonte e o observador**

Para ondas **eletromagnéticas**



Aproximação: Azul
Alta Frequência

Afastamento: vermelho
Baixa Frequência

Onda – Efeito Doppler-Fizeau

Onda mecânica

$$f' = f_0 \left(\frac{v_f \pm v_o}{v_f} \right)$$

f': frequência aparente
f₀: frequência da fonte
v_f: velocidade do som no meio
v_o: velocidade do observador

Onda Eletromagnética

$$f' = f_0 \sqrt{\frac{c + v}{c - v}}$$

f': frequência aparente
f₀: frequência da fonte
c: velocidade da luz no meio
v_o: velocidade da fonte

Onda – Efeito Doppler-Fizeau

Onde usamos o efeito Doppler-Fizeau?

- Astronomia → Determinar se um objeto está se aproximando ou afastando do nosso planeta
- Trânsito → Medir a velocidade de um automóvel no trânsito.
- Shopping → Abrir porta ao aproximar-se

Onda – Efeito Doppler-Fizeau

Astronomia → Determinar se uma galáxia está se aproximando ou afastando do nosso planeta



Ondas – Efeito Doppler-Fizeau

Trânsito → Medir a velocidade de um automóvel no trânsito.

Ondas – Efeito Doppler-Fizeau

Trânsito → Medir a velocidade de um automóvel no trânsito.

Ondas – Efeito Doppler-Fizeau

Trânsito → Medir a velocidade de um automóvel no trânsito.

Ondas – Efeito Doppler-Fizeau

Shopping → Abrir porta ao aproximar-se

Ondas – Atividade 3: mapa 3

Atividade 3: faça um mapa mental/conceitual dos assuntos abordados neste terceiro momento.

APÊNDICE H – Material didático 4: efeito Doppler-Fizeau

Efeito Doppler Fizeau

Responda os itens abaixo conforme o desenvolvimento da aula.

O efeito doppler ocorre para todas as ondas?

O que diz a teoria do Efeito Doppler-Fizeau?

O que podemos perceber do efeito Doppler-Fizeau em uma **onda sonora**?

O que podemos perceber do efeito Doppler-Fizeau em uma **onda luminosa**?

Onde usamos o Efeito Doppler-Fizeau?

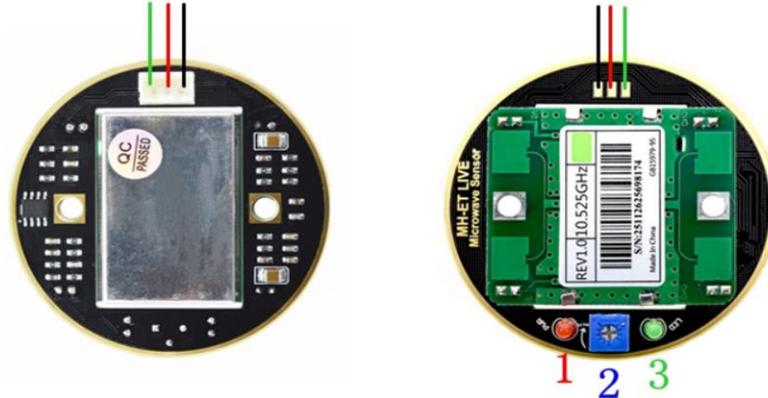
Elabore um mapa mental dos assuntos abordados no espaço abaixo indicado **Mapa 3**.

Mapa 3

APÊNDICE I – Material didático 5: programação do Arduino (gráfico de frequência)

Arduino e HB100.

O sensor HB100



➤ Como funciona o Sensor HB100?

Consiste em um **sensor de movimento de micro-ondas** que funciona através do efeito Doppler. A frequência de deslocamento Doppler é proporcional a velocidade do movimento e é determinado pela equação abaixo:

$$F_d = 2V \left(\frac{F_t}{C} \right) \cos\theta$$

Sendo,

F_d : Frequência Doppler (Aparente);

V : velocidade do alvo;

F_t : Frequência Transmitida (frequência da fonte);

C : velocidade da luz;

θ : O ângulo entre a direção de movimento do alvo e o eixo do módulo sensor.

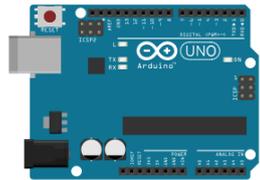
Experimento 1: análise do efeito doppler – Frequência aparente

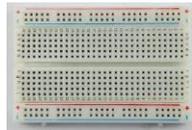
➤ O que será feito?

Será analisado as ondas de efeito Doppler que o sensor HB100 obterá com o uso do Arduino e em seguida visualizar essas ondas a partir de gráfico.

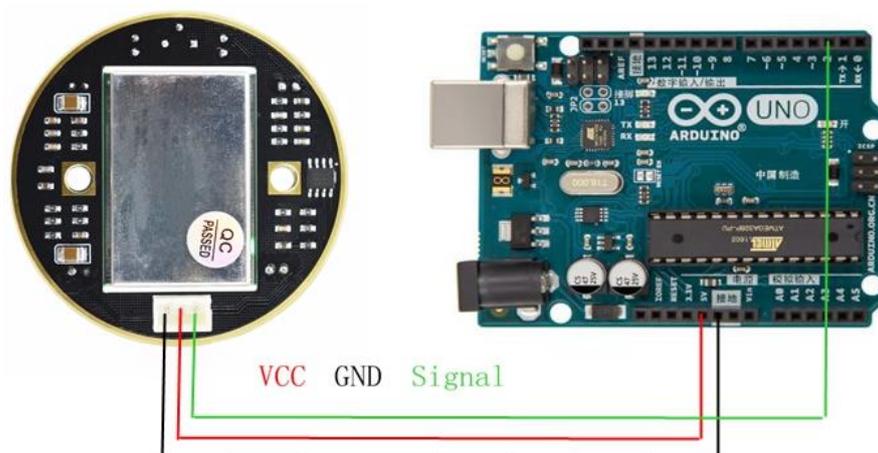
➤ O que será usado?

Os componentes usados estão dispostos na Tabela 1 abaixo:

Arduino Uno	
Jumper (conectores)	

Protoboard	
Cabo Serial USB	
Sensor HB100	

Ação 1: montagem do circuito elétrico



Ação 2: Escreva o código de programação abaixo na IDE do Arduino:

```
#include <FreqMeasure.h> // Inclui a biblioteca FreqMeasure.h
int linha = 0; // Declara e inicializa a variável "linha" com o valor 0
int LABEL = 1; // Declara e inicializa a variável "LABEL" com o valor 1
float frequency = 0.0; // Declara e inicializa a variável "frequency" como
um número de ponto flutuante (float) com o valor 0.0
float state; // Declara a variável "state" como um número de ponto flutuante
(float)
void setup()
{
  Serial.begin(57600); // Inicializa a comunicação serial com a taxa de
transmissão de 57600 bps
  FreqMeasure.begin(); // Inicializa a medição de frequência usando a
biblioteca FreqMeasure
  Serial.println("CLEARDATA"); // Envia o comando "CLEARDATA" pela porta
serial
  Serial.println("LABEL,linha,frequency"); // Envia os cabeçalhos dos dados
pela porta serial
}
```

```
}  
void loop()  
{  
float frequency = FreqMeasure.read(); // Lê a frequência medida e armazena  
na variável "frequency"  
frequency = FreqMeasure.read(); // Lê a frequência medida novamente e  
atualiza o valor da variável "frequency"  
Serial.print("DATA,TIME,"); // Envia a string "DATA,TIME," pela porta serial  
Serial.print(frequency); // Envia o valor da variável "frequency" pela porta  
serial  
Serial.println(); // Envia uma quebra de linha pela porta serial  
delay(500); // Aguarda 500 milissegundos  
}
```

Ação 3 – auxilie as equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

APÊNDICE J – Material didático 5: programação do Arduino (velocidade e Porta)

Experimento 2: medidor de velocidade

➤ O que será feito?

Será utilizado o sensor HB100 para simular um medidor de velocidade por efeito doppler.

➤ O que será usado?

Os componentes usados estão dispostos na Tabela 1 da primeira atividade.

Ação 1 - monte o circuito elétrico do **experimento 1**.

Ação 2 - Escreva o código de programação abaixo na IDE do Arduino:

```
#include <FreqMeasure.h> // Inclui a biblioteca FreqMeasure para medir
frequências
#define DOPPLER_SHIFT_CONSTANT 19.49 // Define a constante de desvio
doppler como 19.49
#define MINIMUM_SPEED 0.3 // Define a velocidade mínima como 0.3
void setup()
{
  Serial.begin(57600); // Inicializa a comunicação serial com a taxa de
transmissão de 57600 bps
  FreqMeasure.begin(); // Inicia a medição de frequência
}
double freq_sum = 0; //Inicializa a soma das frequências como 0
int freq_count = 0; //Inicializa a contagem de frequências como 0
unsigned long time_since_reading = 0; // Inicializa o tempo desde a leitura
como 0
float max_speed = 0.0; //Inicializa a velocidade máxima como 0.0
void loop()
{
  if (FreqMeasure.available()){ //Verifica se há uma leitura disponível
freq_sum = freq_sum + FreqMeasure.read(); // Soma a leitura atual à soma
das frequências
freq_count++; // Incrementa a contagem de frequências
unsigned long currentMillis = millis(); // Obtém o tempo atual em
milissegundos
if (freq_count > 10) { // Verifica se a contagem de frequências é maior
que 10
float frequency = FreqMeasure.countToFrequency(freq_sum / freq_count); //
Calcula a frequência média
float speed = frequency/DOPPLER_SHIFT_CONSTANT; // Calcula a velocidade
usando o desvio doppler
if (speed > MINIMUM_SPEED) { // Verifica se a velocidade é maior que a
velocidade mínima
if (speed > max_speed) { // Verifica se a velocidade atual é maior que a
velocidade máxima registrada
max_speed = speed; // Atualiza a velocidade máxima
}
Serial.print(speed); // Imprime a velocidade atual
Serial.print(" ");
Serial.print(max_speed); // Imprime a velocidade máxima registrada
Serial.print(" km/h"); // Imprime a unidade de velocidade
time_since_reading = currentMillis; // Atualiza o tempo desde a leitura
Serial.println(); // Imprime uma nova linha
}
freq_sum = 0; // Reinicia a soma das frequências
freq_count = 0; // Reinicia a contagem de frequências
```

```

}
}
}

```

Ação 3 - auxilie as equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

Experimento 3: porta automática

➤ O que será feito?

Será utilizado o sensor HB100 para simular uma porta automática através do monitor serial no IDE usando o efeito doppler.

➤ O que será usado?

Os componentes usados estão dispostos na Tabela 1 da atividade anterior.

Ação 1 - monte o circuito elétrico do **experimento 1**.

Ação 2 - Escreva o código de programação abaixo na IDE do Arduino:

```

#include <FreqMeasure.h> // Inclui a biblioteca FreqMeasure para medir
frequências
void setup() {
  Serial.begin(57600); // Inicializa a comunicação serial com uma taxa de
transmissão de 57600 bps
  FreqMeasure.begin(); // Inicia a medição da frequência
}
void loop() {
  FreqMeasure.read(); // Lê o valor da frequência medida, mas não o utiliza
  Serial.println(FreqMeasure.read()); // Lê o valor da frequência medida e o
imprime no monitor serial
  delay(500); // Aguarda 500 milissegundos
  if(FreqMeasure.read() <4294967295){ // Verifica se o valor da frequência medida
é menor que 4294967295
    Serial.println("Ok, porta aberta"); // Imprime "Ok, porta aberta" no monitor
serial se a condição for verdadeira
    if(FreqMeasure.read() <4294967295) // Verifica novamente se o valor da
frequência medida é menor que 4294967295
      delay(2000); // Aguarda 2000 milissegundos se a condição for verdadeira
    }
  else{ // Executa se a condição na linha 11 for falsa
    if(FreqMeasure.read() >4194967295) // Verifica se o valor da frequência medida
é maior que 4194967295
      Serial.println("PORTA FECHADA"); // Imprime "PORTA FECHADA" no monitor serial
se a condição for verdadeira
      delay(2000); // Aguarda 2000 milissegundos
    }
  }
}

```

Ação 3 - auxilie as equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

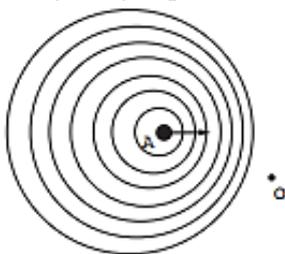
APÊNDICE K – Questionário Final

Questionário Final – Efeito Doppler-Fizeau

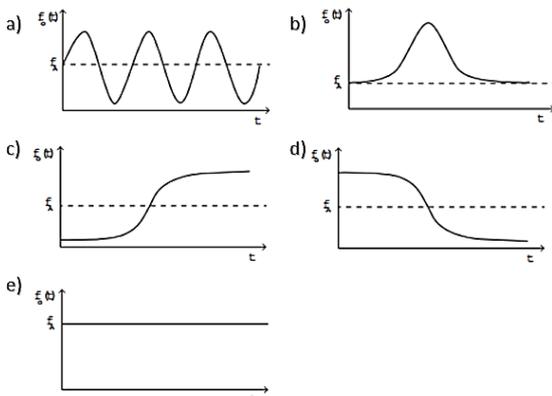
Aluno (a): _____

Turma: _____ Turno: _____

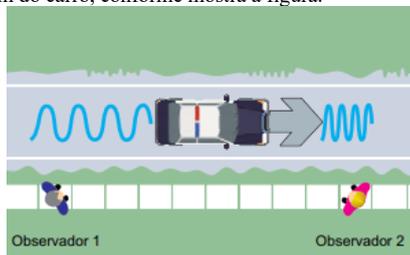
1. (ENEM 2016) Uma ambulância A em movimento retilíneo e uniforme aproxima-se de um observador O, em repouso. A sirene emite um som de frequência constante f_s . O desenho ilustra as frentes de onda do som emitido pela ambulância. O observador possui um detector que consegue registrar, no esboço de um gráfico, a frequência da onda sonora detectada em função do tempo $f_o(t)$, antes e depois da passagem da ambulância por ele.



Qual esboço gráfico representa a frequência $f_o(t)$ detectada pelo observador?



2. (UEA-Específico Exatas 2017) Um carro de polícia desloca-se no sentido indicado na figura por uma rua retilínea, com a sirene ligada. Parados na calçada, dois observadores, 1 e 2, veem a passagem do carro, conforme mostra a figura.



(<http://papofisico.tumblr.com>. Adaptado.)

É correto afirmar que o som da sirene percebido:

- pelo observador 1 é mais agudo do que o som percebido pelo observador 2.
- pelo motorista do carro e pelos observadores 1 e 2 têm mesma altura.
- pelo observador 1 é mais agudo do que o som percebido pelo motorista do carro.
- pelo observador 2 tem a mesma frequência do som percebido pelo observador 1.

e) pelo observador 2 tem frequência maior do que a do som percebido pelo motorista do carro.

3. (UEA-Específico Exatas 2016) Uma pessoa em repouso vê um automóvel vindo em sua direção quando o motorista aciona a buzina. A onda sonora que chega à pessoa tem:

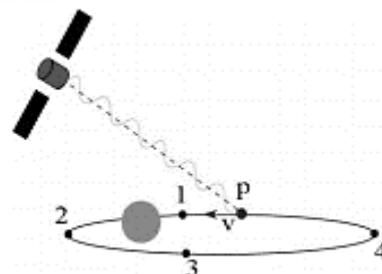
- velocidade maior que a velocidade da onda emitida pela buzina.
- frequência igual à frequência da onda emitida pela buzina.
- frequência maior que a frequência da onda emitida pela buzina.
- período maior que o período da onda emitida pela buzina.
- período igual ao período da onda emitida pela buzina.

4. (UEA-Específico Exatas 2020) Admite-se, desde a década de 20 do século passado, que o Universo está em expansão. Isso pode ser constatado com o auxílio de uma técnica chamada espectrometria óptica, na qual um aparelho, chamado de espectrômetro óptico, detecta e analisa a luz proveniente de uma fonte luminosa. Ao analisar a luz proveniente das galáxias, estejam elas em qualquer direção em relação ao equipamento, observa-se que as emissões luminosas apresentam desvios nos valores de comprimentos de onda, sempre de maneira a aumentar o valor original do comprimento de onda da luz emitida pela galáxia.

Considerando a velocidade da luz constante em todas as direções, tais observações são possíveis devido a um fenômeno, que ocorre no espaço, conhecido como

- efeito Doppler.
- espalhamento.
- refração.
- difração.
- dispersão.

5. (UnB 2º Dia 2019) A figura a seguir ilustra a situação em que um satélite recebe luz de um corpo que se move com velocidade v , em uma órbita elíptica e no sentido anti-horário, em torno de uma estrela. Os pontos de 1 até 4 indicam posições do corpo ao longo da órbita.



Nessa situação, a maior redução do comprimento de onda da luz detectada pelo satélite ocorrerá quando o corpo estiver se deslocando entre as posições:

- 1 e 2.
- 2 e 3.
- 3 e 4.
- 4 e 1.

6. (UPF Inverno 2015) Em certas observações astronômicas, os cientistas encontram situações nas quais é possível detectar o Efeito Doppler com a luz. Nessas situações, a percepção de que a cor da luz emitida por certa estrela parece ser mais avermelhada do que realmente é significa que:

- a estrela está muito distante da Terra.
- a estrela está se afastando da Terra.
- a luz sofre refração na atmosfera.
- a luz se propaga com velocidade muito grande no vácuo.
- a estrela está se aproximando da T

APÊNDICE L – Produto Educacional



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS – ICE
INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS – IFAM
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 04

JOSÉ VICTOR BEZERRA TEIXEIRA

PRODUTO EDUCACIONAL

ABORDAGEM EXPERIMENTAL DE FÍSICA MODERNA: EFEITO DOPPLER-FIZEAU
EM ONDA ELETROMAGNÉTICA

MANAUS – AM
2024

JOSÉ VICTOR BEZERRA TEIXEIRA

ABORDAGEM EXPERIMENTAL DE FÍSICA MODERNA: EFEITO DOPPLER-FIZEAU
EM ONDA ELETROMAGNÉTICA

Material instrucional vinculado à dissertação de Mestrado apresentada ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, no Polo 04, da Universidade Federal do Amazonas e do Instituto Federal do Amazonas.

Orientador: Prof. Dr. Denilson da Silva Borges.

.

Biblioteca do *Campus* Manaus Centro - IFAM

T266a Teixeira, José Victor Bezerra.

Abordagem experimental de física moderna: efeito doppler-fizeau em onda eletromagnética. / José Victor Bezerra Teixeira. – Manaus, 2024.
70 p.: il. color.

Produto educacional proveniente da dissertação - O efeito doppler de ondas eletromagnéticas a partir de sequência didática. – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Centro, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Denilson da Silva Borges. ISBN
978-65-85652-70-4

1.Física – ensino. 2. Efeito Doppler – ondas eletromagnéticas.
3.Arduino. 4. TDIC. I. Borges, Denilson da Silva. (Orient). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.

CDD 530.07

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela força e capacidade para superar todos os desafios.

Agradeço também à minha família, minha mãe Maria do Carmo Bezerra Teixeira, meu pai Raimundo Teixeira da Costa (*in memoriam*), meu irmão Arthur José Bezerra Teixeira, e em especial aos meus avós, Anice Barros Bezerra (*in memoriam*), Eduardina Teixeira da Costa e Vildo Teixeira da Costa, assim como, todos os tios, tias e primos que puderam de alguma forma contribuir para esta nobre conquista.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Denilson da Silva Borges, pela paciência e instrução na vida acadêmica, profissional inspirador que me ajudou a desbravar este e outros trabalhos ao longo do mestrado, muito obrigado mestre!

A minha querida Companheira Mariana Araujo Moraes pela paciência, amor, carinho, incentivo e a quem tenho grande admiração.

Aos meus amigos, em especial Tiago Pereira, Soetânia Oliveria, José Carlos e Diego Lima, e demais colegas do mestrado, pela ajuda, conversas e companheirismo, valeu galera, consegui!

Aos Gestores Salomão e Adriano por toda a colaboração nos ajustes de horários de trabalho para que eu pudesse conciliar com os estudos e, todos os demais colegas pela contribuição direta e indireta.

Aos meus alunos que participaram da realização deste trabalho, obrigado.

A Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

Ao Instituto Federal do Amazonas – IFAM.

Ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, pela oportunidade de conceder a realização do curso.

Aos professores do MNPEF Polo 04 que contribuíram para minha formação através de suas aulas inspiradoras.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas por financiar meu curso de mestrado.

Sumário

1. APRESENTAÇÃO	119
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	120
2.1 Breve desenvolvimento histórico do efeito Doppler-Fizeau	120
2.2 O efeito Doppler-Fizeau no Som.....	123
2.3 O efeito Doppler-Fizeau em OEM	127
3. METODOLOGIA DE ENSINO	131
3.1 Teoria de Aprendizagem Significativa (TAS) de Ausubel.....	131
4. PROPOSTA EXPERIMENTAL	135
4.1 Apresentação dos materiais: Arduino e Sensor HB100	135
4.1.1 Arduino	136
4.1.2 Sensor Doppler Radar – HB100.....	137
4.2 Descrição das Atividades	138
4.2.1 Atividade introdutória – Compreendendo o Arduino	138
4.2.2 Experimentos do Efeito Doppler-Fizeau.....	142
4.2.2.1 Experimento 1 - Visualização da Frequência detectada.....	144
4.2.2.2 Experimento 2 – Velocidade de um alvo por Efeito Doppler-Fizeau	146
4.2.2.3 Experimento 3 – Automação de uma porta por Efeito Doppler-Fizeau	149
5. SEQUÊNCIA DE ENSINO	152
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	158
7. REFERÊNCIAS.....	159
8. APÊNDICES	160
Apêndice A – Manual de Laboratório	160
Apêndice B - Questionário inicial	166
Apêndice C - Material complementar 1	168
Apêndice D – Slide aula dialogada 1	169
Apêndice E – Material complementar 2.....	170

Apêndice F – Slide aula dialogada 2	171
Apêndice G – Material complementar 3	172
Apêndice H – Slide aula dialogada 3	173
Apêndice I – Material complementar 4	175
Apêndice J – Material complementar 5 – Parte 1	178
Apêndice K – Material complementar 5 – Parte 2	180
Apêndice L – Questionário final	182

1. APRESENTAÇÃO

Este material foi produzido visando proporcionar ao leitor, professor ou estudante de física e afins, uma alternativa para a abordagem da física moderna no ensino médio dentro da temática do estudo das ondas eletromagnéticas, em específico a ocorrência do Efeito Doppler-Fizeau, uma vez que este fenômeno na maioria das vezes é abordado em caráter abstrato.

Dessa forma, ao analisar os trabalhos relacionados ao ensino do Efeito Doppler-Fizeau no ensino médio, constatou-se sua abordagem apenas para ondas mecânicas, porém, dentre as aplicações tecnológicas observadas no cotidiano, a maioria são derivadas desse fenômeno em ondas eletromagnéticas, assim, surge uma demanda, como possibilitar essa abordagem em sala de aula? Será que o estudante compreende e se interessa por esse fenômeno apenas lendo ou visualizando representações?

Diante desse cenário, enquanto docente, indaga-se: será que é possível desenvolver um experimento que comprove e torne palpável o efeito Doppler-Fizeau em ondas eletromagnéticas? Neste trabalho temos a resposta, sim, é possível, bem como factível.

Este documento é integrante de uma dissertação de mestrado desenvolvida no âmbito do programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), que tem como um dos principais objetivos a contribuição e capacitação profissional de professores da educação básica.

A seguir, serão descritos os passos para a elaboração de um experimento que possibilita tal abordagem e, em seguida, propõe-se uma sequência didática na qual é norteadada pela Teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Com isso, acredita-se na contribuição deste trabalho no ensino de física na educação básica, pois, ao buscar para o perfil do aluno uma formação integral, são necessárias práticas que contemplem uma aprendizagem efetiva, com criticidade para o mundo contemporâneo.

Este produto foi elaborado a partir das intenções reais de um docente em propor alternativas que visam a melhoria no ensino de física, e espero que este produto possa ser inspiração para a realização de novos trabalhos. Para aqueles que se dispuserem a aplicar este produto, ou partes deste, desejo sucesso na sua abordagem, e que estou à disposição para sanar dúvidas quanto aos passos descritos nesta obra.

Atenciosamente, Prof. José Victor Bezerra Teixeira.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados pressupostos teóricos para a contextualização deste trabalho, que versará sobre breve desenvolvimento histórico do efeito Doppler-Fizeau e a teoria física do efeito Doppler-Fizeau.

2.1 Breve desenvolvimento histórico do efeito Doppler-Fizeau

Esta seção discutirá a obra de Christian Andreas Doppler (1803 – 1853), publicada em 1842¹, proporcionando ao leitor o ponto de vista e algumas observações do próprio idealizador da teoria do Efeito Doppler.

Figura 1 – Capa da obra de Christian Andreas Doppler em 1842.



Fonte: DOPPLER, 1842.

Conforme descrito no trabalho pioneiro sobre o efeito Doppler-Fizeau, exposto na Figura 1, durante o ano de 1842, no dia 25 de maio, o austríaco Christian Andreas Doppler publica sua obra intitulada: “*Sobre a luz colorida das estrelas duplas e outras estrelas do céu. Tentativa de uma teoria geral que contém como parte integrante de si o Teorema da Aberração de Bradley*”, e neste trabalho o fenômeno que descreve uma alteração percebida na frequência de ondas devido o movimento relativo entre a fonte e observador foi idealizado, assim, conhecido então como efeito Doppler, em sua homenagem. Nessa obra publicada pelo autor, constam 11 seções, e dentre elas descreve-se a respeito do que pode ser percebido ao aproximar ou afastar-se de uma fonte, seja o som ou a luz, e para isso demonstra-se por meio de equações e esboços de experimentos mentais descritos no final da obra. Ressalta-se que em seu trabalho é discutido a respeito do efeito que o éter e o ar causam na percepção da tonalidade da luz e tom de uma onda sonora. Neste famoso trabalho, em sua primeira seção, Doppler menciona a primeira teoria da luz apresentada por Euler e Huygens e seus sucessores Young, Fresnel e Cauchy, etc. e destaca as dificuldades da aceitação e necessidade de fé nos resultados encontrados pelos próprios pesquisadores. Além destes, é comentado sobre Laplace e Poisson que discordam da teoria, porém admiram o desenvolvimento analítico. Ao final da seção é

¹

chamado a atenção do leitor para futuras divergências sobre a interpretação óptica da natureza, pois conforme os escritos em seu trabalho, era previsível uma disputa acirrada para a compreensão da luz e a insegurança dos resultados obtidos por estes famosos pesquisadores da época.

Em suas deduções, é possível observar que em seus experimentos mentais, Doppler afirma que se um observador se movimenta com a velocidade própria do som afastando-se de uma fonte sonora, ele jamais poderá ouvi-la e que na situação de a fonte afastar-se do observador com a velocidade do som, este ouvirá o som em uma oitava abaixo da frequência original. Na segunda seção do seu trabalho, Doppler explica a percepção dos “golpes de ondas” com mais ou menos intensidade usando um experimento mental que consiste em um navio deslocando-se em direção as ondas, e demonstra ao final que dessa forma é possível notar que para o observador (navio), as ondas possuem sua intensidade alterada dependendo do movimento contra ou a favor das ondas, porém, ao tentar visualizar esse efeito ocasionado pelas ondas de ar do éter torna-se difícil essa compreensão.

Nas seções 3 e 4, é feito o desenvolvimento da equação e discussão qualitativa proposta por doppler mostrando que na hipótese de movimento de afastamento do observador com velocidade própria da fonte torna-se impossível perceber a onda emitida e/ou em afastamento com velocidade menor que a própria ocorre a percepção com uma oitava abaixo. É interessante notar que em seu trabalho, a luz e o som são descritos como ondas e ambas se comportam de forma igual, logo, o comportamento do efeito Doppler para a luz foi previsto, porém, percebem-se apenas descrições qualitativas, conforme será exposto nas seções seguintes.

Sabemos que a velocidade da luz é dada por $c = 3.10^8 m/s$, porém, Doppler define a velocidade da luz em 67.592.448 m/s (42000 milhas/segundo). Nesse sentido, é mencionado pelo autor sobre o desvio que a luz branca ou roxa sofre ao afastar-se de um observador, até que desaparecesse. Além disso, fazem-se outras observações sobre as cores que uma fonte luminosa emite ao afastar-se, enfatizando que a luz de um corpo sofre mudança, alterando em uma sequência: violeta para azul, verde, amarelo, laranja, vermelho e até se tornar insensível para os olhos.

Na seção 6, são apresentadas conclusões pontuadas em: (1) alteração da cor de um corpo luminoso ou iluminado, e até mesmo o desaparecimento da luz de um corpo ao alcançar determinada velocidade; (2) fonte em repouso e observador em movimento, ocasionando o mesmo efeito citado anteriormente; (3) mudança na cor e intensidade da fonte devido movimento com determinado ângulo corroborado a teoria da aberração de Bradley.

Nas seções 7 e 8, discute-se sobre a velocidade dos planetas no sistema solar, que não são significativas para observar mudança de cor neles ou desaparecimento (completo ou temporário). Doppler supõe que, se a Terra possuísse velocidade dez vezes maior, seria observado a cor azul ou esverdeada das estrelas nas áreas orientais e as estrelas ocidentais com cores laranja ou vermelho. Ainda nesse sentido, é comentado sobre a possível alteração na coloração do cometa Halley. É interessante notar que o autor menciona que a velocidade de alguns corpos celestes depende de sua massa, e que poderiam até mesmo expor algumas aberrações, nesse caso, velocidade superior à da luz.

Nas seções 10 e 11, são feitas outras observações sobre as estrelas duplas fixas e outras variáveis. Por fim, Doppler destaca que Olaf Roemer havia descrito em seus trabalhos anteriores sobre a impossibilidade de que corpos celestes pudessem adquirir velocidades comparáveis à da luz, e que grandes velocidades poderiam provocar alterações nas cores emitidas por esses corpos.

Deste modo, podemos perceber que Doppler prevê um fenômeno que certamente é responsável por grandes aplicações tecnológicas civis e militares, no entanto, após a publicação desta obra, a comunidade científica da época atribuiu pouca importância às descobertas de Doppler, e somente no ano de 1845 comprova-se esse efeito experimentalmente, em que o meteorologista holandês Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot (1817-1890) demonstra o efeito acústico percebido ao colocar vários trompetistas em um vagão aberto puxado por uma locomotiva (HALLIDAY E RESNICK, 2016). Durante muito tempo, a teoria de Doppler foi rejeitada, mesmo após a comprovação experimental de Ballot, e posteriormente Ernst Mach em 1860, com um aparelho possibilitando visualizar esse efeito em laboratório e sem menção ao idealizador do fenômeno.

Após as contribuições iniciais de Doppler para a investigação deste efeito nas ondas, no ano de 1848, o físico francês Armand-Hyppolyte-Louis Fizeau (1819 – 1896), propõe que esse mesmo efeito no som seja possível ser observado em ondas luminosas e proporcionaria determinar a velocidade das estrelas em movimento na mesma linha do observador, sendo possível a aplicação em estrelas. No ano de 1900, o físico russo Aristarkh Appolonovich Belopolsky (1854-1934) desenvolve instrumentos de observação capazes de comprovar as previsões realizadas por Doppler-Fizeau. (BASSALO, [s.d.]).

A partir desses pressupostos históricos, observa-se que a teoria do efeito Doppler-Fizeau possuiu diversas contribuições de grandes pesquisadores do século XIX, e conseqüentemente vastas aplicações tecnológicas. Além destas contribuições, em 1905, Albert Einstein (1879-1955), físico alemão-suíço-norte-americano, descreve que é possível obter o

efeito Doppler-Fizeau através de sua conhecida teoria da relatividade restrita. Dessa forma, integra-se ao efeito o comportamento relativístico (Efeito Doppler-Fizeau relativístico) (BASSALO, [s.d.]). Nas seções a seguir, serão descritas a ocorrência desse efeito em ondas mecânicas e eletromagnéticas.

2.2 O efeito Doppler-Fizeau no Som

O efeito Doppler-Fizeau é um dos fenômenos que ocorre de modo geral em ondas (mecânicas ou eletromagnéticas), e consiste na percepção de mudança na frequência detectada (f_d) em relação à frequência emitida pela fonte (f_f) devido ao movimento relativo entre fonte e observador. Um exemplo clássico desse efeito ocorre quando estamos parados em relação a uma ambulância que passa pela via com a sirene acionada, exposto na Figura 2 abaixo. Constata-se de imediato que o som fica agudo (aumento de frequência) quando ocorre a aproximação, logo a frequência aparente é maior que a emitida pela fonte ($f_d > f_f$), e durante o afastamento dessa fonte sonora, percebe-se um som menos agudo (redução na frequência), nesse caso a frequência aparente torna-se menor que a frequência emitida pela fonte ($f_d < f_f$).

Figura 2 – Percepção do som em Efeito Doppler-Fizeau.



Fonte: HEWITT (2015, p. 366)

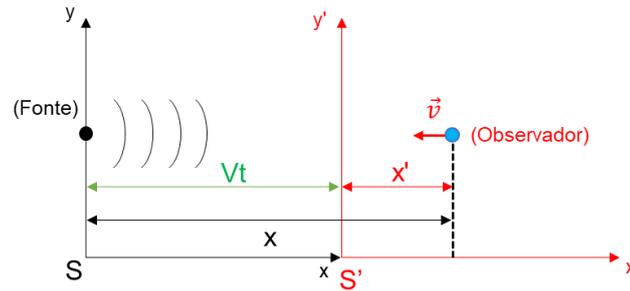
A descrição teórica desse fenômeno será deduzida a partir do som, e para isso usa-se a descrição da onda sonora em relação a equação geral da onda unidimensional (equação 1), descrita por

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

E neste caso, será considerado uma fonte emitindo uma onda sonora harmônica que pode ser descrita em termos das variáveis de deslocamento, pressão e densidade. Vale ressaltar que, cada equação de deslocamento da onda, $u(x,t)$, é correspondente a uma equação de onda de pressão, $p(x,t)$ e densidade, $\rho(x,t)$.

Inicialmente será tratado a situação de uma **fonte sonora estacionário com observador em movimento**, conforme descrito na Figura 3 abaixo

Figura 3 – Referenciais para fonte de onda sonora (S) e observador em movimento (S').



Fonte: autor (2023).

A partir da descrição dos referenciais, para o referencial S' no observador, descrevemos,

$$x' = x + Vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Onde V , é dado como a velocidade do observador aproximando-se da fonte. Considerando a fonte emitindo uma onda sonora harmônica, com equação (2) de deslocamento dada por,

$$U(x, t) = U \cos(kx - \omega t + \varphi) \quad (2)$$

Adotamos que a pressão descrita na onda é dada pela equação (3)

$$\delta P = P_{\text{máx}} \text{Sen}(kx - \omega t + \varphi) \quad (3)$$

Sendo x , descrito pelo referencial S , obtém-se

$$P(x, t) = P \cos[K(x' - Vt) - \omega t + \varphi]$$

$$P(x, t) = P \cos[Kx' - KVt - \omega t + \varphi]$$

$$P(x, t) = P \cos[Kx' - t(Ku + \omega) + \varphi]$$

Onde o termo entre parênteses é descrito como ω' , assim

$$P(x, t) = P \cos[Kx' - t\omega' + \varphi]$$

Sabendo que através da equação da velocidade de propagação, expressa na equação (4) abaixo,

$$v = \lambda f \quad (4)$$

Sendo que, para uma onda periódica tem-se

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{frequência})$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{K} \quad \text{ou} \quad K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{número de onda})$$

Substituindo estas definições na equação (4), determina-se a frequência angular em função da velocidade e número de onda, logo

$$\omega = Kv \quad (\text{referencial S})$$

$$\omega' = K(v + V) \quad (\text{referencial S'})$$

Relacionando a frequência angular ω e ω' nos referenciais S e S', dá-se

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{f'}{f_0} = \frac{Kv + KV}{Kv} = 1 + \frac{V}{v}$$

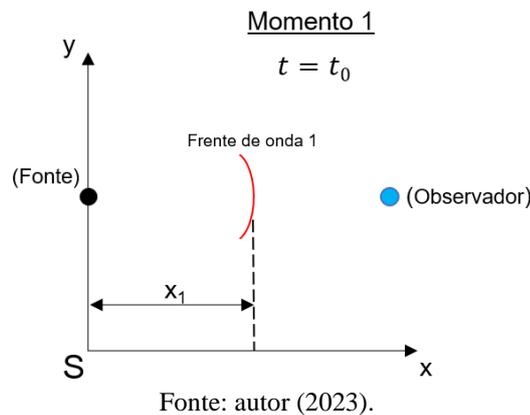
Portanto, obtemos a equação (5) da frequência aparente (f')

$$f' = f_0 \left(1 \pm \frac{V}{v}\right) \quad \text{ou} \quad f' = f_0 \left(\frac{v \pm V}{v}\right) \quad (5)$$

Note que, o sinal dos parênteses será positivo em caso de aproximação do observador na direção da fonte, logo a frequência aparente da fonte é maior que a original, e negativo em caso de afastamento do observador em relação a fonte, e conseqüentemente frequência aparente menor que a original. Sabendo que, o termo (f'), refere-se a frequência percebida pelo observador, (f_0) a frequência da onda emitida pela fonte, (v) trata-se da velocidade do som no meio de propagação e (V) a velocidade do observador em relação a fonte.

Para o caso de um **observador estacionário e uma fonte em movimento**, temos a seguinte análise da Figura 4,

Figura 4 – Referencial estático: análise da frente de onda 1 de uma fonte em relação ao observador estático.

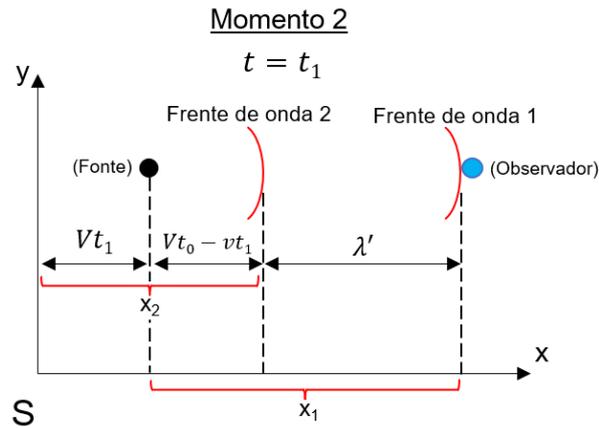


Para a distância percorrida pela primeira frente de onda emitida no tempo $t=t_0$, tem-se que,

$$x_1 = vt_0$$

Sendo (v) referente a velocidade do som no meio e (t_0) o tempo de propagação dessa onda no espaço (x_1). Enquanto, que no momento da emissão da segunda frente de onda, tem-se a fonte deslocando-se, conforme descrito na Figura 5 abaixo,

Figura 5 – Referencial estático: análise das frentes de onda 1 e 2 emitidos por fonte em movimento em relação ao observador estático e discriminação das distâncias percorridas (x_1 e x_2).



Considerando as informações destacadas na Figura 5 acima, podemos descrever o deslocamento para a segunda emissão de onda (frente de onda 2), sabendo que (V) refere-se a velocidade de deslocamento da fonte, assim,

$$x_2 = vt_0 - vt_1 + Vt_1$$

Sendo conhecido a distância das duas frentes de onda (cristas), pode-se descrever o comprimento de onda percebido pelo observador (λ'), assim,

$$\lambda' = x_1 - x_2$$

$$\lambda' = vt_0 - v(t_0 - t_1) - Vt_1$$

Portanto, o comprimento de onda aparente fica,

$$\lambda' = (v - V)t_0$$

Onde temos para o comprimento de onda da fonte descrito por

$$\lambda_0 = \frac{v}{f} = vT = vt_0$$

Assim, relacionando λ_0 e λ' , obtemos

$$\frac{\lambda'}{\lambda_0} = \frac{(v - V)t_0}{vt_0} = \frac{v - V}{v}$$

Ou,

$$\frac{\lambda'}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{V}{v}\right) = \lambda_0 \left(1 - \frac{V}{v}\right) \quad (6)$$

Sendo, a frequência da fonte (f_0) e a frequência aparente (f'), possibilita-se descrever o comportamento da frequência detectada relacionando com a Equação (6) acima,

$$\frac{\lambda'}{\lambda_0} = \frac{f'}{f_0} = \frac{1}{\left(1 - \frac{V}{v}\right)}$$

Logo, a frequência aparente para o observador estacionário com fonte em movimento, é dado pela equação (7) abaixo,

$$f' = \frac{f_0}{\left(1 \pm \frac{v}{v}\right)} \quad (7)$$

O sinal negativo refere-se ao caso estudado como exemplo, portanto, usa-se para o caso de fonte aproximando do observador estático, assim tem-se uma frequência maior que a real, e em caso contrário, durante o afastamento, aplica-se o sinal positivo, logo a frequência tenderá a ser menor que a original.

Para a situação de **fonte e observador em movimento**, pode ser descrito comparando-se os termos que multiplicam nas equações (6) e (7), logo, temos que,

$$f' = f_0 \left(\frac{1 + \frac{u}{v}}{1 - \frac{v}{v}} \right) \quad (8)$$

$$f' = f_0 \left(\frac{1 - \frac{u}{v}}{1 + \frac{v}{v}} \right) \quad (9)$$

Sendo na equação (27), a descrição da frequência percebida pelo observador devido o encontro (aproximação mútua) entre fonte e observador, enquanto que, na equação (28), corresponde ao movimento de afastamento mútuo entre fonte e observador. Dessa forma, com a descrição explícita do efeito Doppler para uma onda mecânica, na seção seguinte, aborda-se este fenômeno para o âmbito de ondas eletromagnéticas.

2.3 O efeito Doppler-Fizeau em OEM

Nesta seção, discute-se o efeito Doppler-Fizeau para uma onda eletromagnética, e para isso será incorporado termos da relatividade restrita e por fim a dedução desse efeito para uma fonte que emite frentes de onda eletromagnética.

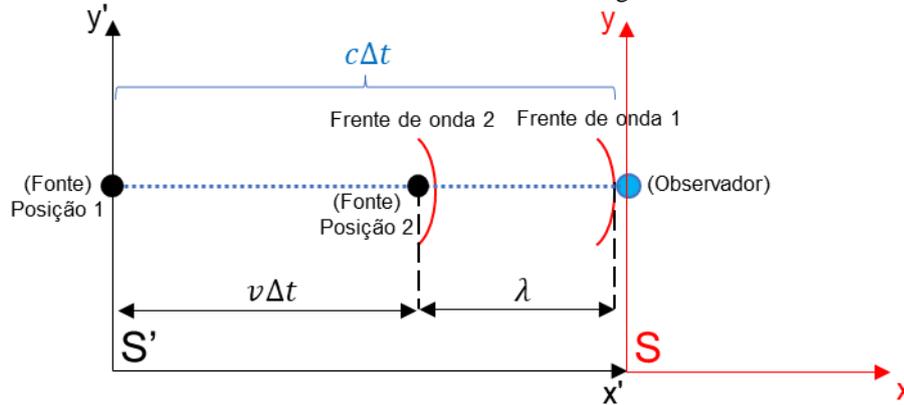
A necessidade da descrição relativística em relação ao efeito Doppler-Fizeau para OEM, deve-se ao fato de que na mecânica newtoniana é considerado um referencial inercial privilegiado e o tempo é absoluto. Além disso, a relatividade (transformação) de Galileu ao tratar da adição de velocidades em referenciais inerciais distintos, torna-se incompatível com a descrição das equações de Maxwell, pois a velocidade da luz é constante para qualquer direção e sentido de propagação (MACHADO, 2002).

Ao introduzir a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), desenvolvida por Einstein em 1905, tem-se dois postulados que em linhas gerais descrevem as leis da física permanecendo iguais para quaisquer referenciais inerciais e a velocidade da luz constante com velocidade definida (c) (PIRES, 2011).

A partir disso, os efeitos estendem-se para o estudo das ondas eletromagnéticas, uma vez que possuem velocidade (c), conseqüentemente implicando no efeito Doppler-Fizeau, resultando em alterações no tempo de detecção com os incrementos do fator de dilatação temporal (transformação de Lorentz), comprimento de onda e frequência aparente.

Na Figura 6 abaixo demonstra-se a situação utilizada para explicitar a dedução matemática que descreve tal fenômeno ondulatório.

Figura 6 – O movimento de uma fonte emissora de onda eletromagnética com observador em repouso.



Fonte: autor (2023).

Nota-se que a distância percorrida pela fonte está descrita como $v\Delta t$, onde $c\Delta t$ representa a distância percorrida pela frente de onda 1, com c sendo a velocidade de propagação da luz emitida, e o comprimento de onda λ descrevendo a distância entre duas cristas. A fonte assume duas posições, em que a posição 1, caracteriza-se como o momento de emissão da frente de onda 1, enquanto que a posição 2 refere-se ao momento em que a frente de onda 2 é emitida. Portanto, a frente de onda 2 foi emitida quando a fonte e a frente de onda 1 assumiram as posições descritas na Figura 6 acima.

Dessa forma, a frequência detectada pelo observador, é dada por

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Das descrições do problema na figura anterior, temos

$$\begin{aligned} c\Delta t &= v\Delta t + \lambda \\ \lambda &= \Delta t(c - v) \end{aligned} \quad (10)$$

Sabendo que,

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Substituindo em (10),

$$\frac{c}{f} = \Delta t(c - v)$$

$$f = \frac{c}{\Delta t(c-v)} \quad (11)$$

De acordo com a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), os tempos nos referenciais são diferentes, logo,

$$t_0 = \textit{tempo próprio}$$

$$t = \textit{tempo para o observador}$$

Sendo, o tempo próprio referente ao referencial S' da fonte, na qual as ondas são emitidas em intervalos de tempo iguais, porém para o observador há divergência no tempo de detecção, assim, de acordo com a TRR, o intervalo de tempo para o observador é descrito pela relação

$$\Delta t = \gamma t_0 \quad (12)$$

Onde o termo γ , fator relativístico, é dado por,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Sendo que, relacionando o tempo próprio com o período, temos

$$t_0 = T_0 = \frac{1}{f_0}$$

Que descreve o período de oscilação da onda, dado pelo inverso da frequência própria.

Assim, substituindo na equação (12), fica,

$$\Delta t = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{T_0}{\sqrt{\frac{c^2 - v^2}{c^2}}} = \frac{T_0}{\frac{1}{c}\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{T_0 c}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{c}{f_0 \sqrt{c^2 - v^2}} \quad (12.1)$$

Substituindo em (11),

$$f = \frac{c}{f_0 \sqrt{c^2 - v^2}} = f_0 [(c + v)(c - v)]^{1/2} (c - v)^{-1} = f_0 (c + v)^{1/2} (c - v)^{-1/2}$$

Assim,

$$f = f_0 \sqrt{\frac{c + v}{c - v}} = f_0 \sqrt{\frac{c \left(1 + \frac{v}{c}\right)}{c \left(1 - \frac{v}{c}\right)}}$$

Onde,

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Obtém-se,

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad (13)$$

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} \quad (13.1)$$

A equação (13) acima, descreve o movimento de aproximação da fonte em relação ao observador estático, e analogamente, invertendo os sinais devido o sentido da velocidade para o caso de afastamento, temos a equação (13.1).

3. METODOLOGIA DE ENSINO

O ramo docente engloba muito além do momento em sala de aula, previamente, deve-se associar teorias e métodos aos objetivos que se pretende alcançar. Para isso, o conhecimento das teorias de aprendizagem torna-se importante nessa construção, tendo em vista que vários teóricos buscam desde um longo período melhorias e alternativas para potencializar o processo de ensino aprendizagem, possibilitando que as metodologias behavioristas (tradicionais) fiquem ultrapassados. Nesse sentido, a teoria de ensino aprendizagem norteadora desta sequência didática, se baseia na perspectiva da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), associada a metodologias ativas por meio das Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC), que serão discutidas a seguir.

3.1 Teoria de Aprendizagem Significativa (TAS) de Ausubel

A Teoria da Aprendizagem Significativa foi preconizada pelo norte-americano David Ausubel (1978), psicólogo e médico. Para MOREIRA (1995), A TAS de Ausubel descreve-se a partir do foco na aprendizagem cognitiva, na qual há um armazenamento organizado das informações, formando uma hierarquia de conceitos, sendo este conhecido como a estrutura cognitiva. Além disso, enfatiza-se nesta teoria o papel do professor em reconhecer aquilo que o aluno já sabe, fator esse primordial para ocorrer a aprendizagem, e a partir desse saber pré-existente, realizam-se associações com novos componentes do novo material apresentado proporcionando modificações (MOREIRA, 1999). Nessa perspectiva, nos próximos parágrafos serão discutidos os aspectos que contemplam a TAS de Ausubel.

Um dos pontos importantes descritos nesta teoria, diz respeito a atribuição dada por Ausubel sobre o conhecimento prévio do aluno especificamente relevante para uma nova aprendizagem, descrito como **subsunçor**, ou seja, para exercer a TAS deve-se considerar o subsunçor e relacioná-lo com o novo conhecimento, que após a interação, proporciona-se uma modificação ou extensão do subsunçor, processo esse nomeado de **ancoragem**. É interessante destacar que, esses subsunçores são relacionados hierarquicamente e dinâmicos, compondo a estrutura cognitiva, assim, pode haver deslocamentos entre a hierarquia dos subsunçores, devido à composição de um novo saber mais ou menos abrangente, ocorrendo uma incorporação, nomeada em sua teoria como **aprendizagem superordenada**.

Na ausência destes subsunçores, descreve-se que ocorra o uso da aprendizagem mecânica, prática descrita por Ausubel como aprendizagem arbitrária com pouco ou sem nexo a estrutura cognitiva existente, como forma de introduzir um conhecimento sem subsunçor, em tal ponto que se possa estabelecer essa estrutura prévia, mesmo que limitada, possibilitando estender para novas áreas posteriormente apresentadas. Para facilitar a inserção desses

subsunçores, Ausubel aponta para o uso de **organizadores prévios**, definidos como uma estratégia que emprega materiais introdutórios para estabelecer conexão entre o conhecimento prévio e o que se deve saber para formar os subsunçores e possibilitar a aprendizagem do conhecimento desejado.

Dessa forma, para ocorrer a AS, deve-se considerar dois fatores: o material de aprendizagem **potencialmente significativo** e **predisposição para aprender**.

Ao mencionar o material como potencialmente significativo, afirma-se que o material a ser usado apresenta ao aprendiz significado lógico (não-arbitrário e não-literal), relacionando especificamente com a estrutura cognitiva apropriada, além de um subsunçor adequado para estabelecer essa relação.

Quanto ao material potencialmente significativo, MOREIRA (2007, pág. 8) destaca que **“É importante enfatizar aqui que o material só pode ser *potencialmente significativo*, não *significativo*: não existe livro significativo, nem aula significativa, nem problema significativo, ..., pois o significado está nas pessoas, não nos materiais”**.

Portanto, esta primeira condição estabelece que o material a ser utilizado deve ser potencialmente significativo, e o aprendiz é quem irá dar significado para o novo conhecimento apresentado, podendo ser atribuído de forma rápida ou lenta, dependendo das condições do aprendiz.

O segundo aspecto condicional para uma AS, a predisposição para aprender, está vinculada exclusivamente ao estudante, pois é necessário existir a vontade de relacionar o novo conhecimento de forma não-arbitrária e não-literal a estrutura cognitiva pré-existente, sendo assim, não se trata de memorização, e sim modificações, incorporando nos subsunçores os novos saberes adquiridos, permitindo assim novas perspectivas enriquecedoras. Contudo, essa condição é tão importante quanto a primeira, pois sem ela, de nada adianta existir o material potencialmente significativo e vice-versa.

Ao contemplar essas condições, como analisar se houve AS? Para isso, não se deve apenas observar se o aprendiz consegue recitar aqueles conceitos mais importantes do conhecimento discutido, mas propor situações que estejam fora do contexto usado na apresentação do novo conhecimento, evitando uma aprendizagem significativa simulada.

Dessa forma, analisam-se três possibilidades de aprendizagem significativa: representacional, de conceitos e proposicional. A **aprendizagem representacional** define-se como aquela que está vinculada a símbolos e seus significados referentes (específicos), e trata-se de uma aprendizagem que está subordinada aos demais tipos de aprendizagem por ser a mais básica. De outro modo, a **aprendizagem de conceitos** inclui a aprendizagem representacional,

pois necessita ir além daquilo a que a própria palavra se refere, ou seja, o aprendiz trata de forma genérica tal símbolo, aplicando a outros conceitos relacionados. Por fim, a **aprendizagem proposicional**, como o próprio nome descreve, caracteriza-se na formação de proposições constituídas pelas palavras juntas descrevendo ideias, contradizendo a aprendizagem representacional. Enfatiza-se nesta última forma de aprendizagem que esta possui o pré-requisito de atingir previamente as aprendizagens anteriores, não tratando como uma soma, mas, por serem de fato, requisitos para desenvolver as ideias com proposições.

Ausubel, sobre a assimilação, descreve que esta ocorre no momento das crianças na escola e na fase adulta, pois esta é amplamente desenvolvida por relações como a ampliação do vocabulário e demais contato com objetos, favorecendo a assimilação de conceitos. Assim, com a formação de ideias estabelecidas na estrutura cognitiva, relaciona-se de forma substantiva e não-arbitrária com o novo conhecimento ou material potencialmente significativo. Como descreve MOREIRA (1999), sistematicamente sobre a assimilação, ao receber uma nova informação **a** (potencialmente significativa) relacionada por um subsunçor **A**, ocorre dessa interação uma modificação, resultando em um produto interacional (novo subsunçor **A'a'**). Naturalmente, se houve de fato a retenção, compreensão de **a'** e **A'** enriquecidos pela interação entre eles, com o avanço temporal, ocorrerá o esquecimento de parte da informação modificada pela apresentação de **a**, mas que, de fato, o subsunçor estabelecido dessa interação (**a'+ A' = A'a'**) será apenas **A'**, que constitui agora um novo subsunçor. Enfatiza-se que **A'** não pode ser tratado como o mesmo **A'** da primeira exposição, pois este é constituído de resíduos da interação com **a'**, processo esse chamado de **assimilação obliteradora**, pois **A'** é o resultado retido pela obliteração de **a'**.

A partir dos aspectos descritos a respeito da aprendizagem na TAS ausubeliana, mencionou-se até o momento apenas a aprendizagem **superordenada**, que compõe apenas um dos três tipos de aprendizagem desta teoria, sendo elas: **subordinada** e **combinatória**. A aprendizagem subordinada é caracterizada quando o novo conhecimento é apresentado ao aprendiz e ocorre a subordinação deste conhecimento com os subsunçores pré-existentes. Por outro lado, a aprendizagem combinatória, como sugere a palavra, consiste em uma combinação de conhecimentos novos com os existentes na estrutura cognitiva, de modo que, não será um conhecimento que subordina ou superordena o anterior, ou seja, haverá uma interação do subsunçor com o novo conhecimento por possuírem pontos em comum sem que ocorra uma mudança na posição da hierarquia conceitual.

A partir dos tipos de aprendizagens apresentadas, enfatizam-se dois processos que ocorrem durante a aprendizagem, sendo eles denominados como **diferenciação progressiva e reconciliação integrativa (integradora)**.

O processo de diferenciação progressiva pode ser descrito a partir da progressão em um conceito geral e, ao serem apresentadas especificidades daquele conceito, ocorrem diferenciações do subsunçor. Portanto, é um processo que ocorre na aprendizagem por subordinação apresentado anteriormente. Enquanto isso, o processo de reconciliação integradora, comum na aprendizagem superordenada, supracitada, remete-se a relação que o aprendiz faz entre as ideias de modo a realizar combinações, possibilitando superar possíveis lacunas entre os conceitos, de forma integrativa.

Portanto, concluem-se condições básicas para ser possível ocorrer a aprendizagem significativa, devendo-se assim dispor de material relacionável aos subsunçores e o aprendiz precisa estar disposto para estabelecer as assimilações ao objeto de estudo de forma substantiva e não-arbitrária, logo não ocorrerá apenas por memorização literal.

Com a integração da TAS de David Ausubel ao presente trabalho, o uso de metodologias ativas se faz importante diante do contexto do processo educacional no Brasil, tendenciando para uma aprendizagem com formação voltada para um perfil integral.

Entende-se por metodologia ativa, um processo de construção em que o estudante possui postura ativa em relação ao seu aprendizado, utilizando-se de experiências que envolvam um contexto prático, instigando a busca por soluções que estejam relacionadas à realidade (ação-reflexão-ação) (FREIRE, 2006). Dessa forma, o discente é colocado no centro do processo de ensino-aprendizagem.

Para a abordagem das metodologias ativas, Anastasiou e Alves (2007) elencam formas que despertam práticas ativas, substituindo formas de ensino tradicional que possibilitam ganhos no processo ensino-aprendizagem: aula expositiva dialogada; estudo de texto; portfólio; tempestade cerebral; mapa conceitual; estudo dirigido; lista de discussão por meios informatizados; Phillips 66; grupo de verbalização e de observação (gv/go); dramatização; seminário; estudo de caso; júri simulado; simpósio; painel; fórum; oficina (laboratório ou workshop); estudo do meio; ensino com pesquisa. Dentre essas ferramentas, usaram-se para a realização deste trabalho aulas expositivas, estudo de caso e experimentação.

4. PROPOSTA EXPERIMENTAL

Nesta seção, serão apresentados os experimentos que abordam o efeito Doppler-Fizeau em ondas eletromagnéticas, possibilitando ao estudante visualizar a ocorrência desse fenômeno, e ao introduzir esta prática, intrinsecamente discute-se a física moderna. Dessa forma, apresentam-se os materiais utilizados (Arduino e sensor HB100) para a confecção do experimento e suas variações experimentais através dos códigos de programação que possibilitam avaliar gráficos, velocidade de um alvo e automação de sistemas. Nesse sentido, para a realização das atividades, será inicialmente discutido sobre o sensor empregado no experimento e seu funcionamento com o uso de Arduino.

Conforme supracitado, a primeira atividade proposta consiste na visualização do sinal da frequência detectada pelo sensor Doppler Radar (HB100), em que é observado através do software Excel, possibilitando investigar as oscilações das frequências ao aproximar ou afastar determinado alvo. Nessa primeira abordagem, o estudante pode comprovar que as ondas eletromagnéticas podem sofrer o efeito Doppler-Fizeau.

A segunda atividade experimental funciona a partir de uma nova programação do Arduino com o HB100, que atribui uma interpretação ao sinal da frequência aparente detectada, sendo apresentada em velocidade, através da equação na biblioteca do fabricante do sensor.

Por fim, na última atividade experimental, ao inserir outro código de programação, pode-se atribuir fatores condicionantes para os sinais das frequências detectadas, sendo assim, surgem inúmeras aplicações de automação, e neste trabalho simula-se através do monitor serial o acionamento de uma porta, tal como em um shopping, por exemplo. Dessa forma, aqui tem-se uma atividade que expõe o estudante ao desenvolvimento de atividades práticas que relacionam a teoria física com o desenvolvimento de tecnologias do cotidiano.

Dessa forma, com esse experimento, surgem abordagens de uma teoria amplamente difundida desde sua descoberta até os dias atuais, permitindo que o estudo do efeito Doppler-Fizeau no ensino médio exceda à sala de aula, relacionando a teoria e a prática.

4.1 Apresentação dos materiais: Arduino e Sensor HB100

Esta seção é destinada a familiarizar o leitor que não possui contato com a plataforma Arduino, em que se aborda de forma breve os aspectos introdutórios da prototipagem com esta ferramenta, ressaltando que existem inúmeras possibilidades. As informações contidas neste material foram retiradas do site oficial do Arduino².

² Site oficial do Arduino: <https://www.arduino.cc/>

4.1.1 Arduino

O Arduino surgiu a partir de um projeto desenvolvido no Ivrea Interaction Design Institute, Itália, no ano de 2005, em que possui um hardware (estrutura física) e software (estrutura digital) livre, ambos em código aberto, ou seja, o usuário pode realizar alterações de acordo com sua necessidade.

- O que é o Arduino?

O Arduino consiste em uma placa com processador microcontrolador (Atmel), com entradas e saídas digitais e analógicas, possibilitando a ligação com sensores e cada sensor possui uma função específica. Existem diversos modelos de Arduino, e seu tipo deve ser correspondente ao que se deseja fazer, uma vez que cada Arduino possui diferentes formatos e configurações de hardware. Para este trabalho, o Arduino Uno, Figura 7 abaixo, é adequado para a atividade.

Figura 7 – Arduino Uno.



Fonte: Arduino.CC, 2024.

- Como nos comunicamos com o Arduino?

A princípio, o hardware dispõe de conexão mediante cabo USB (também chamado de Cabo Serial USB) e para que o conjunto (placa e sensores) funcione, usa-se o software IDE (Ambiente Integrado de Desenvolvimento) que é nativo do Arduino e disponibilizado no site oficial, exposto na Figura 8, em que ao abrir o software, visualiza-se um terminal, exposto na Figura 9, para a escrita da **Linguagem de Programação para construir os códigos de programação** e possibilitar a comunicação do Arduino com os sensores conectados.

Figura 8 – Ícone do IDE (Ambiente Integrado de Desenvolvimento)



Fonte: autor (2023).

Figura 9 – IDE do Arduino pronta para construção dos códigos de programação.



Fonte: autor (2023).

Para mais detalhes sobre o uso básico do Arduino, bem como a instalação dos programas necessários, recomenda-se visitar o site oficial, na aba guia³.

- O que é código de programação?

Para que o Arduino controle os sensores, é necessário enviar esse comando ao Arduino, caso contrário nada acontecerá. Dessa forma, você precisa construir o código de programação, e neste trabalho usamos a linguagem de programação C++, nativa do IDE do Arduino, que irá comunicar-se com a placa e este controlará os sensores que você conectou. Um dos diferenciais do uso de Arduino está em não exigir que o usuário seja um programador, pois há muito material disponível na internet que auxilia na escrita e sintaxe da programação, com isso, torna-se acessível e empolgante sua aplicação.

Ressalta-se que **cada sensor possui funções de programação próprias** (bibliotecas), que estão disponíveis no IDE ou sites de desenvolvedores (Arduino.CC, GitHub e blogs).

4.1.2 Sensor Doppler Radar – HB100

O sensor utilizado nesse experimento é o HB100, que é um transmissor de ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas, com frequência de 10 GHz, e o dispositivo possui dois pares de antenas emissoras (TX) e receptoras (RX) utilizando a reflexão dessas ondas para verificar a possível distorção na frequência devido aproximação ou afastamento, conforme demonstrado na Figura 10 abaixo.

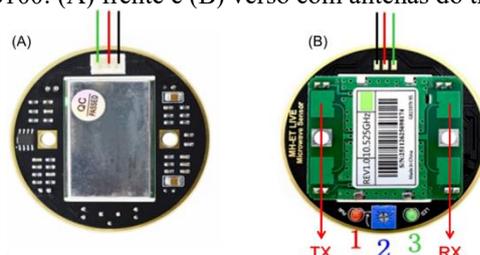
Figura 10 – Dispositivo experimental com suporte de isopor.



Fonte: autor (2023).

Na Figura 11 a seguir, pode-se observar a estrutura básica desse sensor.

Figura 11 – Sensor HB100: (A) frente e (B) verso com antenas do transmissor em destaque.



Fonte: adaptada de <https://pt.aliexpress.com/i/4001042561233.html>.

³ Baixando e instalando o Arduino IDE, disponível em: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/getting-started/ide-v2-downloading-and-installing/#windows>

Na Figura 11 (A), é possível observar os pinos de conexão, sendo saídas de sinal digital (fio verde), VCC ou positivo de 5 volts (fio vermelho) e GND ou negativo (fio preto), enquanto que na Figura 11 (B) destacam-se os indicadores 1, 2 e 3 que representam o estado ligado do sensor, ajuste de distância e detecção de alvo, respectivamente.

A aquisição deste módulo sensor pode ser realizada em sites na internet, como: Mercado Livre, *AliExpress*, *Shopee* e entre outros. Ressalta-se que no período de aquisição deste dispositivo, no ano de 2023, foi investido um valor de 50 reais no site *AliExpress*.

De acordo com o fabricante, em seu manual⁴, para o funcionamento ideal deste sensor, é necessário um circuito elétrico que contemple um amplificador de sinal para o transmissor, porém, como este trabalho possui fim qualitativo do fenômeno, não foi necessária sua aquisição, portanto, os valores de frequência detectada pelo sensor não são ideais para determinar a frequência, logo, implica em divergência do real valor da velocidade de um alvo, mas, destaca-se o nível de detecção do HB100 que é incrivelmente sensível para qualquer movimento.

Além disso, é destacado no manual que a frequência de deslocamento Doppler é proporcional à velocidade do movimento e é determinada pela equação abaixo:

$$F_d = 2V \left(\frac{F_t}{C} \right) \cos\theta$$

Sendo,

F_d : Frequência Doppler;

V : velocidade do alvo;

F_t : Frequência Transmitida;

C : velocidade da luz;

θ : O ângulo entre a direção de movimento do alvo e o eixo do módulo.

Dessa forma, com estes materiais, pode-se realizar as aplicações que possibilitam investigar o aspecto físico do Efeito Doppler-Fizeau de forma prática.

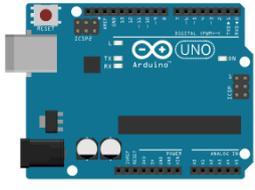
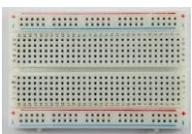
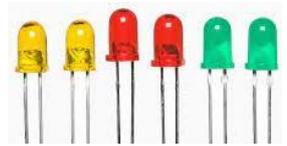
4.2 Descrição das Atividades

4.2.1 Atividade introdutória – Compreendendo o Arduino

A princípio, faz-se necessário propor uma atividade de apresentação do Arduino para a turma, e nesse caso, propõe-se realizar a comunicação do Arduino com um componente básico, o Diodo Emissor de Luz (LED). Dessa forma, serão necessários para esta atividade os materiais listados na tabela abaixo:

⁴ Acesso ao manual do Sensor HB100: https://www.mantech.co.za/Datasheets/Products/MSAN-001_AGILSENSE.pdf

Tabela 1 – Materiais para realização dos experimentos

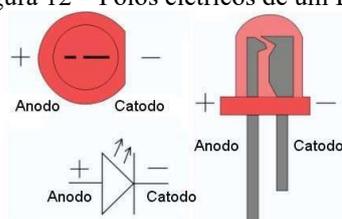
Arduino Uno	
7 Jumper (conectores tipo macho-macho)	
Protoboard	
Cabo Serial USB	
LEDs	

Fonte: autor (2023).

A partir da disposição destes componentes, pode-se realizar uma atividade que permitirá aos estudantes o contato com o microcontrolador, possibilitando a compreensão do uso do Arduino. Essa atividade consiste em acionar LEDs, onde se deve propor, ao final, desafiar os participantes a construírem um código de programação que simule um semáforo.

Nesta atividade experimental, busca-se inserir os alunos no contexto da prototipagem com Arduino através da programação para acionar um LED. A princípio, é necessário explicar sobre os polos que os LEDs possuem para serem conectados de forma correta com as saídas de energia da placa, evitando danificar as lâmpadas, conforme exposto na Figura 12.

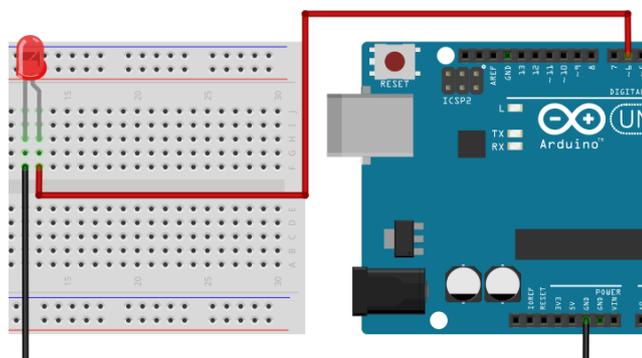
Figura 12 – Polos elétricos de um LED.



Fonte: www.tecnosolution.blogspot.com.

A partir disso, pode-se direcionar para a montagem do circuito elétrico demonstrado na Figura 13.

Figura 13 – Circuito elétrico Arduino com LED.



Fonte: Fritzing.org.

Veja que a polaridade negativa (catodo) é conectada no GND da placa e a polaridade positiva (anodo) na porta digital. Após a montagem do circuito acima, deve-se escrever o código da Tabela 2 abaixo no IDE do Arduino.

Tabela 2 – Código de programação para controlar um LED.

```
void setup ()
{
  pinMode (6, OUTPUT);
}
void loop ()
{
  digitalWrite (6, HIGH);
  delay (1000);
  digitalWrite (6, LOW);
  delay (1000);
}
```

Fonte: autor (2023).

Existem duas estruturas básicas na programação do Arduino: *void setup* e *void loop*. A função “*void setup*” é usada para inicializar a comunicação do Arduino com os pinos de entrada e/ou saída, além de outras funções de comunicação. Enquanto o “*void loop*” é executado logo após e de forma contínua, de cima para baixo.

Note que, podemos comparar o Arduino como se fosse uma pessoa lendo instruções para realizar uma atividade, no *void setup* é entendido o que existe disponível, e no *void loop*, a ordem com que as coisas devem ser feitas repetidas vezes.

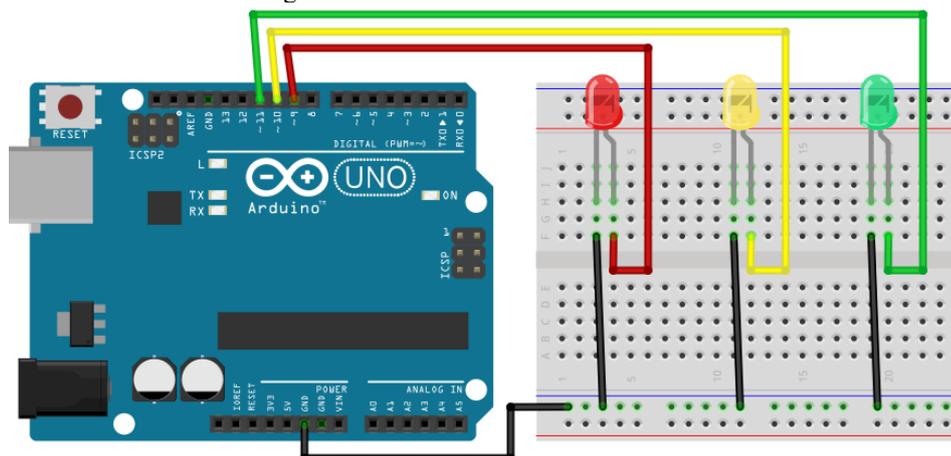
A função “**pinMode(6, OUTPUT)**” configura um pino de saída (*output*) ou entrada (*input*), nesse caso temos que o pino digital 6 do Arduino é uma saída, ou seja, acionar o LED conectado nesta porta.

Na estrutura do *void loop*, a função **digitalWrite** configura o estado da saída do pino, ligado (*HIGH*) ou desligado (*LOW*), por exemplo. Dessa forma, indica-se qual porta receberá

o sinal configurado, e por fim, a função *delay* consiste em um atraso na execução da leitura do código, significa uma pausa descrita em milissegundos.

Após esta atividade, é interessante desafiar os estudantes a usarem estas funções e componentes para criar um semáforo. O circuito elétrico pode ser estabelecido conforme exposto na Figura 14.

Figura 14 – Circuito elétrico do semáforo.



Fonte: FRITZING.ORG.

Nesse momento busca-se despertar o interesse nos participantes, criando um ambiente de criatividade. O código da Tabela 3 abaixo demonstra como resolver este desafio.

Tabela 3 – Código de programação do Desafio do Semáforo.

```
void setup ()
{
  pinMode (9, OUTPUT);
  pinMode (10, OUTPUT);
  pinMode (11, OUTPUT);
}
void loop()
{
  digitalWrite (9, HIGH);
  delay (2000);
  digitalWrite (9, LOW);
  digitalWrite (10, HIGH);
  delay (2000);
  digitalWrite (10, LOW);
  digitalWrite (11, HIGH);
  delay (2000);
  digitalWrite (11, LOW);
}
```

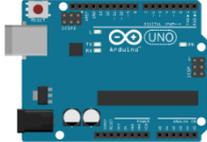
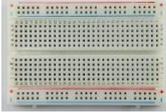
Fonte: autor (2023).

Superada esta atividade introdutória, espera-se que os participantes tenham compreendido o funcionamento básico do Arduino, possibilitando o início dos experimentos.

4.2.2 Experimentos do Efeito Doppler-Fizeau

Para as práticas experimentais com Arduino e Sensor HB100 serão necessários os itens listados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Itens necessários para a prática experimental do Efeito Doppler-Fizeau.

Arduino Uno	
Jumper (conectores)	
Protoboard	
Cabo Serial USB	
Sensor HB100	

Fonte: autor (2023).

Com esses componentes dispostos, pode ser realizado a montagem do circuito elétrico conforme as conexões indicadas na Figura 15 abaixo.

Figura 15 – Circuito elétrico Arduino-HB100.



Fonte: ALI EXPRESS, 2024.

Veja que na Figura 15 não é utilizado protoboard, ou seja, é um componente opcional, e a conexão deve ser feita com a porta digital 3 ou 8, pois os dados nesse caso não são modulados PWM (~).

O dispositivo transmissor (Arduino e HB100), serão responsáveis por detectar o efeito Doppler-Fizeau que é um dos fenômenos que ocorre de modo geral em ondas, e consiste na percepção de mudança na frequência detectada em relação à frequência emitida por uma fonte devido o movimento relativo entre fonte e observador (HALLIDAY, 2016).

Outro ponto relevante, consiste nos movimentos de aproximação da fonte em relação ao observador, e nesse caso a frequência é aumentada, fenômeno chamado de *desvio para o azul*, e movimento de afastamento da fonte em relação ao observador, e aqui a frequência percebida é inferior àquela emitida, também conhecido como *desvio para o vermelho*. Na Figura 16 podemos observar uma ilustração deste fenômeno.

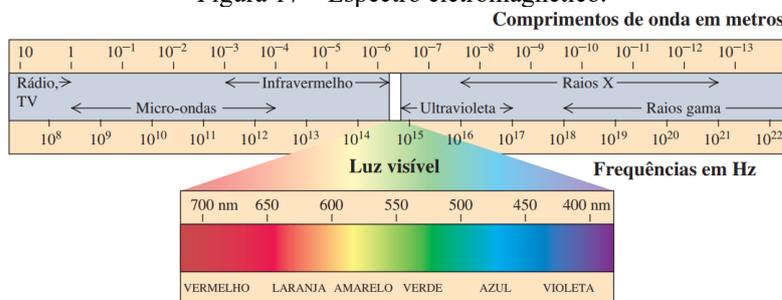
Figura 16 – Representação visual do Efeito Doppler-Fizeau em uma onda eletromagnética.



Fonte: WIKIMEDIA, 2006.

Os desvios observados se devem ao fato de que, no espectro eletromagnético, a luz visível com maior frequência, e menor comprimento de onda é o violeta, e, em contrapartida, a luz visível com menor frequência e maior comprimento de onda é o vermelho, conforme exposto na Figura 17 abaixo.

Figura 17 – Espectro eletromagnético.



Fonte: YOUNG; FREEDMAN. (2016, p. 414).

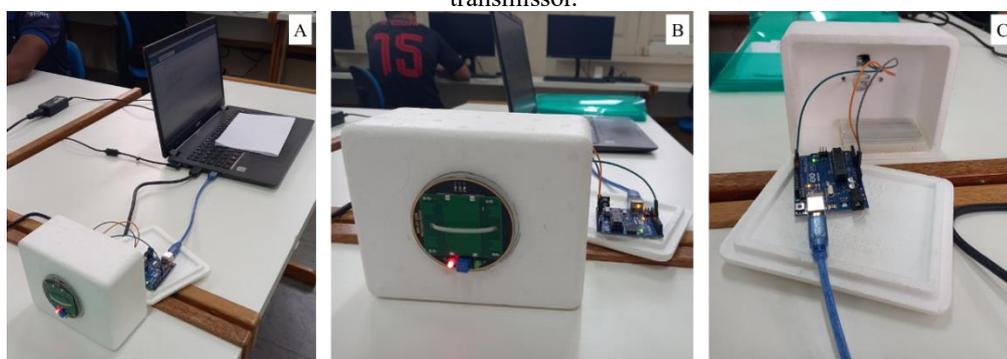
Com esses pressupostos, e com a disposição dos recursos supracitados, pode-se iniciar as práticas experimentais, e para auxiliar na implementação desta abordagem experimental, no

Apêndice A, é disponibilizado um Manual de Laboratório, com instruções de ação para nortear as atividades de efeito Doppler-Fizeau no laboratório de informática.

4.2.2.1 Experimento 1 - Visualização da Frequência detectada

Esse experimento consiste na observação da oscilação da frequência aparente detectada por reflexão, cujo objetivo interpretar o que significa os picos e vales observados na construção do gráfico. A Figura 18 abaixo demonstra como o conjunto pode ser aplicado para funcionamento.

Figura 18 – (A): vista panorâmica do dispositivo de experimento, (B) vista frontal e (C) vista traseira do transmissor.



Fonte: autor (2023).

Note que foi usada uma caixa de isopor para fixar o sensor, onde fizeram-se alguns furos para passagem dos cabos de alimentação e comunicação com o Arduino.

Para esse experimento, o código de programação na Tabela 5 abaixo deve ser inserido na IDE do Arduino, possibilitando a detecção (leitura) do sinal da frequência aparente.

Tabela 5 – Código de programação para plotagem de gráfico da frequência detectada no Excel.

```
#include <FreqMeasure.h> // Inclui a biblioteca FreqMeasure.h
int linha = 0; // Declara e inicializa a variável "linha" com o valor 0
int LABEL = 1; // Declara e inicializa a variável "LABEL" com o valor 1
float frequency = 0.0; // Declara e inicializa a variável "frequency" como um número de ponto flutuante (float) com o valor 0.0
float state; // Declara a variável "state" como um número de ponto flutuante (float)
void setup()
{
  Serial.begin(57600); // Inicializa a comunicação serial com a taxa de transmissão de 57600 bps
  FreqMeasure.begin(); // Inicializa a medição de frequência usando a biblioteca FreqMeasure
  Serial.println("CLEARDATA"); // Envia o comando "CLEARDATA" pela porta serial
  Serial.println("LABEL,linha,frequency"); // Envia os cabeçalhos dos dados pela porta serial
}
void loop()
{
```

```

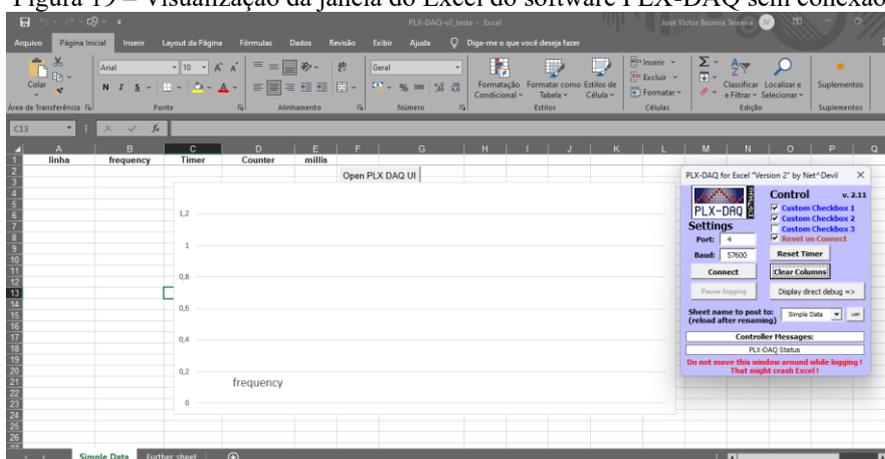
float frequency = FreqMeasure.read(); // Lê a frequência medida e
armazena na variável "frequency"
frequency = FreqMeasure.read(); // Lê a frequência medida novamente e
atualiza o valor da variável "frequency"
Serial.print("DATA,TIME,"); // Envia a string "DATA,TIME," pela porta
serial
Serial.print(frequency); // Envia o valor da variável "frequency" pela
porta serial
Serial.println(); // Envia uma quebra de linha pela porta serial
delay(500); // Aguarda 500 milissegundos
}

```

Fonte: autor (2023).

Após a inserção desse código, é necessário inicializar o Excel do software PLX-DAQ⁵, no qual demonstrará a janela abaixo, Figura 19.

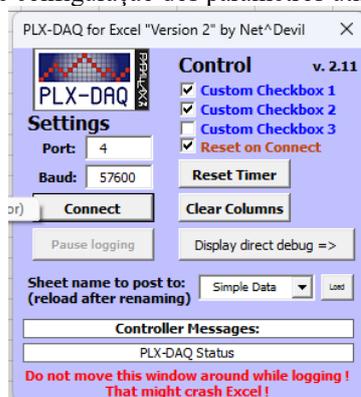
Figura 19 – Visualização da janela do Excel do software PLX-DAQ sem conexão.



Fonte: autor (2023).

Nesta janela, é importante verificar a aba do PLX-DAQ, inserindo a porta digital em que o sensor está conectado no Arduino em *Port* (porta), e na configuração *Baud* (transmissão) inserir o mesmo valor no código de programação do *void setup*, conforme visualizado na Figura 20 abaixo.

Figura 20 – Janela de configuração dos parâmetros utilizados no PLX-DAQ.

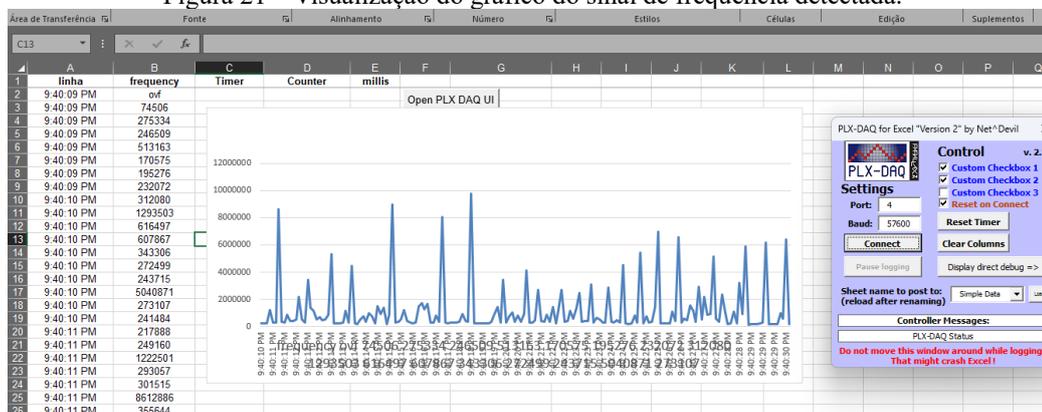


Fonte: autor (2023).

⁵ Para fazer o download do software, acessar: <https://www.parallax.com/package/plx-daq/>

Em seguida, pode-se acionar o botão *connect* (conectar), que iniciará a leitura dos dados do sinal da frequência detectada pelo Arduino através do HB100. A Figura 21 abaixo demonstra como será visualizada a onda detectada.

Figura 21 – Visualização do gráfico do sinal de frequência detectada.



Fonte: autor (2023).

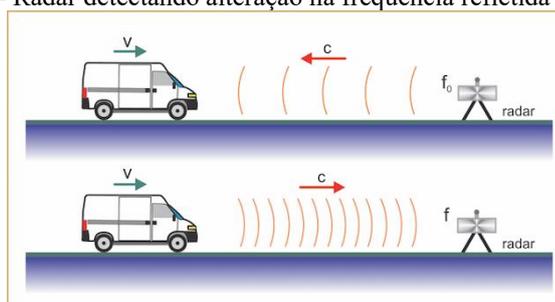
Observe que os picos da onda descrevem que algum objeto se aproximou do transmissor, enquanto nos vales justifica-se pelo afastamento, e na situação de *ovf* (*overflow*) no gráfico, na coluna de *frequency* (frequência), não houve movimentação, logo, não foi detectado divergência na frequência emitida e detectada.

Com esse experimento, espera-se que os participantes compreendam as informações do gráfico e interpretem os picos das ondas conforme a teoria do Efeito Doppler-Fizeau, pois são conhecimentos relevantes no estudo da ondulatória na física moderna.

4.2.2.2 Experimento 2 – Velocidade de um alvo por Efeito Doppler-Fizeau

No segundo experimento, a informação da frequência aparente detectada ganha significado para uma aplicação tecnológica, atribuindo um condicional para o sinal da frequência aparente detectada no código de programação, que resultará na aferição de velocidade de um objeto que está se aproximando do transmissor (radar) em repouso, conforme observado na Figura 22 abaixo.

Figura 22 – Radar detectando alteração na frequência refletida pelo veículo.



Fonte: AUTOMOVEIS.ONLINE. 2024.

Para a realização desta atividade, é utilizado o mesmo conjunto de componentes da atividade anterior, Experimento 1, e a única alteração a ser realizada está no código de programação, disponível na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Código de programação para medir a velocidade de um corpo em movimento por Efeito Doppler-Fizeau.

```
#include <FreqMeasure.h> // Inclui a biblioteca FreqMeasure
para medir frequências

#define DOPPLER_SHIFT_CONSTANT 19.49 // Define a constante
de desvio doppler como 19.49

#define MINIMUM_SPEED 0.3 // Define a velocidade mínima como
0.3

void setup()
{
  Serial.begin(57600); // Inicializa a comunicação serial
com a taxa de transmissão de 57600 bps

  FreqMeasure.begin(); // Inicia a medição de frequência
}

double freq_sum = 0; //Inicializa a soma das frequências como
0

int freq_count = 0; //Inicializa a contagem de frequências
como 0

unsigned long time_since_reading = 0; // Inicializa o tempo
desde a leitura como 0

float max_speed = 0.0; //Inicializa a velocidade máxima como
0.0

void loop()
{
  if (FreqMeasure.available()){ //Verifica se há uma leitura
disponível

  freq_sum = freq_sum + FreqMeasure.read(); // Soma a leitura
atual à soma das frequências

  freq_count++; // Incrementa a contagem de frequências

  unsigned long currentMillis = millis(); // Obtém o tempo
atual em milissegundos

  if (freq_count > 10) { // Verifica se a contagem de
frequências é maior que 10

  float frequency = FreqMeasure.countToFrequency(freq_sum /
freq_count); // Calcula a frequência média
```

```

float speed = frequency/DOPPLER_SHIFT_CONSTANT; // Calcula
a velocidade usando o desvio doppler

if (speed > MINIMUM_SPEED) { // Verifica se a velocidade é
maior que a velocidade mínima

if (speed > max_speed) { // Verifica se a velocidade atual
é maior que a velocidade máxima registrada

max_speed = speed; // Atualiza a velocidade máxima

}

Serial.print(speed); // Imprime a velocidade atual

Serial.print(" (");

Serial.print(max_speed); // Imprime a velocidade máxima
registrada

Serial.print(") km/h"); // Imprime a unidade de velocidade

time_since_reading = currentMillis; // Atualiza o tempo
desde a leitura

Serial.println(); // Imprime uma nova linha

}

freq_sum = 0; // Reinicia a soma das frequências

freq_count = 0; // Reinicia a contagem de frequências

}

}

}

```

Fonte: autor (2023).

Após o envio do código para o Arduino, você visualizará na IDE através do monitor serial as velocidades detectadas, conforme a Figura 23 a seguir.

Figura 23 – Visualização da velocidade de um corpo no monitor serial da IDE.

The screenshot shows the Arduino IDE interface. The top bar indicates 'Arduino Uno' is selected. The main editor displays the code from the previous block. Below the editor, the 'Monitor Serial' window is open, showing the following output:

```

2.78 (2.95) km/h
1.60 (1.60) km/h
0.86 (1.60) km/h
0.53 (1.60) km/h
0.65 (1.60) km/h
0.56 (1.60) km/h

```

Fonte: autor (2023).

Ressalta-se que, a velocidade verificada em parênteses, não está calibrada, tal atividade será realizada em trabalhos futuros, logo o código disponibilizado anteriormente possui uma abordagem qualitativa do Efeito Doppler-Fizeau usando as micro-ondas para verificar a velocidade de um objeto, cujos valores são aproximações e condizem com uma representação dos equipamentos medidores de velocidade desenvolvidos por fabricantes regulamentados e utilizados por agentes de trânsito.

Diante disso, essa atividade possibilita ao estudante visualizar como é realizada a aferição de velocidade nos radares de velocidade que estão dispostos nas vias, relacionando a teoria da física com a aplicação tecnológica empregada.

4.2.2.3 Experimento 3 – Automação de uma porta por Efeito Doppler-Fizeau

Neste experimento, busca-se proporcionar aos participantes outra aplicação tecnológica da teoria do Efeito Doppler-Fizeau em nosso cotidiano, assim, é feita a simulação de uma porta automatizada usando-se da onda refletida após a aproximação de uma pessoa (alvo) no campo de atuação das ondas emitidas pelo transmissor, conforme ilustrado na Figura 24 abaixo.

Figura 24 – Porta automática com área de atuação das ondas eletromagnéticas em destaque.



Fonte: HOTRON.COM.

O código de programação na Tabela 7 abaixo foi construído a partir de um sinal de dados da frequência própria do transmissor, sendo o valor 4294967295, valor máximo armazenado, assim, a lógica de programação baseia-se em condicionar a variação desse sinal que devido à aproximação será divergente da frequência da onda emitida, ocorrendo aumento na frequência, logo o sistema comunicará a mensagem “PORTA ABERTA”, e para o caso de não ocorrer movimento que possibilite alguma flutuação abaixo do sinal padrão, o sistema deverá mostrar a mensagem “PORTA FECHADA”, simulando a situação de uma pessoa afastando-se da porta ou nenhuma atividade.

Tabela 7 – Código de programação para simular a automação de uma porta.

```
#include <FreqMeasure.h> // Inclui a biblioteca FreqMeasure
para medir frequências
```

```

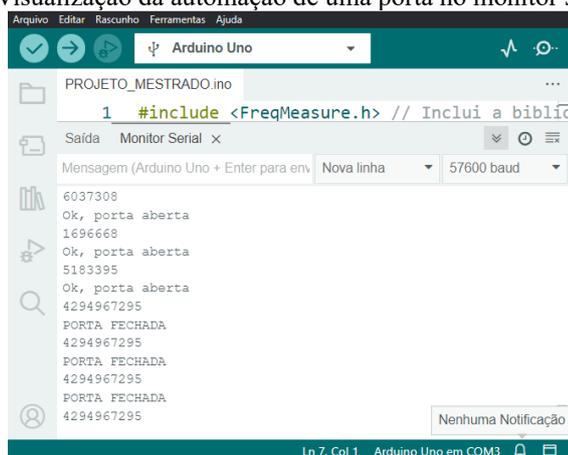
void setup() {
  Serial.begin(57600); // Inicializa a comunicação serial com
  uma taxa de transmissão de 57600 bps
  FreqMeasure.begin(); // Inicia a medição da frequência
}
void loop() {
  FreqMeasure.read(); // Lê o valor da frequência medida, mas
  não o utiliza
  Serial.println(FreqMeasure.read()); // Lê o valor da
  frequência medida e o imprime no monitor serial
  delay(500); // Aguarda 500 milissegundos
  if(FreqMeasure.read() <4294967295){ // Verifica se o valor da
  frequência medida é menor que 4294967295
  Serial.println("Ok, porta aberta"); // Imprime "Ok, porta
  aberta" no monitor serial se a condição for verdadeira
  if(FreqMeasure.read() <4294967295) // Verifica novamente se
  o valor da frequência medida é menor que 4294967295
  delay(2000); // Aguarda 2000 milissegundos se a condição for
  verdadeira
  }
  else{ // Executa se a condição na linha 11 for falsa
  if(FreqMeasure.read() >4194967295) // Verifica se o valor da
  frequência medida é maior que 4194967295
  Serial.println("PORTA FECHADA"); // Imprime "PORTA FECHADA"
  no monitor serial se a condição for verdadeira
  delay(2000); // Aguarda 2000 milissegundos
  }
}
}

```

Fonte: autor (2023).

Após encaminhar o código ao Arduino, é necessário clicar em monitor serial para monitorar o estado que o sensor está identificando, lembrando que o monitor serial é uma interface nativa da IDE do Arduino. A Figura 25 abaixo ilustra o código em funcionamento.

Figura 25 – Visualização da automação de uma porta no monitor serial da IDE.



Fonte: autor (2023).

Fica nítida a eficiência do sistema e sua aplicação prática em sala de aula, pois os dados são gerados instantaneamente na IDE, e o usuário pode realizar as mudanças no código conforme a necessidade de seu projeto. Uma atividade interessante para este experimento seria solicitar dos participantes a construção de uma porta de isopor com motores servos em maquete para representar como uma porta pode ser automatizada e expor em uma feira de ciências, por exemplo.

5. SEQUÊNCIA DE ENSINO

Esta seção é dedicada a descrever uma alternativa de ensino sobre a abordagem do Efeito Doppler-Fizeau de OEM no ensino médio, sendo uma sugestão idealizada pelo autor desta obra e, constitui-se de uma Sequência Didática (SD) com duração de oito tempos de aula para alunos do ensino médio, subdividindo-se em três momentos, a saber: (i) introdução, sendo aula expositiva dialogada e produção de mapas conceituais; (ii) introdução ao Arduino e códigos de programação; e (iii) construção do experimento e aplicações usando OEM através de sensor HB100 acoplado ao Arduino.

Na Tabela 8 abaixo, observa-se a organização geral da proposta de SD quanto à divisão em momentos.

Tabela 8 – Organização da Sequência didática.

Sequência didática							
Introdução				Desenvolvimento		Conclusão	
Aula 1	Aula 2	Aula 3	Aula 4	Aula 5	Aula 6	Aula 7	Aula 8
Roda de Conversa e questionário inicial	Aula dialogada: conceitos fundamentais	Aula dialogada: grandezas ondulatórias	Aula dialogada: efeito Doppler-Fizeau	Introdução ao Arduino e programação	Introdução ao Arduino e programação	Experimento com Arduino - HB100	Experimento com Arduino - HB100 e questionário final

Fonte: autor (2023).

Com essa abordagem, tem-se uma amplitude de conhecimentos que contemplam aprendizagens múltiplas e ativas, que interligam a física em uma abordagem experimental computacional, contribuindo para uma formação integral do estudante, sendo desenvolvidos em caráter conceitual, procedimental e atitudinal.

Portanto, em concordância com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), para a estruturação desta SD, utiliza-se a competência número 3.

“Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC)”. (BRASIL, 2018, p. 544).

Dessa forma, empregam-se as habilidades: (EM13CNT301) e (EM13CNT308), e com isso, pode-se estabelecer os objetivos.

Objetivo Geral de Ensino

Compreender a importância do desenvolvimento científico proporcionado pela física do efeito Doppler-Fizeau em ondas eletromagnéticas, evidenciando a relação teórico-prática usando Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC).

Objetivos Específicos de Ensino

1. Compreender as diferenças conceituais dos fundamentos da ondulatória;
2. Abordar a construção histórica do efeito Doppler-Fizeau em ondas mecânicas e eletromagnéticas;
3. Introduzir prototipagem com Arduino e Linguagem de programação;
4. Comprovar o Efeito Doppler-Fizeau em ondas Eletromagnéticas.

• Introdução

Aula 1

A primeira aula deve buscar introduzir os estudantes na temática da física e suas aplicações no cotidiano. Assim, é interessante iniciar a partir de uma roda de conversa, para contextualizar e verificar quais tecnologias eles reconhecem conforme as teorias da física, possibilitando analisar os conhecimentos prévios dos participantes. Nesse momento, após manifestarem suas observações cotidianas, é importante que o mediador possa especificar os radares de velocidade nas vias e as portas automáticas, para notar se os alunos conseguem relacionar ao efeito Doppler-Fizeau de ondas eletromagnéticas.

Com esta verificação, o mediador pode anunciar que nas próximas aulas tais explicações serão esclarecidas e então iniciar a aplicação do questionário inicial, disponível no Apêndice B.

Ao término destas atividades, explica-se aos participantes o que será feito ao longo das aulas seguintes, e que o propósito é que possam compreender a importância da física moderna aliada à tecnologia no seu cotidiano.

Aula 2

Nesta aula, serão abordados os conceitos fundamentais da ondulatória, destacando a natureza, meios de propagação, vibração e propagação (longitudinal ou transversal), e classificação do som e da luz.

Para isso, é necessário distribuir para cada aluno um material complementar, disponível no Apêndice C, que deve ser preenchido conforme a evolução da aula. Dessa forma, a aula será iniciada a partir de um slide, disponível no Apêndice D. É importante que os participantes participem do desenvolvimento da aula dialogada, pois além de contribuírem para o avanço do esclarecimento dos conceitos, precisarão ao final desta aula elaborar um mapa

conceitual ou algum tipo de mapa geral, desde que, seja descrito minimamente as relações entre os conceitos apresentados na aula.

A partir disso, pode-se avaliar como os participantes estão entendendo e valorizando os aspectos qualitativos abordados em aula e, caso necessário, suprir as necessidades observadas nos mapas e relatos durante a troca de informação na aula dialogada.

Aula 3

Este momento seguirá a mesma abordagem da aula anterior, onde inicia com a distribuição de novo material, Apêndice E, a ser preenchido no desenvolvimento da aula com slide, Apêndice F, e ao final é solicitado um novo mapa conceitual/geral. A diferença desta aula está contida em abordar os conceitos e definições das grandezas ondulatórias, tais como frequência e comprimento de onda, pois são pontos fundamentais para a compreensão do efeito Doppler-Fizeau.

Ao final desta aula, pode-se anunciar que será iniciado na próxima aula as explicações do funcionamento dos radares de velocidade e portas automáticas, e que posteriormente irão para o laboratório de informática construir esses experimentos, assim os participantes ficam motivados, evitando dispersão nas aulas.

Aula 4

Nesta aula, aborda-se o Efeito Doppler-Fizeau, que provavelmente os estudantes já devem ter ouvido falar apenas com o nome Doppler. Esta aula seguirá a mesma abordagem das aulas dialogadas anteriores, disponibilizando inicialmente um material complementar, Apêndice G, e uso de slide, Apêndice H.

Além disso, serão expostas às contribuições de Doppler e Fizeau para a construção da teoria e a amplitude de seu uso nas tecnologias. Ressalta-se a importância de enfatizar aos estudantes a ocorrência do fenômeno para o som, onda mecânica, e para a luz, onda eletromagnética, pois ao tratar deste fenômeno na luz, observam-se efeitos da teoria da relatividade restrita.

Um fator importante neste momento é que o mediador verifique e analise os resultados e observações desta aula, pois nas atividades experimentais serão instigados a investigar os resultados que o experimento proporciona.

• *Desenvolvimento*

Aula 5

Após a conclusão da introdução, é possível iniciar a introdução ao Arduino e lógica de programação. Nesse momento, é importante verificar o nível de conhecimento dos participantes sobre informática, e ficar atento para explicar todos os procedimentos básicos, manuseio do

mouse, teclado, e o que é a linguagem de programação e qual sua utilidade. Para isso, sugiro aqui uma conversa inicial sobre informática, com perguntas sobre noções básicas para manuseio do computador.

Essa aula, contemplará a inserção dos estudantes no meio informatizado, pois apesar de serem nativos digitais, muitos são apenas usuários destas tecnologias, com pouco conhecimento ou nenhum sobre o funcionamento básico destas ferramentas. Dessa forma, tem-se como objetivo a inclusão digital por meio do microcontrolador Arduino empregado na física moderna.

Inicialmente, caso exista um laboratório de informática, é interessante limitar a turma entre 4 e 5 equipes, assim, será proporcionado a cooperação entre os alunos no andamento das atividades, e o mediador poderá monitorar com eficiência. Na ocasião de não possuir um espaço com laboratório de informática, uma sugestão seria utilizar um projetor e um computador para ser feita a programação diante da turma, com todos participando, ou ainda, dispor das equipes para realizar cada etapa desta aula: programação, montagem do circuito elétrico e teste do código.

Para cada equipe, distribui-se um material complementar, Apêndice I, e em seguida o mediador deve instruir e explicar os componentes de Hardware (Arduino) e Software (IDE) que serão utilizados.

Após esta atividade, certamente muitos estarão interessados para o que será feito nas próximas aulas, onde será dada continuidade as atividades com Arduino. Ao final desta aula, observar os relatos dos participantes é fundamental para o andamento da próxima aula, pois não há como avançar sem que o básico apresentado neste momento seja compreendido.

Aula 6

Esta aula tem o fim de verificar a aprendizagem dos alunos sobre a lógica de programação do Arduino utilizando o mesmo material do Apêndice I, pois serão desafiados a construir o código de programação de um semáforo, exigindo pensamento crítico.

Durante a atividade, o mediador precisa acompanhar o código que está sendo confeccionado pelas equipes, dando suporte caso note alguma sequência que não compreende o propósito do desafio.

Ao final, cada equipe realizará o teste do seu código. Observe que o Arduino possui uma memória que armazena a linguagem de programação, ou seja, ao retirar de um computador e conectar em outro, o código iniciado será o da equipe anterior, fique atento para que as equipes encaminhem seu próprio código e não confundam com o já armazenado no Arduino pela equipe anterior, pois é necessário sobrescrever o código existente.

O término desta atividade implicará na compreensão básica de como o microcontrolador funciona, assim, a turma estará apta para iniciar o experimento do Efeito Doppler-Fizeau com Arduino.

- **Conclusão**

Aula 7

Esta aula irá interligar os conceitos trabalhados na introdução com o microcontrolador Arduino para possibilitar a investigação do efeito Doppler-Fizeau em onda eletromagnética.

Para isso, a turma pode ser dividida em equipes, igualmente nas aulas anteriores, em que inicialmente o mediador apresentará o sensor HB100 com auxílio de um material complementar, Apêndice J e K, e em seguida direcionará a primeira atividade para cada equipe, escrita dos códigos de programação.

Como a prática experimental é dividida em três aplicações, pode-se distribuir para cada equipe um código de programação, assim, cada uma estará responsável pela realização de um experimento: visualização das curvas do sinal de frequência detectada, velocidade de um corpo à distância, e simulação de porta automatizada.

Nesta aula deve ser dado o enfoque para a realização do primeiro experimento, pois é a base para a verificação do fenômeno ocorrendo, logo, seu entendimento é crucial para todas as equipes.

Ao concluir esta atividade, em que a equipe responsável ou a turma desenvolveu, é interessante indagar os estudantes sobre o comportamento que o gráfico está demonstrando. Note que o objetivo é que os alunos consigam visualizar o fenômeno através do gráfico formado pelo sensor no software do Excel. As demais aplicações podem ser exploradas no dia seguinte caso o tempo seja insuficiente.

Aula 8

Esta aula é dedicada à verificação das ondas eletromagnéticas para determinar a velocidade de um corpo e simulação de porta automática. Para isso, distribui-se novamente a turma em equipes responsáveis pelas programações, Apêndice K, de cada experimento.

Com a conclusão das programações, o mediador realizará os testes usando o projetor para que todos visualizem o monitor serial do IDE e interajam na investigação, buscando esclarecer como o processo está ocorrendo no experimento.

É importante que os participantes compreendam que a onda emitida é refletida por um corpo em movimento, e detectada pelo sensor, em que por meio desse movimento relativo entre a fonte estacionária e o alvo, forneça ao sensor uma frequência aparente diferente daquela emitida inicialmente, resultando no fenômeno do Efeito Doppler-Fizeau, do qual podemos

concluir a velocidade do corpo em movimento ou determinar a aproximação deste para o acionamento da abertura de uma porta.

É importante que as relações dos conceitos do fenômeno com o experimento sejam realizadas pelos participantes, o mediador apenas intervirá se necessário, possibilitando que todos os pontos a serem investigados no experimento sejam exauridos.

Com o término das atividades, o mediador pode aplicar um questionário final, Apêndice L, que consiste em 6 questões de vestibulares divididas em itens de ondas mecânicas e eletromagnéticas. Sugere-se que o resultado deste questionário possa ser integrado nas notas avaliativas bimestrais da turma, e, além disso, os itens do questionário trazem a realidade das provas dos processos seletivos que todos os alunos do ensino médio normalmente realizam para ingresso nas universidades públicas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ideia central deste produto educacional surgiu a partir da análise de trabalhos que abordam o efeito Doppler-Fizeau no Ensino Médio, que revelou uma lacuna na abordagem deste fenômeno voltado para ondas eletromagnéticas (OEM), logo, como possibilitar um estudo ativo experimental para as OEM? Essa indagação foi precursora para o desenvolvimento deste trabalho que culminou na composição desta Sequência Didática como alternativa viável a ser utilizada por demais profissionais que tenham interesse em ultrapassar a linha da abstração e reforçar o caráter investigativo que preconiza a ciência para a compreensão da natureza.

Diante disso, acredita-se que este trabalho possa contribuir com o ensino de física na educação básica, dando suporte ao professor que esbarre com a mesma indagação que me fez no início, possibilitando até mesmo que seja proposto melhorias em sua reaplicação e que promova o entusiasmo nos estudantes e pessoas que tenham interesse na temática.

Esta Sequência Didática foi elaborada com base na aplicação realizada pelo autor em uma escola do interior do Amazonas, durante o curso do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Logo, nada impede a aplicação parcial das propostas sugeridas com as devidas adaptações.

Portanto, este trabalho é uma alternativa de inserir a física moderna através do efeito Doppler-Fizeau de ondas eletromagnéticas, estabelecendo uma abordagem contemporânea, que ao agregar o uso de TDIC busca-se uma aprendizagem contextualizada as tecnologias vigentes, permitindo um olhar atrativo e inspirador.

7. REFERÊNCIAS

- ALI EXPRESS. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/i/32928918187.html>>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- ANASTASIOU, Lea das Graças Camargo; ALVES, Leonir Pessate. **Processos de ensinagem na universidade: Pressupostos para as estratégias de trabalho em aula**. Ed. Joinville, SC, 2007.
- ARDUINO.CC. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>>. Acesso em: 29 mar. 2024.
- AUTOMOVEIS-ONLINE. **Efeito Doppler e radar de velocidade, sabe o que é?** Disponível em: <https://noticias.automoveis-online.com/efeito-doppler-e-radar-de-velocidade-sabe-o-que-e/>. Acesso em: 18 de Jan. 2024.
- BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: MEC, 2018.
- FREIRE, Paulo. **Pedagogia do Oprimido**. São Paulo: Paz e Terra, 2006.
- FRITZING.ORG. Disponível em: <https://fritzing.org/>. Acesso em: 14 jul. 2023.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. Vol. IV. Grupo Gen-LTC, 2016.
- HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. 12ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- HOTRON.COM. **Puertas Corredoras - HR50/HR50-UNI**. Disponível em: <https://hotron.com/es/product/hr50-hr50-uni/>. Acesso em: 06 jan. 2024.
- MOREIRA, M.A. (1995). Monografia nº 10 da *Série Enfoques Teóricos*. Porto Alegre. Instituto de Física da UFRGS. Originalmente divulgada, em 1980, na série "Melhoria do Ensino", do Programa de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino Superior (PADES)/UFRGS, Ne 15. Publicada, em 1985, no livro "**Ensino e aprendizagem: enfoques teóricos**". São Paulo, Editora Moraes, p. 61-73. Revisada em 1995.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: EPU, 1999.
- MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa: da visão clássica à visão crítica**. Conferência de encerramento do V Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, Madrid, Espanha, setembro de 2006 e do I Encuentro Nacional sobre Enseñanza de la Matemática, Tandil, Argentina, abril de 2007. Disponível em: www.if.ufrgs.br/~moreira/visaoclassicavisaocritica.pdf
- TECNOSOLUTION.BLOGSPOT. **Eletrônica: conhecendo o LED**. Disponível em: <http://tecnosolution.blogspot.com/2013/09/eletronica-conhecendo-o-led.html>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- YOUNG, H. D. et al. **Física III - Eletromagnetismo**. 14. ed. Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2016.
- WIKIMEDIA. 2006. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Velocity0_70c.jpg?uselang=pt-br. Acesso em: 14 Ago. 2023.

8. APÊNDICES

Apêndice A – Manual de Laboratório



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS – ICE
INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS – IFAM
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 04

JOSÉ VICTOR BEZERRA TEIXEIRA

MANUAL DE LABORATÓRIO

ABORDAGEM EXPERIMENTAL DE FÍSICA MODERNA: EFEITO DOPPLER-FIZEAU
EM ONDA ELETROMAGNÉTICA

MANAUS – AM
2024

1. EFEITO DOPPLER-FIZEAU EM ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

1.1. Objetivo

Aplicar o Arduino com sensor HB100 para verificar o efeito Doppler-Fizeau em onda de Micro-ondas.

1.2. Teoria

A descrição relativística em relação ao efeito Doppler-Fizeau para OEM, deve-se ao fato de que na mecânica newtoniana é considerado um referencial inercial privilegiado e o tempo é absoluto. Além disso, a relatividade (transformação) de Galileu ao tratar da adição de velocidades em referenciais inerciais distintos, torna-se incompatível com a descrição das equações de Maxwell, pois a velocidade da luz é constante para qualquer direção e sentido de propagação (MACHADO, 2002).

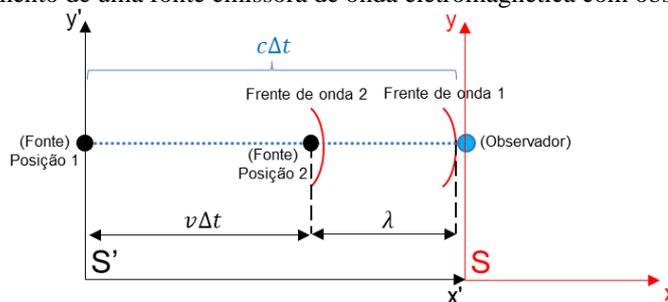
Ao introduzir a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), desenvolvida por Einstein em 1905, tem-se dois postulados que em linhas gerais descrevem as leis da física permanecendo iguais para quaisquer referenciais inerciais e a velocidade da luz constante com velocidade definida (c) (PIRES, 2011).

$$c \cong 3.10^8 \text{ m/s}$$

A partir disso, os efeitos estendem-se para o estudo das ondas eletromagnéticas, uma vez que possuem velocidade (c), conseqüentemente implicando no efeito Doppler-Fizeau, resultando em alterações no tempo de detecção com os incrementos do fator de dilatação temporal (transformação de Lorentz), comprimento de onda e frequência aparente.

Na Figura 1 abaixo demonstra-se a situação utilizada para explicitar a dedução matemática que descreve tal fenômeno ondulatório.

Figura 1 – O movimento de uma fonte emissora de onda eletromagnética com observador em repouso.



Fonte: autor (2023).

Nota-se que a distância percorrida pela fonte está descrita como $v\Delta t$, onde $c\Delta t$ representa a distância percorrida pela frente de onda 1, com c sendo a velocidade de propagação da luz emitida, e o comprimento de onda λ descrevendo a distância entre duas cristas. A fonte assume duas posições, em que a posição 1, caracteriza-se como o momento de emissão da frente

de onda 1, enquanto que a posição 2 refere-se ao momento em que a frente de onda 2 é emitida. Portanto, a frente de onda 2 foi emitida quando a fonte e a frente de onda 1 assumiram as posições descritas na Figura 1 acima.

Dessa forma, a frequência detectada pelo observador, é dada por

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Das descrições do problema na figura anterior, temos

$$\begin{aligned} c\Delta t &= v\Delta t + \lambda \\ \lambda &= \Delta t(c - v) \end{aligned} \quad (1)$$

Sabendo que,

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Substituindo em (1),

$$\begin{aligned} \frac{c}{f} &= \Delta t(c - v) \\ f &= \frac{c}{\Delta t(c - v)} \end{aligned} \quad (2)$$

De acordo com a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), os tempos nos referenciais são diferentes, logo,

$$t_0 = \textit{tempo próprio}$$

$$t = \textit{tempo para o observador}$$

Sendo, o tempo próprio referente ao referencial S' da fonte, na qual as ondas são emitidas em intervalos de tempo iguais, porém para o observador há divergência no tempo de detecção, assim, de acordo com a TRR, o intervalo de tempo para o observador é descrito pela relação

$$\Delta t = \gamma t_0 \quad (3)$$

Onde o termo γ , fator relativístico, é dado por,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Sendo que, relacionando o tempo próprio com o período, temos

$$t_0 = T_0 = \frac{1}{f_0}$$

Que descreve o período de oscilação da onda, dado pelo inverso da frequência própria.

Assim, substituindo na equação (3), fica,

$$\Delta t = \frac{T_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{T_0}{\sqrt{\frac{c^2-v^2}{c^2}}} = \frac{T_0}{\frac{1}{c}\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{T_0 c}{\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{c}{f_0 \sqrt{c^2-v^2}} \quad (4)$$

Substituindo em (2),

$$f = \frac{\frac{c}{\Delta t}}{f_0 \sqrt{c^2-v^2}} = f_0 [(c+v)(c-v)]^{1/2} (c-v)^{-1} = f_0 (c+v)^{1/2} (c-v)^{-1/2}$$

Assim,

$$f = f_0 \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} = f_0 \sqrt{\frac{c\left(1+\frac{v}{c}\right)}{c\left(1-\frac{v}{c}\right)}}$$

Onde,

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Obtém-se,

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \quad (5)$$

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} \quad (5.1)$$

A equação (5) acima, descreve o movimento de aproximação da fonte em relação ao observador estático, e analogamente, invertendo os sinais devido o sentido da velocidade para o caso de afastamento, temos a equação (5.1).

1.3. Parte Experimental

Material Necessário

- 1 Computador desktop ou notebook com SO Windows
- 1 Projetor
- 1 Arduino UNO com cabo serial
- 3 Conectores (*jumpers* macho-fêmea)
- 1 Sensor HB100 *doppler radar*
- 1 Caixa de isopor de 1 litro
- 1 Abraçadeira de plástico

A Figura 2 abaixo demonstra o conjunto em funcionamento:

Figura 2 – (A): vista panorâmica do dispositivo de experimento, (B) vista frontal e (C) vista traseira do transmissor.



Fonte: autor (2023).

Certifique-se de que os cabos estejam bem conectados entre o sensor e Arduino, evitando flutuações divergentes na leitura do sinal de frequência.

1.3.1. Experimento 1 - Gráfico da Frequência detectada

Objetivos

Detectar a frequência aparente da onda emitida pelo sensor por meio de gráficos.

Procedimentos Experimentais

1. Iniciar o IDE do Arduino e inserir o código de programação deste experimento;
2. Iniciar o software PLX-DAQ;
3. Não realize movimentação na frente do sensor e avalie o gráfico gerado no Excel do PL-DAQ;
4. Mantenha a mão ou outro objeto, afastada do sensor por aproximadamente 30 cm, e aproxime rapidamente, em seguida avalie o gráfico;
5. Mantenha a mão ou outro objeto, afastada do sensor por aproximadamente 30 cm, e afaste lentamente, em seguida avalie o gráfico;
6. Discutir a ocorrência das cristas e vales do sinal da frequência detectada;
7. Relacionar a ocorrência dos picos com a teoria do Efeito Doppler-Fizeau;
8. Solicitar dos participantes hipóteses de automação para o uso da informação obtida pelo Arduino.

Como sugestão, indica-se que para cada ação realizada, pode-se fazer um “*print screen*” (captura da tela) do gráfico gerado para fazer a análise posteriormente, caso seja de interesse do mediador.

1.3.2. Experimento 2 - Velocidade por Efeito Doppler-Fizeau

Objetivos

Obter a velocidade de movimentos de aproximação em relação ao detector em repouso.

Procedimentos Experimentais

1. Iniciar o IDE do Arduino e inserir o código de programação deste experimento;

2. Iniciar o Monitor Serial no IDE para observar a velocidade detectada;
3. Mantenha a mão ou outro objeto, afastada do sensor por aproximadamente 30 cm, e aproxime lentamente;
4. Avalie os valores da velocidade conforme o movimento do alvo na frente do sensor;
5. Mantenha a mão ou outro objeto, afastada do sensor por aproximadamente 30 cm, e aproxime rapidamente;
6. Avalie os valores da velocidade conforme o movimento do alvo (mão ou outro objeto);
7. Analisar a relação do aumento da velocidade com a frequência da onda.

1.3.3. Experimento 3 - Automação por Efeito Doppler-Fizeau

Objetivos

Aplicar o efeito Doppler-Fizeau no funcionamento de uma porta automática.

Procedimentos Experimentais

1. Iniciar o IDE do Arduino e inserir o código de programação deste experimento;
2. Iniciar o Monitor Serial no IDE para observar a mensagem que indica o acionamento de uma suposta porta;
3. Ao ligar o Arduino com o sensor, não realizar movimento na frente do sensor e verificar a mensagem “PORTA FECHADA” no monitor serial;
4. Explicar a ocorrência para a mensagem “PORTA FECHADA” ser impressa no monitor serial e relacionar a teoria do efeito Doppler-Fizeau;
5. Coloque a mão na frente do sensor e aproxime lentamente;
6. Avaliar a informação gerada “PORTA ABERTA” no IDE;
7. Explicar a ocorrência para a mensagem “PORTA ABERTA” ser impressa no monitor serial e relacionar a teoria do efeito Doppler-Fizeau;

Referências Bibliográficas

MACHADO, K. D. **Teoria do eletromagnetismo**. Volume 2. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2002.

PIRES, A. S. T. **Evolução das ideias da física**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

Apêndice B - Questionário inicial

Auno (a): _____

Turma: _____ Turno: _____

1. O que são ondas? Quais tipos de ondas você conhece?

2. Qual é a diferença entre uma onda mecânica e uma onda eletromagnética?

- A onda mecânica se propaga apenas em meios materiais, enquanto a onda eletromagnética pode se propagar no vácuo;
- A onda mecânica transporta matéria, enquanto a onda eletromagnética transporta energia;
- A luz e o som são ondas mecânicas e as ondas do Wifi são ondas eletromagnéticas;
- Não há diferença entre as duas.

3. Suponha que haja uma explosão no espaço sideral e um astronauta estivesse próximo:

- ele ouviria o som da explosão;
- ouviria o som da explosão, mas não enxergaria a luz da explosão;
- não ouviria o som da explosão, mas enxergaria a luz da explosão;
- não ouviria o som nem a luz da explosão.

4. (Mackenzie-SP) Considere as seguintes afirmações:

I. As ondas mecânicas não se propagam no vácuo.

II. As ondas eletromagnéticas se propagam somente no vácuo.

III. A luz se propaga tanto no vácuo como em meios materiais, por isso é uma onda eletromecânica.

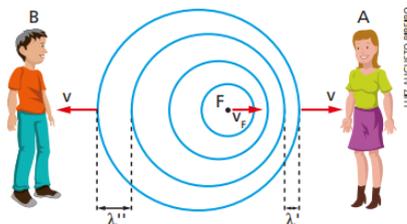
Assinale:

- se somente a afirmação I for verdadeira.
- se somente a afirmação II for verdadeira.
- se somente as afirmações I e II forem verdadeiras.
- se somente as afirmações I e III forem verdadeiras.

5. Qual é a relação entre o comprimento de onda, a frequência e a velocidade de propagação de uma onda?

- $\lambda = v \cdot f$; b) $v = \lambda \cdot f$; c) $f = v \cdot \lambda$;
- $v = f \cdot \lambda$.

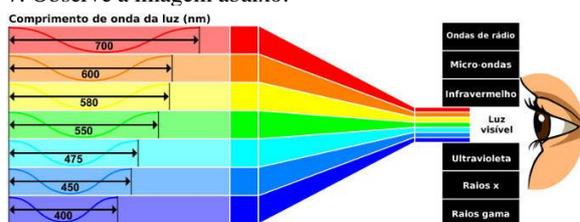
6. Uma ambulância (fonte sonora F) movimentada-se em relação a duas pessoas (observadores A e B) paradas. A figura abaixo refere-se a qual fenômeno físico?



O fenômeno da figura acima descreve o:

- Efeito de Doppler-Fizeau, com frequência maior no observador B e menor para o observador A;
- Efeito Doppler-Fizeau, com frequência menor no observador B e maior para o observador A;
- Efeito Doppler-Fizeau, com comprimento de onda e frequência maior no observador B do que para o observador A;
- Efeito Doppler-Fizeau, com comprimento de onda e frequência iguais no observador A e observador B;

7. Observe a imagem abaixo:



Podemos afirmar que:

- A luz de cor Verde possui maior frequência que a cor azul;
- A luz de cor Vermelho é a que possui maior frequência e menor comprimento de onda dentre todas as luzes visíveis;
- A cor azul é a que possui maior frequência e menor comprimento de onda dentre todas as luzes visíveis;
- A luz que possui maior comprimento de onda possui também maior frequência.

8. O fenômeno do efeito Doppler-Fizeau:

- a) ocorre somente para ondas sonoras;
- b) ocorre somente para ondas luminosas;
- c) pode ocorrer em ondas mecânicas e eletromagnéticas;
- d) pode ocorrer desde que os observadores e a fonte estejam em repouso no mesmo referencial.

9. O Efeito Doppler-Fizeau descreve que:

- a) Não ocorre em ondas sonoras enquanto que para a onda luminosa percebe-se luz vermelha (aproximação) e azul (afastamento);
- b) Para a onda sonora percebe-se um som agudo (aproximação) ou (afastamento) e para a onda luminosa não é possível ocorrer esse fenômeno;
- c) Para a onda sonora percebe-se um som grave (aproximação) ou agudo (afastamento) e para a onda luminosa percebe-se luz vermelha (aproximação) e azul (afastamento);
- d) Para a onda sonora percebe-se um som agudo (aproximação) ou grave (afastamento) e para a onda luminosa percebe-se luz azul (aproximação) e vermelho (afastamento).

10. Você sabe onde pode ser aplicado o Efeito Doppler-Fizeau em nosso cotidiano? Se possível, cite exemplos

Apêndice C - Material complementar 1

Aluno (a): _____

Turma: _____ Turno: _____

Conceitos fundamentais

Responda os itens abaixo conforme o desenvolvimento da aula.

O que são ondas?

Quais os tipos de meios de propagação?

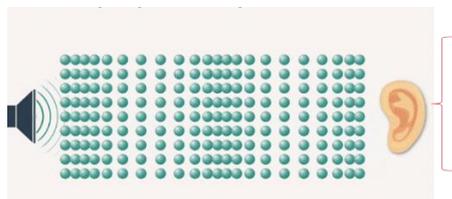
O que seria um meio material?

O que seria um meio não material?

Qual a natureza das ondas?

O que são ondas mecânicas?

O que são ondas eletromagnéticas?



Elabore um mapa conceitual dos assuntos abordados no espaço abaixo indicado **Mapa 1**

Mapa 1

Apêndice D – Slide aula dialogada 1

Efeito Doppler

Prof. José Victor

Ondas – conceitos fundamentais

O que são ondas?

Toda **perturbação que se propaga em um meio.**



Ondas – conceitos fundamentais

Quais os tipos de **meios de propagação**?

Material e não material.

O que seria um meio material?

Meio constituído de partículas (matéria): sólido, líquido gasoso.

O que seria um meio não material?

Meio em que não é constituído por partículas (ausência de matéria): vácuo.

Ondas – conceitos fundamentais

Qual a natureza das ondas?

Mecânica e Eletromagnética

O que são ondas mecânicas?

São ondas que necessitam de um meio material para se propagar.

O que são ondas eletromagnéticas?

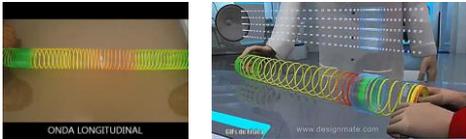
São ondas que **NÃO** necessitam de um meio material para se propagar.

Ondas – conceitos fundamentais

As ondas podem ser classificadas quanto a sua direção de vibração e propagação.

Ondas Longitudinais

A direção do **movimento de vibração coincide com à de propagação.**

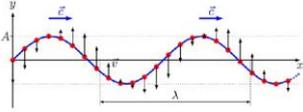


Ondas – conceitos fundamentais

As ondas podem ser classificadas quanto a sua direção de vibração e propagação.

Ondas Transversais

A direção do movimento de **vibração é perpendicular à de propagação.**



Ondas – conceitos fundamentais



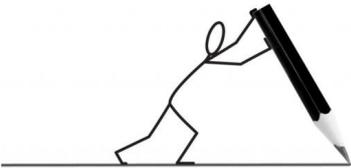
- Onda sonora
- meio: ar (material)
- Natureza: mecânica
- Origem: vibração (partículas) do meio material
- Longitudinal



- Onda luminosa
- meio: vácuo e alguns meios materiais
- Natureza: eletromagnética
- Origem: campo elétrico e magnético variáveis
- Transversal

Ondas – Atividade 1: mapa 1

Atividade 1: faça um mapa mental/conceitual dos assuntos abordados neste momento.



Apêndice E – Material complementar 2**Grandezas Ondulatórias**

Responda os itens abaixo conforme o desenvolvimento da aula.

O que são grandezas ondulatórias?

Quais grandezas ondulatórias foram estudadas?

Qual a relação existente entre essas grandezas analisadas?

Elabore um mapa conceitual dos assuntos abordados no espaço abaixo indicado **Mapa 2**

Mapa 2

Apêndice F – Slide aula dialogada 2

Ondas – Grandezas Ondulatórias

Quais grandezas analisaremos nas ondas?

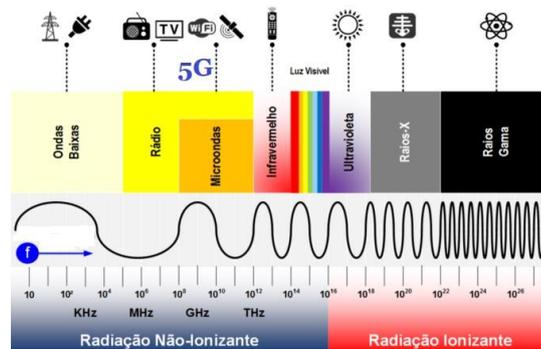
Frequência (Hz)

Comprimento de onda (λ)

Energia

Lembre-se: Essas grandezas são **inversamente proporcionais** !!

Ondas – Grandezas Ondulatórias



Ondas – Atividade 2: mapa 2

Atividade 2: faça um mapa mental/conceitual dos assuntos abordados neste segundo momento.



Apêndice G – Material complementar 3**2. Efeito Doppler Fizeau**

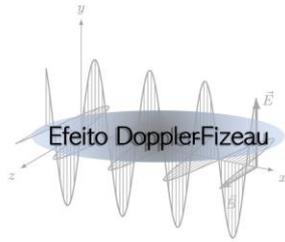
Responda os itens abaixo conforme o desenvolvimento da aula.

O efeito doppler ocorre para todas as ondas?
O que diz a teoria do Efeito Doppler-Fizeau?
O que podemos perceber do efeito Doppler-Fizeau em uma onda sonora ?
O que podemos perceber do efeito Doppler-Fizeau em uma onda luminosa ?
Onde usamos o Efeito Doppler-Fizeau?
Elabore um mapa mental dos assuntos abordados no espaço abaixo indicado Mapa 3 .

Mapa 3

--

Apêndice H – Slide aula dialogada 3



O Efeito Doppler-Fizeau: Vídeo



Onda – Efeito Doppler

O efeito Doppler explica a alteração aparente da frequência de uma onda quando existe movimento relativo entre a fonte e o observador

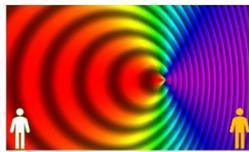
Para ondas eletromagnéticas

Cor	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)
roxo	380-440	700-790
azul	440-485	620-680
verde	490-560	530-600
amarelo	560-590	510-530
laranja	590-625	480-510
vermelho	625-740	410-470

Onda – Efeito Doppler-Fizeau

O efeito Doppler-Fizeau explica a alteração aparente da frequência de uma onda (eletromagnética) quando existe movimento relativo entre a fonte e o observador

Para ondas eletromagnéticas



Aproximação: Azul
Alta Frequência

Afastamento: vermelho
Baixa Frequência

Onde usamos o efeito Doppler-Fizeau?

- Astronomia → Determinar se um objeto está se aproximando ou afastando do nosso planeta
- Trânsito → Medir a velocidade de um automóvel no trânsito.
- Shopping → Abrir porta ao aproximar-se

O Efeito Doppler-Fizeau

No ano de 1842, **Christian Andreas Doppler** descobriu o fenômeno conhecido como "efeito doppler". Austríaco matemático e professor de física experimental pela universidade de Viena



(1803 - 1853)

Comprovou o efeito doppler para o som através de experimentos e previu o mesmo efeito para a Luz.



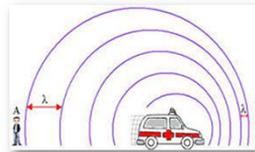
(1819 - 1896)

Anos mais tarde, **Fizeau** (físico francês) comprovou devidamente esse efeito para a luz.

Onda – Efeito Doppler

O efeito Doppler explica a alteração aparente da frequência de uma onda quando existe movimento relativo entre a fonte e o observador

Para ondas mecânicas



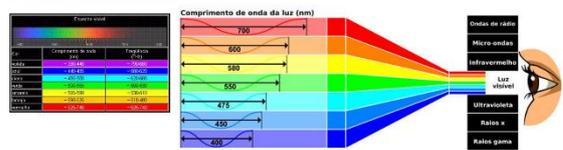
Aproximação: som agudo/alto
Alta Frequência

Afastamento: som grave/baixo
Baixa Frequência

Onda – Efeito Doppler

O efeito Doppler explica a alteração aparente da frequência de uma onda quando existe movimento relativo entre a fonte e o observador

Para ondas eletromagnéticas



Onda – Efeito Doppler-Fizeau

Onda mecânica

$$f' = f_0 \left(\frac{v_f \pm v_o}{v_f} \right)$$

f': frequência aparente
f₀: frequência da fonte
v_f: velocidade do som no meio
v_o: velocidade do observador

Onda Eletromagnética

$$f' = f_0 \sqrt{\frac{c + v}{c - v}}$$

f': frequência aparente
f₀: frequência da fonte
c: velocidade da luz no meio
v_o: velocidade da fonte

Onda – Efeito Doppler-Fizeau

Astronomia → Determinar se uma galáxia está se aproximando ou afastando do nosso planeta



Ondas – Efeito Doppler-Fizeau

Trânsito → Medir a velocidade de um automóvel no trânsito.

Ondas – Efeito Doppler-Fizeau

Trânsito → Medir a velocidade de um automóvel no trânsito.

Ondas – Efeito Doppler-Fizeau

Trânsito → Medir a velocidade de um automóvel no trânsito.

Ondas – Efeito Doppler-Fizeau

Shopping → Abrir porta ao aproximar-se

Ondas – Atividade 3: mapa 3

Atividade 3: faça um mapa mental/conceitual dos assuntos abordados neste terceiro momento.

Apêndice I – Material complementar 4

Introdução ao Arduino e programação.

Conhecendo o Arduino

➤ O que é o Arduino?

O Arduino consiste em uma placa com processador microcontrolador, com entradas e saídas digitais e analógicas, possibilitando a ligação com sensores e cada sensor possui uma função específica.



➤ Como nos comunicamos com o Arduino?

Para que o conjunto (placa e sensores) funcione, usa-se o aplicativo IDE (Ambiente Integrado de Desenvolvimento), assim usamos **Linguagem de Programação para construir os códigos de programação** e possibilitar a comunicação do Arduino com os sensores conectados.

➤ O que é código de programação?

Para que o Arduino controle os sensores, é necessário enviar esse comando ao Arduino, caso contrário nada acontecerá. Assim, você construirá o código de programação, usaremos a linguagem de programação C++, que irá comunicar-se com o microcontrolador Arduino e este controlará os sensores que você conectou.

Cada sensor possui funções próprias (bibliotecas), que estão disponíveis no IDE ou sites de desenvolvedores (Arduino.CC, GitHub e blogs).

OBSERVAÇÃO: Formem 4 grupos buscando quantidades iguais de alunos, em seguida cada equipe deve ficar em uma das mesas.

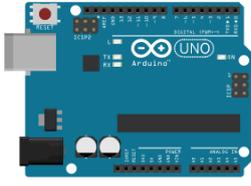
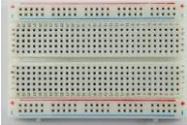
Atividade prática com Arduino

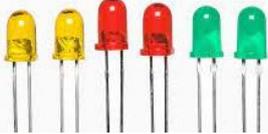
➤ Qual o objetivo?

Compreender o funcionamento do Arduino através do acionamento de um LED vermelho.

➤ Quais componentes serão utilizados?

Os componentes usados estão dispostos na Tabela 1 abaixo:

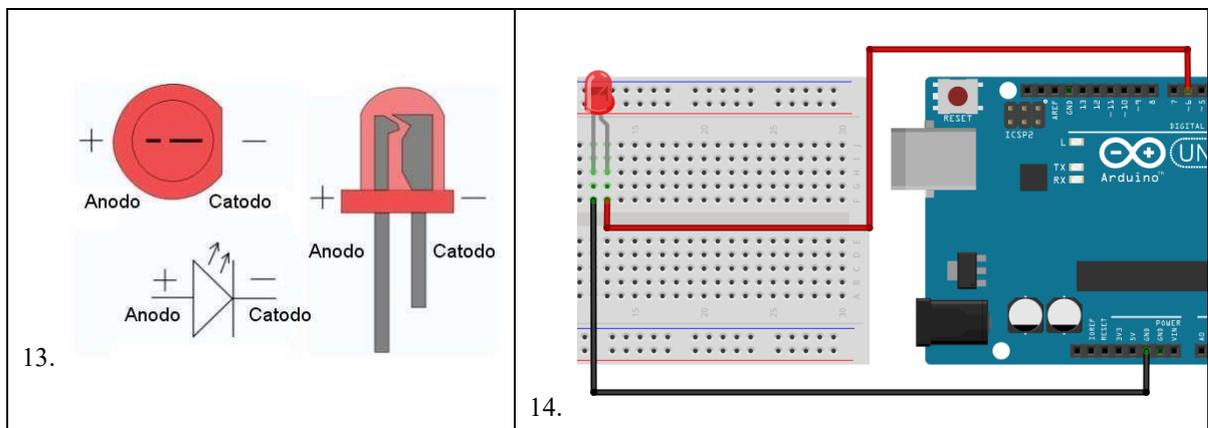
3. Arduino Uno	 <p>4.</p>
5. 7 Jumper (conectores tipo macho-macho)	 <p>6.</p>
7. Protoboard	 <p>8.</p>

9. Cabo Serial USB	 10.
11. LEDs	 12.

Para que o Arduino controle os sensores, é necessário enviar esse comando ao Arduino através da IDE, caso contrário nada acontecerá. Assim, você construirá o código de programação (usaremos a linguagem C++).

Fazer: acionar um LED.

Ação 1 - monte o circuito elétrico abaixo:



Ação 2 - Escreva o código de programação abaixo na IDE do Arduino:

```

15. void setup ()
16. {
17.   pinMode (6, OUTPUT);
18. }
19. void loop ()
20. {
21.   digitalWrite (6, HIGH);
22.   delay (1000);
23.   digitalWrite (6, LOW);
24.   delay (1000);
25. }

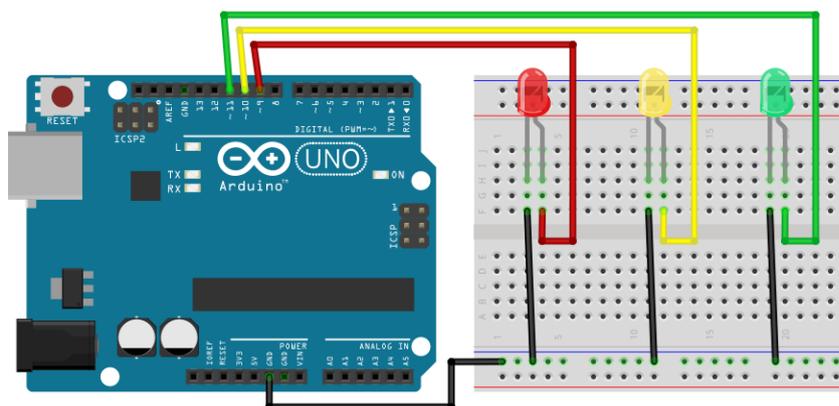
```

Ação 3 – auxilie as equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

Desafio: construir lógica de programação de um semáforo

Com base no que foi feito para acionar um LED, desenvolva um código e crie um semáforo. Use o circuito elétrico abaixo:

Ação 1 - monte o circuito elétrico abaixo:



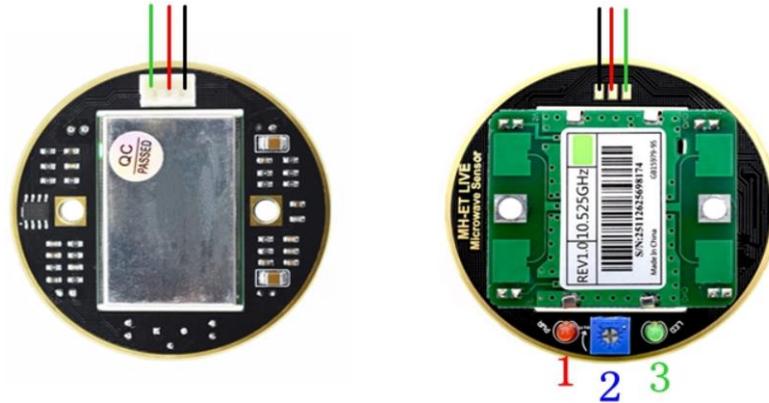
Ação 2 – A partir do código anterior, **construa** o código de programação na IDE do Arduino simulando um semáforo:

Ação 3 – auxilie as demais equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

Apêndice J – Material complementar 5 – Parte 1

Arduino e HB100.

O sensor HB100



➤ Como funciona o Sensor HB100?

Consiste em um **sensor de movimento de micro-ondas** que funciona através do efeito Doppler. A frequência de deslocamento Doppler é proporcional a velocidade do movimento e é determinado pela equação abaixo:

$$F_d = 2V \left(\frac{F_t}{C} \right) \cos\theta$$

Sendo,

F_d : Frequência Doppler (Aparente);

V : velocidade do alvo;

F_t : Frequência Transmitida (frequência da fonte);

C : velocidade da luz;

θ : O ângulo entre a direção de movimento do alvo e o eixo do módulo sensor.

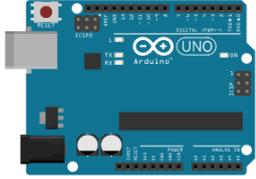
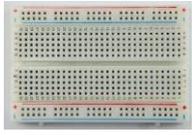
Experimento 1: análise do efeito doppler – Frequência aparente

➤ O que será feito?

Será analisado as ondas de efeito Doppler que o sensor HB100 obterá com o uso do Arduino e em seguida visualizar essas ondas a partir de gráfico.

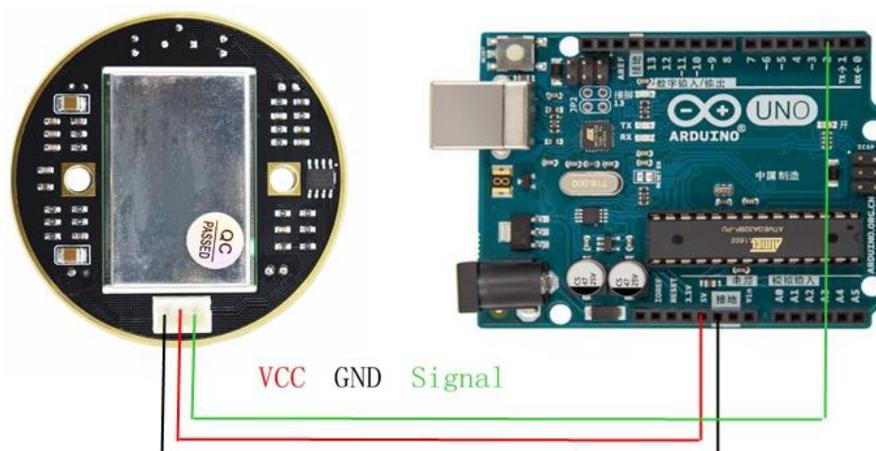
➤ O que será usado?

Os componentes usados estão dispostos na Tabela 1 abaixo:

Arduino Uno	
Jumper (conectores)	
Protoboard	

Cabo Serial USB	
Sensor HB100	

Ação 1: montagem do circuito elétrico



Ação 2: Escreva o código de programação abaixo na IDE do Arduino:

```
#include <FreqMeasure.h>
int linha = 0;
int LABEL = 1
float frequency = 0.0;
float state;
void setup()
{
  Serial.begin(57600);
  FreqMeasure.begin();
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,linha,frequency");
}
void loop()
{
  float frequency = FreqMeasure.read();
  frequency = FreqMeasure.read();
  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.print(frequency);
  Serial.println();
  delay(500);
}
```

Ação 3 – auxilie as equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

Apêndice K – Material complementar 5 – Parte 2

Experimento 2: medidor de velocidade

➤ O que será feito?

Será utilizado o sensor HB100 para simular um medidor de velocidade por efeito doppler.

➤ O que será usado?

Os componentes usados estão dispostos na Tabela 1 da primeira atividade.

Ação 1 - monte o circuito elétrico do **experimento 1**.

Ação 2 - Escreva o código de programação abaixo na IDE do Arduino:

```
#include <FreqMeasure.h>
#define DOPPLER_SHIFT_CONSTANT 19.49
#define MINIMUM_SPEED 0.3
void setup()
{
  Serial.begin(57600);
  FreqMeasure.begin();
}
double freq_sum = 0;
int freq_count = 0;
unsigned long time_since_reading = 0;
float max_speed = 0.0;
void loop()
{
  if (FreqMeasure.available()){
    freq_sum = freq_sum + FreqMeasure.read();
    freq_count++;
    unsigned long currentMillis = millis();
    if (freq_count > 10) {
      float frequency = FreqMeasure.countToFrequency(freq_sum /
      freq_count);
      float speed = frequency/DOPPLER_SHIFT_CONSTANT;
      if (speed > MINIMUM_SPEED) {
        if (speed > max_speed) {
          max_speed = speed;
        }
        Serial.print(speed);
        Serial.print(" (");
        Serial.print(max_speed);
        Serial.print(") km/h");
        time_since_reading = currentMillis;
        Serial.println();
      }
      freq_sum = 0;
      freq_count = 0;
    }
  }
}
```

Ação 3 - auxilie as equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

Experimento 3: porta automática

➤ O que será feito?

Será utilizado o sensor HB100 para simular uma porta automática através do monitor serial no IDE usando o efeito doppler.

➤ O que será usado?

Os componentes usados estão dispostos na Tabela 1 da atividade anterior.

Ação 1 - monte o circuito elétrico do **experimento 1**.

Ação 2 - Escreva o código de programação abaixo na IDE do Arduino:

```
#include <FreqMeasure.h>
void setup() {
  Serial.begin(57600);
  FreqMeasure.begin();
}
void loop() {
  FreqMeasure.read();
  Serial.println(FreqMeasure.read());
  delay(500);
  if(FreqMeasure.read() <4294967295){
  Serial.println("Ok, porta aberta");
  if(FreqMeasure.read() <4294967295)
  delay(2000);
  }
  else{
  if(FreqMeasure.read() >4194967295)
  Serial.println("PORTA FECHADA");
  delay(2000);
  }
}
```

Ação 3 - auxilie as equipes e faça a aplicação do código no Arduino.

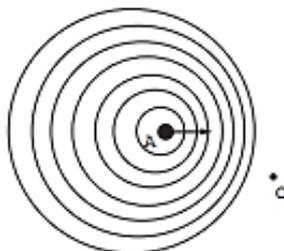
Apêndice L – Questionário final

Questionário Final – Efeito Doppler-Fizeau

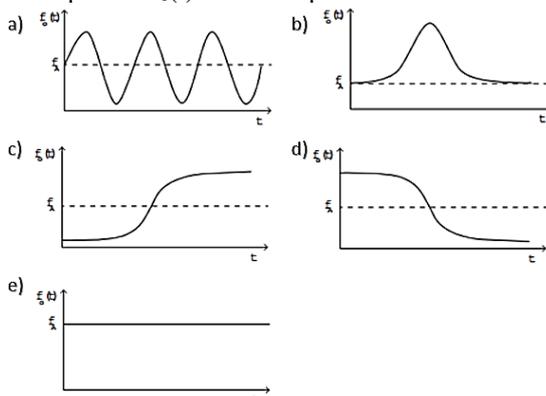
Aluno (a): _____

Turma: _____ Turno: _____

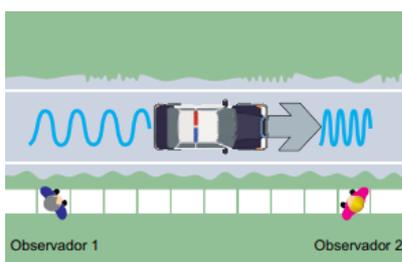
1. (ENEM 2016) Uma ambulância A em movimento retilíneo e uniforme aproxima-se de um observador O, em repouso. A sirene emite um som de frequência constante f_a . O desenho ilustra as frentes de onda do som emitido pela ambulância. O observador possui um detector que consegue registrar, no esboço de um gráfico, a frequência da onda sonora detectada em função do tempo $f_o(t)$, antes e depois da passagem da ambulância por ele.



Qual esboço gráfico representa a frequência $f_o(t)$ detectada pelo observador?



2. (UEA-Específico Exatas 2017) Um carro de polícia desloca-se no sentido indicado na figura por uma rua retilínea, com a sirene ligada. Parados na calçada, dois observadores, 1 e 2, veem a passagem do carro, conforme mostra a figura.



(<http://papofisico.tumblr.com>. Adaptado.)

É correto afirmar que o som da sirene percebido:

- pelo observador 1 é mais agudo do que o som percebido pelo observador 2.
- pelo motorista do carro e pelos observadores 1 e 2 têm mesma altura.
- pelo observador 1 é mais agudo do que o som percebido pelo motorista do carro.
- pelo observador 2 tem a mesma frequência do som percebido pelo observador 1.
- pelo observador 2 tem frequência maior do que a do som percebido pelo motorista do carro.

3. (UEA-Específico Exatas 2016) Uma pessoa em repouso vê um automóvel vindo em sua direção quando o motorista aciona a buzina. A onda sonora que chega à pessoa tem:

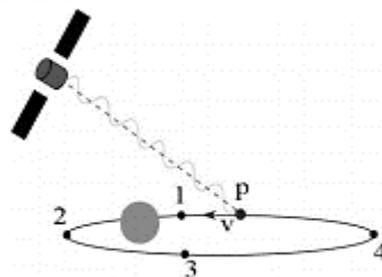
- velocidade maior que a velocidade da onda emitida pela buzina.
- frequência igual à frequência da onda emitida pela buzina.
- frequência maior que a frequência da onda emitida pela buzina.
- período maior que o período da onda emitida pela buzina.
- período igual ao período da onda emitida pela buzina.

4. (UEA-Específico Exatas 2020) Admite-se, desde a década de 20 do século passado, que o Universo está em expansão. Isso pode ser constatado com o auxílio de uma técnica chamada espectrometria óptica, na qual um aparelho, chamado de espectrômetro óptico, detecta e analisa a luz proveniente de uma fonte luminosa. Ao analisar a luz proveniente das galáxias, estejam elas em qualquer direção em relação ao equipamento, observa-se que as emissões luminosas apresentam desvios nos valores de comprimentos de onda, sempre de maneira a aumentar o valor original do comprimento de onda da luz emitida pela galáxia.

Considerando a velocidade da luz constante em todas as direções, tais observações são possíveis devido a um fenômeno, que ocorre no espaço, conhecido como

a) efeito Doppler. b) espalhamento. c) refração. d) difração. e) dispersão.

5. (UnB 2º Dia 2019) A figura a seguir ilustra a situação em que um satélite recebe luz de um corpo que se move com velocidade v , em uma órbita elíptica e no sentido anti-horário, em torno de uma estrela. Os pontos de 1 até 4 indicam posições do corpo ao longo da órbita.



Nessa situação, a maior redução do comprimento de onda da luz detectada pelo satélite ocorrerá quando o corpo estiver se deslocando entre as posições:

a) 1 e 2. b) 2 e 3. c) 3 e 4. d) 4 e 1.

6. (UPF Inverno 2015) Em certas observações astronômicas, os cientistas encontram situações nas quais é possível detectar o Efeito Doppler com a luz. Nessas situações, a percepção de que a cor da luz emitida por certa estrela parece ser mais avermelhada do que realmente é significa que:

- a) a estrela está muito distante da Terra.
- b) a estrela está se afastando da Terra.
- c) a luz sofre refração na atmosfera.
- d) a luz se propaga com velocidade muito grande no vácuo.
- e) a estrela está se aproximando da Terra.