

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 43

CARLOS HENRIQUE DE ABREU MACIEL

**FLUTUAÇÕES DO VÁCUO QUÂNTICO NO ENSINO MÉDIO: UMA SEQUÊNCIA
DIDÁTICA COM ANÁLOGO HIDRODINÂMICO DO EFEITO CASIMIR**

FORTALEZA
2025

CARLOS HENRIQUE DE ABREU MACIEL

FLUTUAÇÕES DO VÁCUO QUÂNTICO NO ENSINO MÉDIO: UMA SEQUÊNCIA
DIDÁTICA COM ANÁLOGO HIDRODINÂMICO DO EFEITO CASIMIR

Dissertação apresentada ao Polo 43 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física Moderna e Contemporânea.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Wellysson de Alencar Sobreira.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M138f Maciel, Carlos Henrique de Abreu Maciel.

Flutuações do vácuo quântico no ensino médio : uma sequência didática com análogo hidrodinâmico
do efeito Casimir / Carlos Henrique de Abreu Maciel Maciel. – 2025.

254 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação,
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Fernando Wellysson de Alencar Sobreira.

1. ensino de física. 2. mecânica quântica. 3. efeito Casimir. 4. flutuações do vácuo. 5. sequência didática.
I. Título.

CDD 530.07

CARLOS HENRIQUE DE ABREU MACIEL

FLUTUAÇÕES DO VÁCUO QUÂNTICO NO ENSINO MÉDIO: UMA SEQUÊNCIA
DIDÁTICA COM ANÁLOGO HIDRODINÂMICO DO EFEITO CASIMIR

Dissertação apresentada ao Polo 43 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física Moderna e Contemporânea.

Aprovada em: 17/10/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Wellysson de Alencar Sobreira (Orientador)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Afrânio de Araújo Coelho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Maria Luiza Miguez
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

À Roberta Reis, minha companheira de jornada,
e ao nosso filho Téo Reis, cuja presença e apoio
foram fundamentais para a realização deste
trabalho. Amo vocês dois.

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais, Dona Socorro e Senhor Carlos — meus maiores professores —, e à minha irmã, Marfisa Castro, referência em minha trajetória.

Ao Prof. Dr. Fernando Wellysson de Alencar Sobreira, pela orientação rigorosa e comprometida, pelos desafios propostos na disciplina de Mecânica Quântica, que deram ensejo à elaboração desta pesquisa e por acreditar no potencial do produto educacional, acompanhando de perto sua concepção e desenvolvimento.

Aos professores que compuseram a banca examinadora, Prof. Dr. Afrânio de Araújo Coelho e Profa. Dra. Maria Luiza Miguez, pela leitura criteriosa, pelo tempo dedicado e pelas valiosas contribuições e sugestões, que enriqueceram a versão final deste trabalho.

Aos professores do MNPEF, Polo 43, que acompanharam a turma de 2023.1, pela formação sólida, pela disponibilidade e pelas oportunidades de diálogo que sustentaram minha trajetória acadêmica ao longo do curso.

Aos colegas da turma de mestrado de 2023.1, pelas discussões proveitosas sobre o Ensino de Física, pelas experiências compartilhadas, pela parceria nas atividades e pelo apoio mútuo em todos os encontros.

Aos amigos Prof. Me. Breno Aragão e Prof. Me. Douglas Menezes, pela convivência acadêmica e profissional que a docência e a ciência nos proporcionaram.

A todos os que foram meus alunos, cuja presença esteve lembrada em cada linha escrita deste trabalho. Suas perguntas, desafios e conquistas deram sentido ao percurso aqui registrado.

“Era claro.
Espelho d'água.
Perfeição que a pedra destruiu.
Uma onda.
Mais uma onda.
Outras ondas e já não tem fim [...]”
(Humberto Gessinger e Melissa Mattos. 2007,
faixa 12).

RESUMO

A área do ensino de Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica apresenta lacunas significativas no currículo escolar, que historicamente negligenciam tópicos relevantes para a formação de um pensamento científico atualizado. Nesta perspectiva, esta dissertação investiga a viabilidade pedagógica de uma sequência didática para o ensino de tópicos introdutórios de Mecânica Quântica, culminando na construção e uso de um modelo didático análogo do efeito Casimir com ondas de água, articulado às competências da BNCC. A abordagem metodológica combina uma revisão bibliográfica sistemática conduzida segundo a Declaração PRISMA, com foco em produtos educacionais para Mecânica Quântica (2018–2024), e uma pesquisa intervenciva realizada em escola pública estadual com turma da modalidade EJA. O referencial pedagógico apoia-se na aprendizagem significativa de Ausubel e no ensino por analogias. A sequência foi planejada para oito aulas, organizando avaliação diagnóstica, sensibilização e três sessões experimentais. A coleta de dados, de natureza predominantemente qualitativa, abrangeu questionário diagnóstico, produções escritas dos alunos, observações de aula e registros fotográficos ao longo de toda a intervenção. Os resultados indicam avanços conceituais consistentes pelos alunos. A proposta mostrou-se exequível, acessível e aderente às competências de Ciências da Natureza previstas na BNCC, favorecendo participação, investigação e comunicação de resultados. As limitações concentraram-se no repertório matemático (frações, proporções, leitura de gráficos) e na baixa frequência típica da EJA, circunscrevendo a generalização dos achados. Conclui-se que houve aprendizagem conceitual relevante, engajamento em práticas científicas e demonstração de viabilidade do produto educacional para inserir, de modo responsável, conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio.

Palavras-chave: ensino de física; mecânica quântica; efeito Casimir; flutuações do vácuo; sequência didática.

ABSTRACT

The area of teaching Modern and Contemporary Physics in Basic Education presents significant gaps in the school curriculum, which historically neglect relevant topics for the formation of an updated scientific mindset. In this perspective, this dissertation investigates the pedagogical feasibility of a didactic sequence for teaching introductory topics in Quantum Mechanics, culminating in the construction and use of a didactic analog model of the Casimir effect with water waves, articulated with the competencies of the BNCC (Brazilian National Common Curricular Base). The methodological approach combines a systematic literature review, conducted according to the PRISMA Statement, with a focus on educational products for Quantum Mechanics (2018–2024), and an intervention research carried out in a state public school with a Youth and Adult Education (EJA) class. The pedagogical framework is based on Ausubel's theory of meaningful learning and on teaching by analogies. The sequence was planned for eight classes, organizing a diagnostic assessment, sensitization, and three experimental sessions. The data collection, predominantly qualitative in nature, included a diagnostic questionnaire, students' written productions, classroom observations, and photographic records throughout the entire intervention. The results indicate consistent conceptual advancements by the students. The proposal proved to be feasible, accessible, and aligned with the Natural Sciences competencies foreseen in the BNCC, promoting participation, investigation, and communication of results. The limitations were concentrated on the mathematical proficiency (fractions, proportions, reading graphs) and the low attendance typical of the EJA modality, circumscribing the generalization of the findings. It is concluded that there was relevant conceptual learning, engagement in scientific practices, and a demonstration of the viability of the educational product to responsibly introduce Modern Physics content into High School.

Keywords: physics education; quantum mechanics; Casimir effect; vacuum fluctuations; teaching sequence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Posicionamento do bloco em um sistema massa-mola na posição $x=a$	44
Figura 2 – Ciclo de oscilação do sistema massa mola (sistema conservativo).....	46
Figura 3 – Força aplicada puxando uma mola para direita até $x=a$	48
Figura 4 – Campo eletromagnético gerado devido a oscilação de um elétron.	61
Figura 5 – Espectro eletromagnético e sua interação com a atmosfera terrestre.	62
Figura 6 – Representação do Efeito Casimir.....	64
Figura 7 – Cavidade retangular.	64
Figura 8 – Alunos realizando a avaliação diagnóstica em formato digital no laboratório de informática.	83
Figura 9 – Alunos registrando as medições do experimento com o pêndulo simples.	92
Figura 10 – Dados coletados pela primeira equipe durante o experimento com o pêndulo simples.	93
Figura 11 – Dados coletados pela segunda equipe durante o experimento com o pêndulo simples.	93
Figura 12 – Dados coletados pela terceira equipe durante o experimento com o pêndulo simples.	93
Figura 13 – Experimento do diapasão com a caixa de ressonância.	95
Figura 14 – Equipes discutindo sobre o experimento do diapasão com a caixa de ressonância.	95
Figura 15 - Resposta da primeira equipe sobre a percepção da vibração do diapasão nas duas situações propostas.....	96
Figura 16 – Resposta da primeira equipe sobre a intensidade sonora do diapasão nas duas situações propostas.....	96
Figura 17 – Resposta da segunda equipe sobre a intensidade sonora do diapasão nas duas situações propostas.....	96
Figura 18 – Equipes discutindo sobre o experimento do plano inclinado como analogia do princípio da incerteza de Heisenberg.	98
Figura 19 – Medição do tempo na posição 80 cm do plano inclinado realizadas pelas equipes.	99

Figura 20 – Alunos dispostos ao redor do Modelo Didático Análogo do Efeito Casimir (MDA-EC).....	100
Figura 21 – Alunos observando e registrando medições no MDA-EC, durante atividade investigativa sobre ondas e aproximação de placas.....	101
Figura 22 – Respostas da equipe 1 referentes as observações feitas do MDA-EC.	101
Figura 23 – Respostas da equipe 2 referentes as observações feitas do MDA-EC.	102
Figura 24 – Respostas da equipe 3 referentes as observações feitas do MDA-EC.	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico da distribuição das Energias Cinética, Potencial e Mecânica no Oscilador Harmônico Simples.	50
Gráfico 2 – Respostas à 1 ^a questão da avaliação diagnóstica.	83
Gráfico 3 – Respostas à 2 ^a questão da avaliação diagnóstica.	84
Gráfico 4 – Respostas a 3 ^a Questão: Quais dessas situações envolvem a ideia de energia?	85
Gráfico 5 – Respostas a 3 ^a Questão: Em quais delas há transformação de energia?	86
Gráfico 6 – Respostas a 3 ^a Questão: Quais ou qual situação na lista que não apresenta transformação de energia no momento descrito?	87
Gráfico 7 – Respostas aos itens da 4 ^a Questão da avaliação diagnóstica.	88
Gráfico 8 – Respostas aos itens da 5 ^a Questão da avaliação diagnóstica.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos acadêmicos selecionados para a revisão bibliográfica, organizados cronologicamente por título, autor, ano e fonte da informação.	22
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BNCC Base Nacional Curricular Comum.
- EJA Educação de Jovens e Adultos.
- MDA-EC Modelo Didático Análogo do Efeito Casimir (ondas de água).
- MHS Movimento Harmônico Simples.
- MNPEF Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.
- PRISMA Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Contextualização e relevância.....	14
1.2	Problema de pesquisa	15
1.3	Objetivos da pesquisa	16
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	17
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	19
2.1	Ensino de Mecânica Quântica através de Produtos Didáticos	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO PEDAGÓGICO.....	27
3.1	David Ausubel e a aprendizagem significativa	27
3.1.1	<i>Breve histórico sobre David Ausubel</i>	27
3.1.2	<i>Conceitos fundamentais da teoria ausubeliana</i>	29
3.2	Aprendizagem significativa no ensino de Física.....	30
3.3	Ensino por analogias no contexto do ensino de Física	32
3.3.1	<i>Fundamentação conceitual das analogias no ensino</i>	33
3.3.2	<i>Aspectos metodológicos do ensino de Física por analogias</i>	35
3.3.3	<i>O ensino de Física moderna e Contemporânea por analogias</i>	36
3.3.4	<i>Ensino por analogias e a Base Nacional Comum Curricular (BNCC).....</i>	38
4	O EFEITO CASIMIR E AS FLUTUAÇÕES DO VÁCUO QUÂNTICO	40
4.1	Contextualização histórica e importância do Efeito Casimir	40
4.2	Fundamentação Física Clássica e Pré-Quântica.....	41
4.2.1	<i>Oscilações.....</i>	41
4.3	O vácuo eletromagnético	51
4.3.1	<i>O Oscilador Harmônico Quântico</i>	52
4.3.2	<i>Ondas eletromagnéticas.....</i>	59
4.3.3	<i>Campo eletromagnético clássico</i>	61
4.3.4	<i>Campo eletromagnético quântico.....</i>	63
4.4	O Efeito Casimir	63
5	METODOLOGIA.....	70
5.1	O Produto Educacional	70
5.2	Caracterização da pesquisa	71
5.3	Estrutura do produto educacional	72

5.4	Sequência didática	74
5.5	Método de implementação do produto educacional	75
5.6	Procedimento de coleta de dados.....	76
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6.1	Contexto da implementação do produto educacional	78
6.2	Avaliação diagnóstica	82
6.3	Implementação do produto educacional.....	90
6.3.1	<i>Sessão introdutória de sensibilização: Lei de Moore: a miniaturização dos transistores</i>	<i>90</i>
6.3.2	<i>Sessão de Experimentação 1 – Vibrações e Osciladores: conceitos fundamentais e propagação de ondas</i>	<i>92</i>
6.3.3	<i>Sessão de Experimentação 2 – O Princípio da Incerteza de Heisenberg: Analogias com um plano Inclinado.....</i>	<i>97</i>
6.3.4	<i>Sessão de Experimentação 3 – Análogo do Efeito Casimir: Ondas de Água e força de radiação</i>	<i>100</i>
6.3.5	<i>Avaliação discente do produto educacional.....</i>	<i>104</i>
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
	REFERÊNCIAS.....	109
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DIAGNÓSTICO APLICADO ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	115
	APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL - CONEXÕES QUÂNTICAS: VIBRAÇÕES, ONDAS E EFEITO CASIMIR	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e relevância

Esta pesquisa concentra-se na concepção e análise de uma proposta didática de Mecânica Quântica na Educação Básica, ressaltada pela relevância do assunto diante dos avanços científicos contemporâneos. A abordagem desses tópicos exige uma capacidade de abstração elevada, indispensável para a apreensão dos fenômenos que, em muitos aspectos, desafiam as concepções tradicionais derivadas da Física Clássica.

Santos e Reis (2013, p. 6), afirmam que a compreensão de fenômenos quânticos na Educação Básica envolve elevada mobilização cognitiva e, por isso, requer que o professor atue como um mediador fornecendo orientações mínimas, claras e sistematizadas que favoreçam a elaboração de modelos mentais adequados. Assim, além de estimular a capacidade de abstração e o pensamento crítico, torna-se imprescindível oferecer suporte pedagógico que oriente o processo de internalização dos conceitos de Mecânica Quântica a serem abordados nas aulas.

Esse direcionamento pode ser realizado por meio de estratégias didáticas específicas que integrem metodologia, experimentação e recurso didático manipulável, fomentando um trânsito progressivo no qual os alunos partem das concepções da Física Clássica, a partir da análise de fenômenos análogos, até a internalização dos conceitos abstratos e probabilísticos característicos da Mecânica Quântica. Essa orientação mínima, ainda que sutil, é importante para facilitar a compreensão de tópicos quânticos e promover uma aprendizagem significativa, sem inibir o potencial de desenvolvimento da capacidade cognitiva dos alunos.

Nessa perspectiva, defende-se uma abordagem que ultrapasse o mero repasse de conteúdos e promova o desenvolvimento de competências de abstração e pensamento crítico. A proposta delimita-se na introdução de tópicos fundamentais da Mecânica Quântica no contexto da Educação Básica, com ênfase na compreensão das flutuações quânticas no vácuo. Esse tema específico não apenas ilustra os aspectos probabilísticos e a natureza intrinsecamente dinâmica dos sistemas quânticos, mas também evidencia, de maneira contundente, a ruptura com os paradigmas clássicos. O enfoque reside em despertar nos alunos capacidade de formular modelos mentais que contemplam a natureza quântica das partículas e os fenômenos associados às flutuações do vácuo.

A abordagem pedagógica aqui proposta visa não apenas a compreensão dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, como a quantização da energia e o princípio da

incerteza, mas também a internalização de uma nova maneira de perceber a realidade física. Ao promover o desenvolvimento da abstração, o ensino pretende proporcionar aos alunos as ferramentas cognitivas necessárias para interpretar e discutir as implicações dos avanços científicos contemporâneos, materializados em tecnologias como o laser, baseado na emissão estimulada, os transistores, essenciais à eletrônica moderna e fundamentados na teoria de bandas, e os exames de ressonância magnética nuclear, dependentes do *spin* quântico. Evidencia-se, assim, a importância dos conceitos quânticos para a compreensão do mundo moderno. Neste contexto, mesmo noções avançadas, como as flutuações quânticas no vácuo, demonstram sua relevância prática ao fundamentarem o Efeito Casimir, uma força macroscópica de origem puramente quântica, cuja compreensão é crucial para o desenvolvimento da nanotecnologia e de sistemas microeletromecânicos (MEMS), onde forças de adesão em nanoescala tornam-se dominantes. Dessa forma, delimita-se o tema no estudo das estratégias e recursos didáticos que possibilitem essa transição epistemológica, a partir da integração de metodologias, o manuseio de recursos concretos, físicos, e a experimentação, elementos essenciais para uma aprendizagem significativa em níveis iniciais de ensino.

O texto estrutura-se da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta a introdução, com contextualização, problema e objetivos; o Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica sistemática sobre ensino de Mecânica Quântica via produtos didáticos com ênfase nas produções realizadas no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF); o Capítulo 3 desenvolve o referencial teórico pedagógico (aprendizagem significativa e ensino por analogias); o Capítulo 4 discute fundamentos físicos clássicos e quânticos, situando historicamente o Efeito Casimir; o Capítulo 5 descreve a metodologia e o produto educacional (sequência didática, manuais e guia de montagem do modelo análogo); e o Capítulo 6 apresenta resultados e discussões, com análise da implementação em contexto escolar e o Capítulo 7 sobre as considerações sobre potencialidades e limites da proposta. Em particular, a sequência didática é planejada para oito aulas (diagnóstico, sensibilização e três sessões experimentais em duas aulas cada), com perguntas norteadoras e momentos de análise e discussão.

1.2 Problema de pesquisa

Socialmente, iniciativas que democratizam o acesso a saberes científicos de fronteira no Ensino Médio contribuem para a formação crítica, a compreensão pública da ciência e a redução de desigualdades educacionais. No âmbito acadêmico, o trabalho alinha-se às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que incentiva a inovação

pedagógica e o desenvolvimento de materiais didáticos e pesquisas voltados às competências e práticas de estudo na Educação Básica. Dessa forma, o projeto dialoga diretamente com as habilidades de investigação, seleção crítica de informações e divulgação do conhecimento científico, reforçando sua pertinência curricular.

A transição conceitual do Ensino Médio entre os domínios da Física Clássica e os fundamentos da Mecânica Quântica representa um dos grandes desafios no ensino de Física Moderna e Contemporânea. A dificuldade em estabelecer conexões significativas entre conceitos aparentemente incompatíveis, como trajetórias deterministas e estados probabilísticos, exige a elaboração de estratégias pedagógicas inovadoras, que favoreçam a compreensão profunda e contextualizada desses conteúdos. Neste contexto, propõe-se investigar em que medida uma proposta pedagógica estruturada, baseada na utilização de analogias clássicas e atividades experimentais, pode contribuir para uma aprendizagem significativa de conceitos da Mecânica Quântica. Em especial, destaca-se o uso de um modelo hidrodinâmico do efeito Casimir, que atua como aparato experimental didático e recurso manipulável, destinado a mediar a compreensão de fenômenos de natureza quântica por meio de representações acessíveis¹ e atividades experimentais orientadas.

Conforme apontam Lakatos e Marconi (2003, p. 220), “a formulação do problema prende-se ao tema proposto: ela esclarece a dificuldade específica com a qual se defronta e que se pretende resolver por intermédio da pesquisa”. Assim, este estudo investiga em que medida uma proposta pedagógica estruturada, que emprega analogias clássicas e atividades experimentais, é capaz de promover uma aprendizagem significativa, respondendo diretamente ao desafio da transição conceitual da Física Clássica para a Mecânica Quântica, no contexto do Ensino Médio.

1.3 Objetivos da pesquisa

A motivação emerge do exercício docente em escola pública estadual na Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará, onde o professor-pesquisador, na sua prática docente, vivencia desafios socioeconômicos e de infraestrutura que impactam a realização de práticas experimentais em Ciências. Essa experiência concreta reforça a necessidade de soluções acessíveis, replicáveis e pedagogicamente sólidas, capazes de aproximar os estudantes de

¹ Neste estudo, “representações acessíveis” referem-se a analogias clássicas passíveis de replicação em contexto escolar, de fácil obtenção e baixa complexidade de montagem, procedimentos de execução simples e manipulação direta pelos estudantes.

fenômenos contemporâneos por meio de analogias experimentais. Soma-se a isso ao princípio que a escola é o primeiro local a divulgação do que está sendo feito na Ciência contemporânea e a lacuna identificada na literatura quanto a práticas experimentais em Mecânica Quântica no Ensino Médio, a qual orienta a construção do Modelo Didático Análogo do Efeito Casimir (ondas de água) (MDA-EC) e dos materiais de apoio (manual para o professor – sequência didática, caderno para o aluno e o manual de fabricação do MDA-EC) que compõem o produto educacional desta pesquisa.

1.3.1 Objetivo geral

Investigar o impacto pedagógico de uma proposta didática estruturada, composta por uma sequência didática baseada em analogias clássicas, atividades experimentais e material de leitura complementar específico, com destaque para o MDA-EC, sob a luz da aprendizagem significativa e da transição epistemológica dos estudantes do Ensino Médio, dos conceitos da Física Clássica para os da Mecânica Quântica.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos, enquanto desdobramentos operacionais do objetivo geral, foram elaborados de forma a orientar um desenvolvimento sistemático da investigação, visando explicitar o escopo e os procedimentos do estudo; cumprem função instrumental ao tornar viáveis metas coerentes com a problemática e com o percurso metodológico adotado (Lakatos e Marconi, 2003, p. 219). No presente trabalho, com ênfase no MDA-EC, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) realizar uma revisão bibliográfica sistemática, segundo diretrizes PRISMA, sobre produtos educacionais aplicados ao ensino de Mecânica Quântica na Educação Básica;
- b) projetar e construir um aparato experimental didático que implemente o análogo hidrodinâmico do efeito Casimir (ondas de água);
- c) elaborar um guia de fabricação do modelo didático análogo do efeito Casimir (MDA-EC), contemplando lista de materiais, procedimento de montagem, critérios de segurança e requisitos de operação;
- d) elaborar um manual do professor contendo uma sequência didática articulada ao uso do MDA-EC, com objetivos de aprendizagem;

- e) elaborar um caderno do aluno com conteúdo escalonado e atividades de consolidação sobre flutuações quânticas no vácuo e conceitos correlatos;
- f) elaborar um caderno do aluno com conteúdo escalonado e atividades de consolidação sobre flutuações quânticas no vácuo e conceitos correlatos;
- g) avaliar a implementação por meio de questionário diagnóstico, produções escritas, observações de aula, analisando aprendizagens, engajamento, limitações e possibilidades de aperfeiçoamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

2.1 Ensino de Mecânica Quântica através de Produtos Didáticos

A presente revisão bibliográfica sistemática foi elaborada em conformidade com as diretrizes de relatório da Declaração PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* [Itens Preferenciais para Relatos de Revisões Sistemáticas e Metanálises]), as quais têm como finalidade promover transparência e rigor metodológico ao explicitar claramente as razões que motivaram a realização da revisão, os métodos empregados e os principais achados encontrados (Page *et al.*, 2022, p. 56). Embora originalmente desenvolvidas para orientar revisões sistemáticas que avaliam os efeitos de intervenções, as diretrizes PRISMA contam com diversas extensões que também fornecem orientações específicas para diferentes tipos e aspectos de sínteses de evidências, como é o caso da presente revisão.

Nesse contexto, entende-se por revisão sistemática “uma revisão que usa métodos explícitos e sistemáticos para agrupar e sintetizar os resultados dos estudos que abordam uma questão claramente formulada” (Page *et al.*, 2022, p. 4).

O objetivo desta revisão sistemática é identificar e analisar artigos, dissertações e teses com produtos educacionais voltados ao ensino de Mecânica Quântica na Educação Básica, produzidas no Brasil entre 2018 e 2024. Pretende-se investigar as estratégias pedagógicas, metodologias didáticas e recursos educacionais empregados por pesquisadores para promover a construção significativa de conhecimentos relacionados ao ensino da Mecânica Quântica.

Para orientar a investigação, foram definidas as seguintes questões norteadoras:

- Quais estratégias pedagógicas têm sido propostas nas dissertações e teses para a abordagem da Mecânica Quântica no Ensino Médio?
- Quais metodologias didáticas predominam na produção acadêmica recente e como têm sido implementadas no contexto escolar?
- Quais tipos de recursos e produtos educacionais são mais frequentemente desenvolvidos e validados para apoiar o ensino e a aprendizagem da Mecânica Quântica?
- Quais desafios conceituais, didáticos e epistemológicos permanecem evidentes na literatura científica acerca do ensino da Mecânica Quântica para estudantes da Educação Básica?

Essas questões fornecem uma estrutura clara e sistemática para guiar a análise crítica da literatura selecionada, permitindo compreender avanços, identificar limitações e sugerir caminhos futuros para a pesquisa em Ensino de Física.

A justificativa desta revisão sistemática baseia-se no reconhecimento de que o ensino da Mecânica Quântica não apenas configura um campo de pesquisa em expansão no ensino de Física, mas também requer que docentes estejam atualizados quanto aos avanços científicos recentes para enfrentar e superar as dificuldades conceituais e epistemológicas inerentes a essa teoria (Ostermann; Moreira, 2000, p. 24; Carvalho; Gil-Pérez, 2011, p. 25). No âmbito da Educação Básica, abordar a Mecânica Quântica implica não só em adaptar conteúdos científicos ao nível de compreensão dos estudantes, mas também implementar estratégias pedagógicas que promovam a construção significativa do conhecimento, alicerçadas nos pressupostos da aprendizagem significativa de Ausubel (Moreira, 1999, p. 151).

Nesse sentido, é relevante compreender como diferentes autores têm tratado essa temática nas pesquisas acadêmicas desenvolvidas, identificando os recursos didáticos empregados, as metodologias desenvolvidas e os desafios que ainda persistem no cenário acadêmico. Tal análise sistemática permitirá mapear lacunas, reconhecer avanços pedagógicos e epistemológicos e subsidiar futuras intervenções educacionais voltadas à melhoria do processo de ensino e aprendizagem em Física no Ensino Médio.

Para compor esta revisão, foram definidos critérios claros e objetivos de inclusão e exclusão dos estudos. A busca concentrou-se em dissertações, teses e artigos produzidos no contexto acadêmico brasileiro, que apresentassem simultaneamente produtos educacionais vinculados à abordagem da Mecânica Quântica na Educação Básica. A revisão priorizou repositórios acadêmicos validados por bancas de programas de pós-graduação stricto sensu e bases de dados reconhecidas nacional e internacionalmente pelo acesso a periódicos científicos revisados por pares e disponíveis com recorte temporal de sete anos.

Após a seleção inicial, os estudos incluídos foram agrupados para fins de sumarização conforme as categorias temáticas previamente estabelecidas nesta revisão, sendo elas: estratégias pedagógicas utilizadas, metodologias didáticas aplicadas, recursos educacionais propostos e desafios epistemológicos ainda persistentes no ensino de Mecânica Quântica para o Ensino Médio.

As fontes de informação consultadas para identificar os estudos foram: Catálogo de

Teses e Dissertações da CAPES², Portal de Periódicos da CAPES³ e Repositório Institucional UFC⁴. A última pesquisa em cada uma dessas bases foi realizada em 25 de março de 2025, contemplando a busca de artigos, dissertações e teses pertinentes ao objeto de estudo e garantindo a rastreabilidade dos registros consultados para a elaboração desta revisão sistemática.

Na base Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, empregou-se uma estratégia de busca com operadores booleanos para abranger dissertações e teses relacionadas ao ensino de Física por meio de produtos educacionais, limitando-se especificamente a trabalhos que abordassem o assunto de Mecânica Quântica. Adotou-se o operador booleano: 'Ensino de Física' AND 'Produto Educacional' AND 'Quântica', garantindo a recuperação precisa dos documentos cujo foco estivesse diretamente relacionado à temática investigada, com a devida eliminação de conteúdos não pertinentes à proposta desta revisão.

No Portal de Periódicos da CAPES, a fim de obter os trabalhos que discutissem enfoques similares, adotou-se o operador booleano: ('Ensino de Física' AND 'Produto Educacional' AND ('Quântica' OR 'Física Contemporânea')) NOT 'Relatividade', com o intuito de ampliar o escopo para conteúdos relacionados à Quântica e Física Contemporânea, excluindo explicitamente temas relacionados à Relatividade.

O Repositório Institucional UFC, empregou-se uma estratégia de busca fundamentada também em operadores booleanos para combinar palavras-chave em diferentes formatos, de modo a abranger estudos que abordem “quântica” ou “física moderna” (excluindo “relatividade”) ou ainda “física contemporânea”, restringindo-se, ao mesmo tempo, a documentos que apresentem obrigatoriamente as expressões “ensino de física” e “produto educacional” em qualquer campo. A estratégia adotada foi: ('Quântica' OR ('Física Moderna' NOT 'Relatividade') OR 'Física Contemporânea') AND 'Ensino de Física' AND 'Produto Educacional'.

Ressalta-se que, em todas as bases mencionadas, as pesquisas foram realizadas com um recorte temporal de 2018 a 2024⁵, assegurando maior atualidade e relevância dos trabalhos identificados.

² CAPES. **Catálogo de Teses e Dissertações**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://catalogodeteses.capes.gov.br/>. Acesso em: 28 set. 2025.

³ CAPES. **Portal de Periódicos da Capes**. [S. l.]: CAPES, 2024. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 14 set. 2025.

⁴ UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Repositório Institucional da UFC**. Fortaleza, [s. d.]. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/>. Acesso em: 14 set. 2025.

⁵ Empregou-se a expressão [2018 TO 2024] em cada uma das consultas realizadas, de modo a delimitar um intervalo fechado de tempo que abrange restritamente os anos de 2018 e 2024.

Os registros recuperados nas bases de dados foram exportados para uma planilha eletrônica, na qual aplicaram-se sistematicamente os critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos para seleção definitiva dos estudos. Foram incluídos estudos que abordassem explicitamente: (i) desenvolvimento e aplicação de estratégias pedagógicas e metodológicas para o ensino de Mecânica Quântica; (ii) produção e avaliação de materiais didáticos voltados à Educação Básica; e (iii) produtos educacionais desenvolvidos para uso em contexto escolar. Foram excluídos trabalhos que não disponibilizassem o produto educacional associado ou não apresentassem claramente sua aplicação no Ensino Médio; que tratassem exclusivamente de conteúdos teóricos avançados sem adaptação pedagógica ao nível educacional pretendido; que estivessem fora do recorte temporal estabelecido; que não possuíssem acesso aberto integral; que não tivessem divulgação autorizada; ou cujo documento do trabalho não estivesse corretamente hospedado nos repositórios.

Outro critério, a seleção por palavras-chave, elemento estratégico para otimização da busca e indexação segundo Ercan e Cicekli (2007, p. 1), foi aplicado de modo diferenciado em cada base: no Catálogo de Dissertações e Teses da CAPES, foram considerados apenas os trabalhos cujas palavras-chave continham exatamente a expressão “Quântica”, a fim de reduzir o volume de resultados; no Repositório Institucional da UFC, adotaram-se critérios mais abrangentes, incluindo termos relacionados à temática de Mecânica Quântica para capturar todas as variações pertinentes à pesquisa como “Física Contemporânea” e “Física Moderna”.

Tabela 1 – Trabalhos acadêmicos selecionados para a revisão bibliográfica, organizados cronologicamente por título, autor, ano e fonte da informação.

Autor	Título	Ano	Fonte das informações
OLIVEIRA, Larissa de Sousa	Investigando o grande mundo das pequenas partículas: uma proposta para ensinar física de partículas no ensino médio	2024	Repositório Institucional UFC
MIGUEZ, Maria Luiza	Estratégias didáticas para ensino de física moderna usando leds	2024	Repositório Institucional UFC
SILVA, Joao Marcos Costa	Transposição didática da computação quântica: estados emaranhados e teleporte quântico	2023	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
PINTO, Rogerio Goncalves	Proposta de uso de animação para discussão da transição da mecânica clássica para a mecânica quântica	2023	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes

Continua

Tabela 1 (continuação)

Autor	Título	Ano	Fonte das informações
GOMES, André Luiz Sartori	Homem-Formiga e fantasma no ensino de mecânica quântica: produção e análise de produto educacional potencialmente significativo	2023	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
CARREIRO, Alex Kevyn dos Anjos	Ensino de Computação Quântica na Nuvem	2022	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
ALMEIDA, Flaviane da Silva	Sequência de ensino aprendizagem para ensinar os postulados da mecânica quântica no ensino médio	2022	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
CABRAL, Rayanna Correa	Energia elétrica sustentável e mecânica quântica: uma proposta didática para o ensino médio com o uso da aprendizagem baseada em projetos e enfoque STEAM	2022	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
PERES, Marcus Vinicius; LENZ, Jorge; JR, Arandi Ginane Bezerra; BORDIN, Giulio Domenico	A produção de um material utilizando o software Tracker para abordagem do experimento da difração de elétrons	2022	Portal de Periódicos da CAPES
RIBEIRO, Francisco Fabio de Sousa	Analise e as proposições quânticas: uma proposta pedagógica	2021	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
JUNIOR, Francisco Miranda Monteiro	A “borracha quântica” aplicada como atividade experimental no ensino da física quântica para alunos do ensino médio	2021	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes

continua

Tabela 1 (conclusão)

Autor	Título	Ano	Fonte das informações
CRUZ, Ubirajara Malaquias	Jogo Ludophysis para explorar o efeito fotoelétrico no ensino médio por meio de uma UEPS	2021	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
MARTINS, Sonia Rodrigues	Introdução de tópicos de mecânica quântica no ensino médio	2019	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
PEREIRA, Ana Marcia Lopes	A física quântica no ensino médio: o interferômetro de Mach-Zehnder no ensino da dualidade onda-partícula	2019	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
ANTONIO, Alan Pereira	Proposta de UEPS para inserção do conteúdo de física quântica através de uma atividade experimental	2019	Catálogo de Dissertações e Teses da Capes
SOUSA, Djalma Gomes	Implementação de experimentos de Física Moderna no ensino médio: desafios, dificuldades e discussões metodológicas, da concepção a construção do produto educacional	2018	Repositório Institucional UFC
ARAÚJO, Carlos Eduardo de Farias	Aplicação de jogos no ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma alternativa didática potencializando o aprendizado no ensino médio	2018	Repositório Institucional UFC

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 1 apresentada consiste em uma relação organizada cronologicamente dos trabalhos acadêmicos selecionados para compor a revisão bibliográfica desta pesquisa. Observa-se que, dos dezessete trabalhos mencionados, quinze são dissertações provenientes do

MNPEF, todas acompanhadas por produtos educacionais, fato que justifica sua seleção para este estudo, dada a relevância e aderência aos critérios previamente estabelecidos. Destacam-se como exceções o artigo intitulado “A produção de um material utilizando o software Tracker para abordagem do experimento da difração de elétrons”, publicado no Portal de Periódicos da CAPES em 2022 por Peres *et al.*, e a dissertação de Gomes (2023), intitulada “Homem-Formiga e fantasma no ensino de mecânica quântica: produção e análise de produto educacional potencialmente significativo”, também listada no Catálogo de Dissertações e Teses da CAPES. Tais exceções foram incluídas devido à singularidade de seus produtos educacionais e à contribuição significativa que oferecem ao tema investigado.

O ensino de Mecânica Quântica no Ensino Médio, tema amplamente discutido nas dissertações presentes no Catálogo de Dissertações e Teses da CAPES e no Repositório Institucional da UFC, bem como nos artigos do Portal de Periódicos da CAPES, apresenta-se como uma área que desafia continuamente docentes e pesquisadores devido à complexidade conceitual, didática e epistemológica envolvida. A análise dos trabalhos evidencia um conjunto diversificado de estratégias pedagógicas adotadas para abordar conceitos quânticos nesse nível de ensino.

Uma das estratégias predominantes observadas na literatura é o emprego de metodologias ativas e investigativas, como a sequência Predição-Observação-Explicação (POE) utilizada por Sousa (2018) no Repositório Institucional da UFC. Essa abordagem mostrou-se eficaz na introdução de conceitos fundamentais da Mecânica Quântica, como dualidade onda-partícula e quantização de energia, pois possibilita a experimentação acessível e promove aprendizagem significativa, conforme demonstrado pela análise comparativa antes e depois das intervenções educativas. No entanto, limitações também são apontadas, particularmente a restrição da profundidade teórica a experimentos básicos e a ausência de controles experimentais rigorosos, como grupos controle, que poderiam fortalecer a validação dos resultados.

Outra metodologia significativa encontrada no mesmo repositório é a Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), fundamentada na teoria de Ausubel, amplamente explorada em diferentes contextos. Oliveira (2024) exemplifica a aplicação desta metodologia ao utilizar atividades diversificadas como *quizzes* e *Master Classes* para estimular o pensamento crítico e o debate. Essa abordagem mostrou-se positiva para motivação e engajamento dos alunos, embora a ausência de exploração matemática avançada e dependência tecnológica tenham surgido como desafios concretos, limitando a aplicabilidade em contextos escolares com infraestrutura deficiente.

Além das estratégias pedagógicas, observou-se uma variabilidade considerável nos tipos de recursos e produtos educacionais desenvolvidos, como jogos didáticos, experimentos físicos e simulações digitais. Araújo (2018), também do Repositório Institucional da UFC, desenvolveu um jogo educativo denominado Quantopoly, que comprovou motivar significativamente os alunos, embora tenha enfrentado desafios logísticos de aplicação devido ao tempo necessário e à necessidade de infraestrutura básica. Já a proposta de Sousa (2018), com kits experimentais de baixo custo para efeito fotoelétrico e determinação da constante de Planck, mostrou-se altamente aplicável e replicável, com limitação relativa à necessidade de formação docente específica.

Contudo, uma carência identificada na literatura refere-se à ausência de uma abordagem mais aprofundada e amplamente disseminada para a utilização de práticas experimentais robustas em Mecânica Quântica. Embora existam iniciativas isoladas, como a proposta experimental de Pereira (2019), encontrada no Catálogo de Dissertações e Teses da CAPES, com o Interferômetro de Mach-Zehnder, persiste uma lacuna significativa nesse tipo de produto educacional, provavelmente pela dificuldade logística e a falta de infraestrutura adequada nas escolas públicas brasileiras.

Epistemologicamente, a discussão dos trabalhos evidencia um desafio constante: como tratar conceitos abstratos e matematicamente complexos sem incorrer em simplificações excessivas que prejudiquem a compreensão conceitual. Isso tem levado os pesquisadores a adotarem uma perspectiva predominantemente qualitativa e conceitual, evitando formalismos matemáticos avançados que poderiam ser um obstáculo à aprendizagem em nível médio.

O teórico educacional mais citado nessas pesquisas é David Ausubel, cuja teoria da Aprendizagem Significativa influencia fortemente as abordagens adotadas. Os trabalhos frequentemente utilizam os conceitos de subsunções e organizadores prévios, ressaltando a importância de conectar o novo conhecimento quântico ao conhecimento prévio dos alunos, garantindo assim uma aprendizagem mais profunda e duradoura. A influência de Ausubel é especialmente evidente nas propostas que adotam a UEPS como estratégia pedagógica central.

Portanto, apesar dos avanços e da diversidade das estratégias pedagógicas e produtos educacionais identificados nesta revisão, persistem desafios metodológicos e epistemológicos relevantes. Recomenda-se que futuras pesquisas sejam conduzidas com abordagens metodológicas mais robustas e quantitativas, priorizando a criação de produtos educacionais que aliem profundidade conceitual à acessibilidade experimental, além de ampliar discussões epistemológicas capazes de consolidar uma abordagem didática mais consistente e crítica para o Ensino de Mecânica Quântica na Educação Básica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO PEDAGÓGICO

No ensino de Física, o estabelecimento de um referencial teórico pedagógico é fundamental para a construção de estratégias pedagógicas que promovam o entendimento dos conceitos científicos mais abstratos e complexos. Nesse contexto, a proposta deste capítulo visa fundamentar esta dissertação que investiga o emprego de um modelo didático análogo (MDA-EC), arranjo hidrodinâmico, baseado em ondas de água, concebido para representar por analogia aspectos do efeito Casimir, como subsunçor pedagógico para mediar a compreensão das flutuações quânticas do vácuo. Tal abordagem tem o propósito de articular a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel com estratégias didáticas inovadoras, estabelecendo um elo entre o conhecimento prévio do estudante e a assimilação de conceitos de Mecânica Quântica (Tironi *et al.*, 2013, p. 4).

A escolha do referencial ausubeliano justifica-se não tão somente pelo que foi observado concisamente no capítulo anterior de revisão bibliográfica, como também, segundo essa teoria, a aprendizagem ocorre de maneira eficaz quando novas informações se relacionam de forma não arbitrária e substantiva com os conhecimentos preexistentes do aprendiz, os chamados subsunçores, os quais organizam a estrutura cognitiva de modo hierárquico (Darroz, 2018, p. 578). Assim, ao adotar a aprendizagem significativa como alicerce teórico, pretende-se promover uma transição gradual do conhecimento do cotidiano, representado pelas ondas mecânicas, para o abstrato, caracterizado pelas flutuações quânticas do vácuo.

3.1 David Ausubel e a aprendizagem significativa

3.1.1 Breve histórico sobre David Ausubel

David Paul Ausubel consolidou-se como referência maior na psicologia educacional, oferecendo uma contribuição inovadora à compreensão dos processos de aprendizagem por meio de sua Teoria da Aprendizagem Significativa. Sua obra precursora, iniciada com Psicologia da “Aprendizagem Verbal Significativa” (1963) e posteriormente revisada e ampliada em “A aquisição e a retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva” (2000), transformou a forma de pensar a aprendizagem, enfatizando que o processo de aquisição de novos conhecimentos ocorre de maneira mais eficaz quando estes se relacionam de forma não arbitrária e substancial com os saberes prévios dos aprendizes (Ausubel, 2003, p. 4).

Ausubel propôs que o conhecimento prévio, ou subsunçores, representa a base

indispensável para a assimilação de novos conteúdos, sendo que o material didático deve ser apresentado de modo a possibilitar essa conexão lógica. Essa abordagem contrasta com os métodos tradicionais de memorização mecânica ou de aprendizagem por descoberta, que frequentemente negligenciam a importância dos conhecimentos já estabelecidos na estrutura cognitiva dos alunos (Ausubel, 2003, p. 4). Para Ausubel, a aprendizagem por recepção, é frequentemente equivocada. Contrariamente ao que se pensa, ela não é um processo passivo, mas sim um processo ativo que exige do aprendiz uma análise crítica do novo conteúdo e a sua integração com as ideias já existentes, promovendo assim uma construção duradoura do conhecimento (Ausubel, 2003, p. 5).

O legado de Ausubel estende-se não somente à teoria, mas também à prática educativa. Ele enfatizou a necessidade de organizar sequencialmente os conteúdos de forma hierárquica, iniciando-se com os conceitos mais gerais e inclusivos, que servem de âncora para o desenvolvimento posterior de ideias mais específicas e detalhadas. Essa estratégia organizacional não só facilita a compreensão e a retenção dos conteúdos, como também possibilita a transferência de conhecimentos para novas situações e contextos, um aspecto fundamental para o ensino de disciplinas complexas, como a Física (Ausubel, 2003, p. 15).

Ao longo de sua trajetória, Ausubel destacou a importância de que o ensino seja concebido como um processo interativo, no qual o aprendiz é estimulado a relacionar o novo com o que já sabe, promovendo uma aprendizagem que é ao mesmo tempo integradora e transformadora. Essa visão inovadora contribuiu para que diversas instituições educacionais adotassem práticas pedagógicas que priorizam a aprendizagem significativa, consolidando a relevância do conhecimento prévio como elemento central no processo educacional (Ausubel, 2003, p. 15).

Em síntese, David Ausubel deixou um legado duradouro que continua a influenciar a prática pedagógica contemporânea. Sua abordagem teórica ressalta a importância de se construir conhecimento a partir da relação entre novas informações e subsunções previamente adquiridos, promovendo uma aprendizagem mais profunda, ativa e duradoura. Essa perspectiva, que valoriza tanto a organização sequencial dos conteúdos quanto a ativação do conhecimento prévio, constitui um marco fundamental para o desenvolvimento de estratégias didáticas eficazes no ensino, sobretudo em áreas de alta complexidade conceitual, como a Física.

3.1.2 Conceitos fundamentais da teoria ausubeliana

A aprendizagem significativa constitui-se em um processo mediante o qual uma nova informação ou conhecimento relaciona-se de maneira não arbitrária e substantiva, isto é, não literal, com elementos específicos e relevantes já presentes na estrutura cognitiva do indivíduo que aprende. Nesse processo, o significado lógico, inerente ao material a ser aprendido, transforma-se em significado psicológico, tornando-se compreensível e integrado à estrutura cognitiva do sujeito (Moreira, 2011, p. 26). De acordo com Ausubel (1963, p. 58 *apud* Moreira, 2011, p. 26), a aprendizagem significativa representa o mecanismo humano fundamental por meio do qual são adquiridas e retidas vastas quantidades de informações e ideias, características de qualquer área do conhecimento. Para que esse processo seja efetivamente realizado, é imprescindível a existência prévia, na estrutura cognitiva do aprendiz, de conceitos suficientemente claros e estáveis que possam atuar como subsunções, proporcionando um ponto de ancoragem ao novo conhecimento.

Os subsunções são conceitos ou noções fundamentais que estruturam o saber do aprendiz, funcionando como pontos de ancoragem para a assimilação de novos conteúdos (Darroz, 2018, p. 578). Ausubel recomenda o uso de organizadores prévios, compreendidos como materiais ou atividades introdutórias que oferecem uma visão geral do conteúdo a ser trabalhado, propostos antes da apresentação formal do material de aprendizagem. Esses organizadores atuam como pontes cognitivas, facilitando a ativação dos subsunções, preparando e orientando o aluno para relacionar seus conhecimentos prévios aos novos conteúdos abordados (Silva; Buss, 2019, p. 11 e Darroz, 2018, p. 578). A ocorrência da aprendizagem significativa, por sua vez, pode ser identificada quando o estudante consegue compreender, desenvolver e transferir os conhecimentos adquiridos a novas situações e contextos.

Nesse sentido, cabe destacar que a ativação eficiente dos subsunções, viabilizada pelos organizadores prévios, deve ser planejada em consonância com os princípios programáticos estabelecidos por Ausubel, particularmente os da diferenciação progressiva e reconciliação integrativa, essenciais para a organização e consolidação hierárquica e integradora do conhecimento.

A diferenciação progressiva, segundo Ausubel (2003, p. 6), refere-se à necessidade pedagógica de iniciar a apresentação dos conteúdos por meio de ideias gerais e inclusivas, avançando gradualmente para conceitos mais específicos e detalhados. Esse princípio fundamenta-se em duas hipóteses fundamentais: primeiro, que é cognitivamente menos

desafiador para o aprendiz assimilar detalhes quando estes derivam de conceitos mais abrangentes previamente internalizados, segundo que a estrutura cognitiva humana é naturalmente organizada em uma hierarquia conceitual, em que conceitos gerais encontram-se em posições superiores, integrando progressivamente ideias mais específicas e diferenciadas (Ausubel, 2003, p. 6).

Complementarmente, o princípio da reconciliação integrativa enfatiza a importância pedagógica de promover explicitamente conexões entre as novas informações apresentadas e os conhecimentos prévios do aluno, evidenciando semelhanças e diferenças conceituais e resolvendo eventuais conflitos ou discrepâncias aparentes ou reais entre ideias relacionadas (Moreira, 2011, p. 41). Ao adotar tal abordagem, os educadores podem estimular o aprendiz a construir uma rede conceitual coerente, estruturada e integrada.

Esses princípios são ainda reforçados pela organização sequencial, que sugere que os conteúdos sejam abordados respeitando as relações de dependência natural existentes entre os tópicos, garantindo coerência lógica e continuidade na aprendizagem (Moreira, 2011, p. 41). Ademais, a consolidação, outro princípio destacado por Ausubel, propõe que os estudantes alcancem o domínio pleno dos conceitos previamente trabalhados antes da introdução de novos conteúdos, assegurando, assim, a prontidão necessária para o aprendizado subsequente (Moreira, 2011, p. 42).

Portanto, os processos de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa, integrados aos princípios da organização sequencial e consolidação, proporcionam uma transformação qualitativa dos subsunidores, facilitando o desenvolvimento de estruturas cognitivas hierarquicamente organizadas e significativamente integradas, aspecto fundamental para a aprendizagem profunda e duradoura em disciplinas como a Física (Moreira, 2011, p. 26; Ausubel, 2003, p. 6).

3.2 Aprendizagem significativa no ensino de Física

O ensino da Mecânica Quântica no nível médio e na graduação inicial apresenta desafios notáveis, especialmente devido ao seu caráter profundamente abstrato e contraintuitivo. Os fenômenos quânticos muitas vezes se distanciam da experiência cotidiana dos estudantes, exigindo um elevado grau de abstração e ruptura com o pensamento clássico. Diante dessas especificidades, impõe-se ao docente a adoção de estratégias didático-metodológicas que promovam a apropriação conceitual e a aprendizagem com sentido, em alinhamento aos pressupostos da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel.

Segundo Ausubel (2003, p. 4), a aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação se relaciona, de maneira não arbitrária e substantiva, com os conhecimentos prévios do aprendiz, os subsunções. Essa perspectiva enfatiza a importância de que o material a ser ensinado esteja logicamente estruturado e que o estudante disponha de conhecimentos prévios relevantes, estabelecendo, assim, uma ponte entre o novo conteúdo e o já internalizado. No contexto da Mecânica Quântica, essa exigência torna-se particularmente complexa, uma vez que muitos dos seus conceitos fundamentais, como o princípio da incerteza, a dualidade onda-partícula e o colapso da função de onda, não encontram paralelo direto com o senso comum ou com as experiências cotidianas do estudante.

Para Moreira (2011, p. 26), o núcleo da aprendizagem significativa está na vinculação não arbitrária e substantiva entre ideias expressas simbolicamente e aspectos relevantes da estrutura de conhecimento do aprendiz. Tal condição é rara quando se trabalha com conteúdos que, como a Mecânica Quântica, exigem um raciocínio formalizado e contraintuitivo. A dificuldade, portanto, não reside apenas na apresentação do conteúdo, mas na falta de pontes cognitivas eficazes entre o conhecimento novo e o já existente.

Nessa perspectiva, os organizadores prévios configuram-se como recurso didático central. Conforme Ausubel, parafraseado por Silva e Buss (2019, p. 4), sua função é articular o repertório já disponível no aluno ao novo conteúdo, possibilitando aprendizagem significativa. Recursos como vídeos, simulações computacionais, analogias e experimentações controladas podem desempenhar esse papel ao facilitar a mediação entre o mundo cotidiano e os conceitos abstratos da Física Quântica.

Entretanto, como advertem Paulo e Moreira (2011, p. 432) “o professor deve, de alguma forma, valorizar a linguagem clássica e os conceitos previamente construídos pelos aprendizes [...] cuidando para que as analogias clássicas não ultrapassem o seu âmbito de validade”. Por exemplo, ao utilizar o modelo da ‘gaiola de ondas’ para explicar o confinamento quântico, é necessário explicitar os limites dessa analogia para evitar a cristalização de imagens mentais inadequadas. Isso reforça a necessidade de o professor atuar como mediador epistemológico entre a ciência formal e a compreensão intuitiva do estudante.

Ademais, a abordagem da Mecânica Quântica precisa ser situada em contextos significativos. Com base na experiência na EJA, Krummenauer, Costa e Silveira (2010, p. 71) sustentam que a seleção de temas geradores relacionados à prática profissional dos estudantes favorece a ativação de subsunções e a produção de significados. Embora o público jovem do Ensino Médio regular apresente um perfil distinto, o princípio pedagógico permanece válido: a aproximação entre ciência e realidade concreta contribui para o estabelecimento de vínculos

cognitivos mais robustos.

Ausubel também destaca que a aprendizagem por recepção não é, por definição, um processo passivo. Para o autor, o aprendiz precisa ser ativo no processo de significação, relacionando o novo material a conceitos relevantes previamente adquiridos (Ausubel, 2003 p. 3). Assim, tanto a aprendizagem por recepção quanto a por descoberta podem ser significativas, desde que o novo conhecimento se integre de forma lógica e substancial à estrutura cognitiva existente.

Neste contexto, a organização sequencial dos conteúdos e o planejamento didático tornam-se cruciais. Moreira (1979, p. 283) já sugeriu a aplicação da teoria de Ausubel na organização de cursos de Física, enfatizando que a disposição hierárquica e progressiva dos conceitos favorece sua assimilação significativa. A abordagem fragmentada e excessivamente formalista, por outro lado, tende a conduzir à aprendizagem mecânica, caracterizada por memorização desvinculada de compreensão (Moreira, 2011, p. 35).

Portanto, os desafios do ensino de conceitos abstratos da Mecânica Quântica não se limitam à dificuldade intrínseca do conteúdo, mas estendem-se à necessidade de adequação das estratégias pedagógicas às condições cognitivas dos estudantes. A superação desses desafios requer o emprego intencional de metodologias que favoreçam a construção ativa do conhecimento, como os organizadores prévios, o uso criterioso de analogias, a contextualização dos conteúdos e a valorização do conhecimento prévio.

3.3 Ensino por analogias no contexto do ensino de Física

O uso de analogias como ferramenta pedagógica tem sido amplamente investigado e valorizado no âmbito educacional, especialmente nas áreas das Ciências da Natureza, por permitir uma melhor compreensão de conceitos abstratos e complexos por meio do estabelecimento de relações comparativas entre fenômenos distintos.

Na Física, particularmente, esse método mostrou eficácia ao alterar pontualmente variáveis presentes em equações de um sistema físico, resultando em novas equações aplicáveis a sistemas estruturalmente semelhantes, porém distintos em sua natureza. Tal é o caso da analogia histórica entre a Lei de Coulomb e a Lei da Gravitação Universal, nas quais a similaridade matemática das expressões permitiu a transposição conceitual entre fenômenos gravitacionais e eletrostáticos, exemplificando o potencial didático e epistemológico das analogias no ensino de Física (Jorge, 1990, p. 196).

Analogias são processos cognitivos que possibilitam a explicitação e assimilação

de novos conhecimentos a partir de estruturas conceituais previamente conhecidas pelos estudantes (Ferry; Nagem, 2015; Hoffmann; Scheid, 2007).

Ferry e Nagem (2015, p. 2) ressaltam que o raciocínio por meio de analogias pode ser compreendido como um processo que ocorre em duas vias, identificando-se relações do conceito conhecido para o desconhecido e vice-versa. Essa abordagem bilateral permite não apenas uma compreensão mais profunda das similaridades entre conceitos distintos, mas também o reconhecimento explícito das limitações da analogia, evitando possíveis concepções alternativas ou equivocadas.

Hoffmann e Scheid (2007, p. 22-24) destacam que as analogias são fundamentais no processo de ensino e aprendizagem, especialmente quando bem planejadas e estruturadas, podendo contribuir significativamente para o desenvolvimento de um raciocínio mais crítico e articulado. Contudo, alertam para a necessidade de um uso consciente e bem estruturado das analogias, pois a aplicação não sistemática ou inadequadamente esclarecida pode gerar ou reforçar concepções equivocadas nos alunos.

Esses aspectos corroboram a perspectiva teórico-pedagógica defendida por David Ausubel e Marco Antônio Moreira, segundo os quais a aprendizagem significativa requer que os novos conteúdos sejam articulados de maneira clara e explícita com os subsunções preexistentes na estrutura cognitiva do estudante. Nesse sentido, as analogias apresentam uma potencial estratégia didática para a promoção da aprendizagem significativa, desde que observados os critérios para uma utilização eficaz, tais como a identificação precisa das similaridades e diferenças, e a explicitação das limitações da analogia adotada.

3.3.1 Fundamentação conceitual das analogias no ensino

As analogias constituem recursos didáticos fundamentais no processo educativo por promoverem o estabelecimento de relações conceituais entre conhecimentos preexistentes e novos, potencializando a assimilação e compreensão dos estudantes sobre temas complexos. Originalmente, a analogia tinha seu significado estritamente associado à proporcionalidade matemática, sendo utilizada já pelos filósofos clássicos como Platão e Aristóteles (Abbagnano, 2007, p. 54). Esses filósofos ressaltaram o caráter estrutural da analogia, fundamentado na correspondência de relações proporcionais entre diferentes domínios conceituais.

No contexto educacional, especialmente nas ciências, o conceito de analogia evoluiu para abranger relações que esclarecem, estruturam e avaliam fenômenos desconhecidos a partir de realidades conhecidas pelos estudantes, tornando-se essencial na didática

contemporânea. De acordo com Ferry e Nagem (2015, p. 18), o raciocínio analógico é caracterizado como “uma via de duplo sentido”: do domínio conhecido para o desconhecido (análogo-alvo) e do desconhecido para o conhecido (alvo-análogo). Este movimento de dupla via é fundamental para assegurar que as analogias sejam corretamente compreendidas, permitindo identificar não somente as similaridades, mas também as limitações e diferenças conceituais, evitando assim possíveis equívocos.

Embora as analogias frequentemente sejam confundidas com metáforas, é importante estabelecer suas diferenças conceituais e metodológicas. Hoffmann e Scheid (2007, p. 24) esclarecem que, enquanto as metáforas operam em um nível mais abstrato, sugestivo e sintético, as analogias possuem um caráter mais sistemático e explícito, envolvendo uma comparação detalhada e estruturada entre domínios diferentes. Esse detalhamento torna as analogias especialmente adequadas ao ensino de ciências, por serem capazes de explicitar claramente as relações conceituais e estruturais que fundamentam o fenômeno estudado.

No entanto, o uso inadequado ou não planejado das analogias pode resultar em interpretações equivocadas, favorecendo o surgimento ou fortalecimento de concepções alternativas e incorretas nos estudantes. Conforme alertam Hoffmann e Scheid (2007, p. 25), é essencial que o educador identifique e explique claramente os limites do análogo, explicitando suas diferenças e pontos de falha em relação ao fenômeno alvo. Essa abordagem criteriosa evita confusões e possibilita uma compreensão mais precisa e significativa.

Ferraz e Terrazzan (2011, l. 7-8) organizam um conjunto de nove categorias relacionadas ao nível de estruturação das analogias empregadas pelos professores:

- 1) ANALOGIAS SIMPLES. São quase metáforas. Não fazem o mapeamento de qualquer atributo do domínio alvo ou análogo. Simplesmente compararam uma estrutura do domínio alvo com outra estrutura do domínio análogo de forma breve.
- 2) ANALOGIAS DO TIPO SIMPLES REFERINDO-SE A FUNÇÃO. Propõe uma característica funcional do domínio alvo e logo propõe uma característica funcional do domínio análogo, ou vice-versa. Pode ocorrer que a característica funcional não seja explícita, ela pode simplesmente ser imaginada.
- 3) ANALOGIAS DO TIPO SIMPLES REFERINDO-SE A FORMA. Propõe o domínio alvo em referência a forma do domínio análogo. Apresentam a mesma aparência física geral.
- 4) ANALOGIAS DO TIPO SIMPLES REFERINDO-SE A FUNÇÃO E A FORMA. São analogias que apresentam características dos dois últimos tipos anteriores, tanto referentes a forma como a função.
- 5) ANALOGIAS DO TIPO SIMPLES REFERINDO-SE AOS LIMITES DO ANÁLOGO. Introduz o domínio alvo e logo indica aonde o análogo falha.
- 6) ANALOGIAS ENRIQUECIDAS. Fazem o mapeamento explícito de algum atributo do domínio alvo ou análogo. Ou seja, especificam correspondência(s) para as relações analógicas entre o alvo e análogo. Podem ainda conter os limites de validade entre alvo e análogo.
- 7) ANALOGIAS DUPLAS OU TRIPLAS. Dois ou três conceitos alvo diferentes e complementares são explicados por dois ou três análogos, cada um correspondente a um domínio alvo.

8) ANALOGIAS MÚLTIPLAS. Apresentam o conceito alvo e colocam mais de um análogo para explicar o mesmo alvo. Ou seja, vários análogos eram usados para explicar um único tópico.

9) ANALOGIAS ESTENDIDAS. São mais sistemáticas. Vários atributos do conceito alvo são explicados e fazem correspondências ao análogo. Também, uma analogia estendida pode incluir as limitações da relação analógica. Além disso, uma analogia estendida pode conter ainda mais de um análogo, complementar ao primeiro (Ferraz; Terrazzan, 2011, l. 7-8).

Essas categorias auxiliam os educadores a planejar e aplicar analogias com maior rigor e clareza, facilitando a compreensão conceitual e prevenindo possíveis equívocos ou interpretações inadequadas. Assim, a utilização pedagógica das analogias, para que seja efetiva, deve seguir uma abordagem criteriosa e explicitamente estruturada, esclarecendo aos estudantes os aspectos comparáveis e não comparáveis, contextualizando-os adequadamente às experiências e conhecimentos prévios dos alunos e assegurando dessa forma uma compreensão robusta e significativa dos conteúdos científicos abordados em sala de aula.

3.3.2 Aspectos metodológicos do ensino de Física por analogias

No ensino de Física, as analogias constituem uma relevante ferramenta pedagógica para a mediação entre o conhecimento cotidiano e os modelos científicos formais, especialmente no contexto da Educação Básica, onde os estudantes frequentemente apresentam dificuldades para compreender conceitos abstratos. Segundo Bozelli e Nardi (2007, p. 2), a utilização de analogias possibilita o mapeamento conceitual entre domínios distintos, promovendo o acesso a significados mais profundos e inferências causais por meio de estruturas relacionais compartilhadas entre os sistemas comparados.

Um exemplo clássico dessa aplicação metodológica consiste na analogia entre a Lei de Coulomb e a Lei da Gravitação Universal, frequentemente explorada como forma de evidenciar aos estudantes as similaridades estruturais entre os modelos de força. Ambas as leis seguem a forma geral, respectivamente, sugerindo um paralelismo matemático e conceitual que pode ser explorado didaticamente para reforçar o entendimento do comportamento das interações de forças de campo (Bozelli, Nardi, 2007, p. 9).

Segundo Moreira (2011, l. A facilitação da aprendizagem significativa segundo Ausubel) em contexto com o ensino por analogias, a analogia não pode ser reduzida a uma simples correspondência entre fórmulas. O processo de mapeamento analógico deve enfatizar relações estruturais sistemáticas, ou seja, relações de ordem superior com implicações inferenciais, em detrimento de atributos superficiais dos objetos comparados. Isso implica que, ao utilizar analogias, o professor deve ir além das similaridades formais e explicitar também as

limitações conceituais da analogia, promovendo o que Ausubel denominou de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa.

Bozelli e Nardi (2007) reforçam que o uso de analogias deve estar articulado à intencionalidade pedagógica e não se restringir a estratégias ilustrativas ou expositivas. Ao contrário, devem ser compreendidas como ferramentas mediadoras que, quando bem estruturadas, favorecem o acesso a modelos científicos mais abstratos e consolidados.

Dessa forma, o ensino por analogias em Física requer não apenas sensibilidade didática, mas também domínio epistemológico dos conceitos científicos e das relações possíveis com os domínios cotidianos ou familiares aos estudantes. Essa articulação é indispensável para assegurar que as analogias não apenas motivem ou ilustrem, mas de fato ensinem.

3.3.3 O ensino de Física moderna e Contemporânea por analogias

A utilização de analogias no ensino de Física não se restringe à mediação entre conceitos concretos ou matematicamente formalizados. Ela também se mostra especialmente promissora na abordagem de conteúdos conceitualmente abstratos e de difícil visualização empírica, como aqueles presentes nos tópicos da Física Moderna e Contemporânea. Em tais contextos, a analogia funciona como um instrumento pedagógico de mediação cognitiva, capaz de articular o universo das experiências sensíveis ao domínio das representações teóricas, operando como suporte inicial à construção de modelos mentais coerentes com a lógica interna dos fenômenos científicos.

A teoria da aprendizagem significativa, proposta por Ausubel (2003) e aprofundada por Moreira (2011), sustenta que a assimilação de conceitos abstratos depende da ativação de subsunções adequados, ou seja, estruturas conceituais pré-existentes que ofereçam pontos de ancoragem para os novos conteúdos. A analogia, nesse contexto, atua como uma ferramenta simbólica e funcional que permite ao estudante transitar do familiar ao inusitado, do intuitivo ao teórico, promovendo a organização hierárquica do conhecimento e a integração conceitual progressiva.

Diversos estudos demonstram a eficácia dessa estratégia. Um exemplo notável encontra-se no experimento proposto por Denardo, Puda e Larraza (2009), que modela o Efeito Casimir, um fenômeno associado às flutuações do vácuo quântico, por meio da interação entre ondas de superfície em água confinada entre placas submersas. Essa analogia experimental, ancorada em um sistema mecanicamente acessível, permite aos estudantes visualizar a redução

de modos oscilatórios em um espaço limitado, constituindo uma representação clássica de um fenômeno tipicamente quântico. O recurso, ao mesmo tempo em que simplifica a visualização, fomenta inferências causais e promove discussões conceituais sobre a energia do vácuo e os fundamentos da Teoria Quântica de Campos.

Outra aplicação didática relevante é apresentada por Dias (2022), ao propor uma analogia entre a Termodinâmica e a Eletricidade. O autor estabelece correspondências entre calor e carga elétrica, temperatura e potencial elétrico, bem como entre ciclos termodinâmicos e circuitos elétricos. Essa construção permite aos estudantes interpretar os princípios da conservação da energia e das leis de Kirchhoff a partir de subsunções desenvolvidas em conteúdos previamente trabalhados, como calorimetria e transformações de energia. A analogia promove, assim, uma transposição conceitual fundamentada em relações estruturais análogas, respeitando o princípio da diferenciação progressiva e fortalecendo a interdisciplinaridade no ensino de Física.

Cabe ressaltar, entretanto, que analogias aplicadas a fenômenos de alta abstração exigem cuidados metodológicos específicos. Segundo a teoria do mapeamento estrutural (Gentner, 1983; Vosniadou e Ortony, 1989), a validade de uma analogia depende da correspondência sistemática entre os elementos relacionais dos domínios comparados, e não apenas de similaridades superficiais. Nesse sentido, é essencial que o professor oriente os estudantes na identificação não apenas dos paralelismos estruturais, mas também dos limites conceituais da analogia, evitando interpretações equivocadas ou concepções alternativas incorretas.

Analogias mal conduzidas podem induzir os estudantes à crença de que os modelos análogos são idênticos em todos os aspectos, o que compromete a compreensão dos limites de aplicabilidade dos conceitos científicos (Hoffmann; Scheid, 2007; Gentner, 1983). Ferraz e Terrazzan (2011) alertam que, em muitas situações, o uso espontâneo e não sistemático de analogias pelo professor pode resultar na cristalização de concepções alternativas, especialmente quando os limites do domínio análogo não são explicitados com clareza.

Para evitar tais distorções, é necessário que o uso da analogia seja orientado por intencionalidade didática, clareza epistemológica e sensibilidade pedagógica, sendo inserido em sequências de ensino que favoreçam a discussão crítica, a problematização ativa e a reconstrução dos modelos explicativos (Ferry; Nagem, 2015; Moreira, 2011; Vosniadou; Ortony, 1989). Além disso, como indicam Bozelli e Nardi (2007), a analogia deve ser compreendida como instrumento de modelagem conceitual, e não apenas como recurso de ilustração, exigindo do professor domínio teórico e metodológico sobre os conceitos científicos envolvidos.

Em suma, as analogias, quando criteriosamente selecionadas e didaticamente conduzidas, deixam de ser meros recursos ilustrativos para se tornarem ferramentas estruturantes da aprendizagem significativa (Ausubel, 2000; Moreira, 2011), sobretudo no ensino da Física Moderna e Contemporânea. Seu uso eficaz contribui não apenas para a superação das barreiras cognitivas impostas pela abstração dos conteúdos, mas também para a formação de uma visão científica articulada, integradora e crítica, essencial à educação científica na contemporaneidade.

3.3.4 Ensino por analogias e a Base Nacional Comum Curricular (BNCC)

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC), ao estabelecer competências e habilidades essenciais para o Ensino Médio, propõe um modelo formativo que valoriza a construção de explicações, a utilização de modelos e o raciocínio científico como meios para interpretar fenômenos e resolver problemas. Diante disso, a metodologia baseada em analogias apresenta aderência a tais princípios, viabilizando a passagem orientada do conhecimento comum aos referenciais teóricos das Ciências da Natureza, em particular da Física.

Autores como Bozelli e Nardi (2007) destacam que as analogias, ao aproximarem o universo conceitual da Física de contextos familiares aos alunos, favorecem a compreensão de conteúdos complexos por meio da exploração de estruturas conceituais pré-existentes. Tal abordagem está em consonância com a Competência Específica 2 da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias da BNCC para o Ensino Médio, que propõe “Construir e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, e fundamentar decisões éticas e responsáveis” (Brasil, 2018, p. 539). Ao promover a elaboração de interpretações baseadas em modelos analógicos, essa prática pedagógica contribui para que os estudantes compreendam fenômenos naturais de maneira mais integrada e fundamentada, articulando conhecimento conceitual e reflexão crítica.

Nesse mesmo sentido, Ferraz e Terrazzan (2011) apontam que a eficácia das analogias no processo de ensino-aprendizagem depende de sua intencionalidade didática e de sua estruturação metódica. Para que essa aplicação seja coerente com os pressupostos da BNCC, é fundamental considerar os alertas de autores como Hoffmann e Scheid (2007) e Jorge (1990), que chamam a atenção para os riscos de concepções alternativas oriundas de analogias mal delimitadas.

Além disso, Pacca e Utges (1999) enfatizam que a pertinência didática das

analogias está relacionada ao conhecimento prévio dos alunos sobre o domínio análogo. Essa constatação encontra respaldo na Competência Geral 2 da Educação Básica estabelecida pela BNCC, a qual propõe que a formação do estudante valorize o exercício da curiosidade intelectual e o uso do pensamento próprio da ciência, por meio de práticas que envolvam “a investigação, a reflexão, a análise crítica, a imaginação e a criatividade, para investigar causas, elaborar e testar hipóteses, formular e resolver problemas e criar soluções (inclusive tecnológicas) com base nos conhecimentos das diferentes áreas” (BRASIL, 2018, p. 9). Assim, o uso criterioso de analogias, ao mobilizar estruturas conceituais familiares para construir novos significados, contribui para a promoção dessas práticas investigativas e reflexivas. Complementarmente, Otero (1997) ressalta que o uso de analogias demanda processos de negociação de significados entre professor e alunos, pois a compreensão dos elementos comparados nem sempre é partilhada de modo imediato ou homogêneo entre os estudantes. Isso exige, por parte do professor, planejamento didático intencional, abertura ao diálogo e atenção às mediações necessárias para que a analogia cumpra sua função formativa de maneira efetiva.

Por fim, as contribuições de Gentner e Gentner (1983), bem como de Vosniadou e Ortony (1989), permitem afirmar que as analogias promovem efeitos conceituais reais, desde que respeitem princípios estruturais de correspondência entre domínios. Esse princípio de mapeamento sistemático é compatível com as práticas pedagógicas recomendadas pela BNCC, que exigem a organização de conteúdos a partir de relações, processos e padrões, e não meramente por conteúdos isolados.

Dessa forma, o ensino por analogias pode ser reconhecido como uma prática didática alinhada à Base Nacional Comum Curricular, tanto no plano conceitual quanto metodológico, desde que sua aplicação esteja respaldada pela literatura especializada e inserida em um contexto pedagógico reflexivo, planejado e epistemologicamente cuidadoso.

4 O EFEITO CASIMIR E AS FLUTUAÇÕES DO VÁCUO QUÂNTICO

4.1 Contextualização histórica e importância do Efeito Casimir

Desde a formulação da Mecânica Quântica, no início do século XX, diversos fenômenos físicos têm desafiado a intuição clássica e conduzido a humanidade a profundas reflexões sobre a natureza da realidade. Um desses fenômenos, o Efeito Casimir, previsto teoricamente pelo físico holandês Hendrik Brugt Gerhard Casimir em 1948, constitui um dos mais intrigantes exemplos das consequências diretas das flutuações quânticas do vácuo.

Casimir (1948, p. 795) verificou teoricamente a existência de uma força atrativa entre duas placas perfeitamente condutoras e descarregadas, resultante das flutuações do vácuo quântico. Esta força, no entanto, é um fenômeno de curto alcance, manifestando-se de forma significativa apenas quando as placas estão separadas por distâncias da ordem de micrômetros ou menos, uma vez que sua intensidade decai rapidamente com o aumento da separação. Tal condição implica que, para comprimentos de onda próximos à distância entre as placas, a profundidade com que a onda eletromagnética penetra nas placas torne-se desprezível frente ao afastamento entre elas. Essa força pode ser compreendida como resultante da pressão associada às flutuações do ponto zero das ondas eletromagnéticas.

Contudo, foi apenas em 1958 que Marcus Spernaay confirmou experimentalmente o fenômeno, embora com limitações significativas devido às dificuldades técnicas da época. Em seu experimento pioneiro, Spernaay observou que, para os dois metais analisados, os dados experimentais apresentaram boa concordância com as previsões teóricas de Casimir, ainda que as intensidades das forças atrativas medidas tenham se revelado um pouco superiores às previstas (Spernaay, 1958, p. 762).

O estudo do vácuo quântico tem se mostrado fundamental para a compreensão do universo, especialmente no que tange à energia de ponto zero, cuja relevância é destacada em modelos cosmológicos sobre a expansão do cosmos e a possível natureza da matéria escura. As flutuações do vácuo também são consideradas potenciais agentes na formação de estruturas cósmicas e na compreensão de fenômenos extremos, como os buracos negros, ampliando horizontes na cosmologia e na astrofísica.

No campo dos materiais quânticos, esse conhecimento tem impulsionado a criação de substâncias com propriedades notáveis, como supercondutores de alta temperatura e materiais topológicos, com impactos significativos nas áreas da eletrônica, computação e energia. Exemplos como o grafeno evidenciam esse potencial, prometendo dispositivos mais

rápidos e eficientes.

Ademais, na criptografia quântica, a compreensão das flutuações do vácuo e do entrelaçamento tem permitido o desenvolvimento de sistemas de comunicação teoricamente invioláveis, transformando a segurança da informação. Tais aplicações demonstram que o vácuo quântico, além de seu valor teórico, possui implicações práticas decisivas na fronteira da ciência e da tecnologia.

4.2 Fundamentação Física Clássica e Pré-Quântica

Desde a luz do Sol até os sons que ouvimos, as ondas estão presentes e em constante interação com o mundo. Elas podem se propagar pelo ar, pela água, pelo espaço e até mesmo por materiais sólidos, transportando energia e informação. O estudo das ondas é essencial para compreender desde fenômenos naturais até avanços tecnológicos, como telecomunicações, exames médicos e novas descobertas na Física.

As ondas podem ser classificadas em mecânicas, eletromagnéticas e de matéria. Enquanto as ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagar, as ondas eletromagnéticas podem viajar até mesmo pelo vácuo. No entanto, a descoberta da dualidade onda-partícula na Mecânica Quântica nos mostrou que partículas subatômicas, como elétrons e prótons, também exibem comportamento ondulatório, levando ao conceito de ondas de matéria, descrito pelo físico teórico Louis de Broglie.

Neste capítulo, abordaremos os fundamentos das ondas mecânicas e eletromagnéticas, considerando desde sua formulação clássica até os limites impostos pelos fenômenos em escalas microscópicas. Também discutiremos os mecanismos de transporte de energia e as principais aplicações científicas e tecnológicas desses fenômenos.

À medida que avançamos na compreensão dos diversos comportamentos ondulatórios, torna-se evidente que a descrição clássica é insuficiente para explicar os fenômenos em escalas subatômicas. Nessa perspectiva, será introduzida a Mecânica Quântica, cuja abordagem reformula conceitos fundamentais, revelando, por exemplo, que até mesmo o vácuo quântico possui propriedades dinâmicas surpreendentes onde se dará destaque ao efeito Casimir e o cálculo da força de Casimir.

4.2.1 Oscilações

Uma oscilação ocorre quando um sistema é perturbado a partir de uma posição de

equilíbrio estável (Tipler; Mosca, 2009a, p. 465).

No âmbito da Física, as oscilações se apresentam em diversas escalas, abrangendo tanto fenômenos observáveis no nível macroscópico quanto aqueles próprios do domínio microscópico. Entre os sistemas que exibem comportamento oscilatório, destacam-se exemplos como pêndulos, diapasões, cordas de instrumentos musicais e colunas de ar presentes em instrumentos de sopro. Além disso, a corrente alternada, amplamente utilizada no cotidiano, caracteriza-se por seu comportamento oscilatório, sendo que oscilações em circuitos elétricos estão associadas a diversas aplicações tecnológicas de grande relevância (Nussenzveig, 2002, p. 39).

Tais sistemas oscilatórios apresentam movimentos periódicos em torno de uma posição de equilíbrio, caracterizando o chamado Movimento Harmônico Simples⁶ (MHS).

No entanto, ao adentrarmos a escala microscópica, torna-se evidente que os fenômenos vibracionais não podem mais ser compreendidos adequadamente à luz das leis clássicas do movimento. Neste domínio, emergem princípios fundamentais da Mecânica Quântica, os quais regem o comportamento de partículas elementares e sistemas atômicos com base em uma estrutura probabilística e não determinista. A transição entre essas descrições, do clássico ao quântico, constitui um dos marcos conceituais centrais da Física contemporânea.

Nesta seção, busca-se estabelecer uma ponte entre os modelos oscilatórios clássicos e suas formulações quânticas, elucidando de que maneira o conceito de oscilação, intuitivo e acessível no mundo sensível, é reinterpretado no contexto da quantização da energia e das flutuações inerentes ao vácuo quântico.

i) Oscilações macroscópicas

No domínio fenomenológico acessível à observação cotidiana, as oscilações manifestam-se de forma recorrente em uma ampla variedade de sistemas físicos. Essas oscilações podem surgir tanto em corpos inicialmente em repouso, quando submetidos a pequenas perturbações, quanto em sistemas que naturalmente produzem padrões oscilatórios regulares, como cordas vibrantes e colunas de ar ressonantes. Em tais contextos, é possível aplicar modelos da Física clássica, os quais oferecem descrições quantitativas e qualitativas das propriedades dinâmicas envolvidas.

⁶ Segundo Tipler e Llewellyn (2014, p.158) “o termo simples é usado para indicar que o oscilador está sujeito apenas a uma força de retorno, ou seja, o problema do oscilador simples não envolve outras forças, como forças externas e forças de amortecimento”.

Esses modelos permitem caracterizar aspectos fundamentais dos sistemas oscilatórios, tais como frequência natural, amplitude de oscilação, energia envolvida e condições de estabilidade.

Diante da observação de sistemas oscilatórios no cotidiano, uma indagação central emerge: como descrever e prever, de modo rigoroso, o comportamento dessas oscilações? Considere, por exemplo, um sistema massa-mola em que a mola é levemente tracionada e liberada, ou ainda um pêndulo que oscila em torno de sua posição de equilíbrio. Tais sistemas apresentam um movimento periódico caracterizado por regularidade temporal e simetria dinâmica, o qual pode ser descrito com precisão pelo modelo do MHS.

O MHS constitui um arcabouço teórico fundamental na Mecânica Clássica, sendo amplamente empregado na análise de vibrações em sistemas físicos diversos. Sua formulação matemática envolve a solução de equações diferenciais lineares de segunda ordem, cujas soluções apresentam comportamento senoidal ou cossenoidal, revelando parâmetros essenciais como frequência angular, amplitude e fase. A utilidade do modelo se estende desde aplicações em engenharia até a descrição de fenômenos naturais.

Contudo, as oscilações não se restringem aos sistemas macroscópicos. À medida que se reduz a escala de observação até o domínio atômico e molecular, verifica-se que os constituintes fundamentais da matéria, tais como átomos em redes cristalinas ou moléculas em estados excitados, também apresentam comportamentos vibracionais. Nesse regime, entretanto, as previsões da Mecânica Clássica tornam-se insuficientes para descrever com exatidão os fenômenos observados.

Em escalas microscópicas, os princípios da Mecânica Quântica tornam-se indispensáveis. Uma das implicações fundamentais desta teoria é a quantização da energia: os modos vibracionais de sistemas atômicos não podem assumir valores arbitrários, mas apenas determinados níveis discretos de energia. Esse caráter quantizado das vibrações impõe uma nova compreensão da estrutura da matéria e é central para o estudo de fenômenos como espectros moleculares, calor específico de sólidos e transições vibracionais em sistemas quânticos confinados.

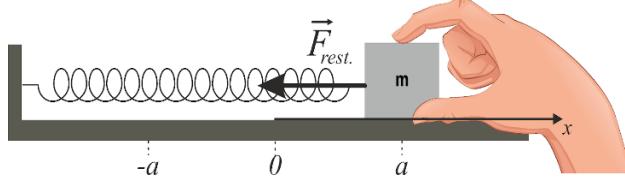
ii) Movimento Harmônico Simples (MHS)

Para a compreensão dos fundamentos que regem os fenômenos oscilatórios, torna-se imprescindível o estudo do MHS. Este modelo teórico constitui a base para a descrição de uma ampla classe de sistemas oscilatórios, sendo aplicável tanto à análise de pêndulos físicos e

sistemas massa-mola quanto à modelagem de vibrações moleculares sob a ótica da Mecânica Quântica.

Segundo Halliday e Resnick (1994, p. 26) “o movimento harmônico simples é um movimento executado por uma partícula de massa m submetida a uma força que é proporcional ao deslocamento da partícula, porém de sentido contrário”.

Figura 1 – Posicionamento do bloco em um sistema massa-mola na posição $x=a$.
 $v=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considere o sistema massa-mola ilustrado na Figura 1. Um bloco de massa m deslocado até uma posição $x = a$ e mantido em repouso ($v = 0$). Nesse instante, surge uma força restauradora exercida pela mola, proporcional ao deslocamento em relação à posição de equilíbrio. Tal força é descrita pela constante elástica k , que caracteriza a rigidez da mola. Essa força atua na mesma direção do deslocamento, porém em sentido oposto, conforme determina a Lei de Hooke:

$$F_x = -kx. \quad (1)$$

Considerando que o bloco é liberado do repouso a partir da posição a , o tempo necessário para que ele realize um ciclo completo de oscilação, deslocando-se de um extremo ao outro e retornando à posição inicial, é denominado de período T . O inverso do período define a frequência f , que representa o número de ciclos completos realizados por unidade de tempo:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2)$$

A lei de Hooke pode ser expressa como uma equação diferencial dada por

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0, \quad (3)$$

em que m representa a massa do corpo oscilante, nesse caso a massa do bloco, k é a constante elástica do sistema, e x é o deslocamento em função do tempo. A solução dessa equação é uma função harmônica do tipo:

$$x = A \cos(\omega t + \theta), \quad (4)$$

em que A é o deslocamento máximo (amplitude) do movimento, $\omega = \sqrt{k/m}$ é a frequência angular natural e θ é a fase inicial determinada pelas condições iniciais do sistema.

Mantendo A como constante, permitindo com que t varie, fazendo a derivada em relação a t sobre a equação 4, obtemos a função horária da velocidade escalar:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \theta). \quad (5)$$

Do mesmo modo, fazendo a derivada segunda, também da equação 4, obtemos a função aceleração escalar, dada por:

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \theta). \quad (6)$$

Substituindo 4 em 6 obtém-se

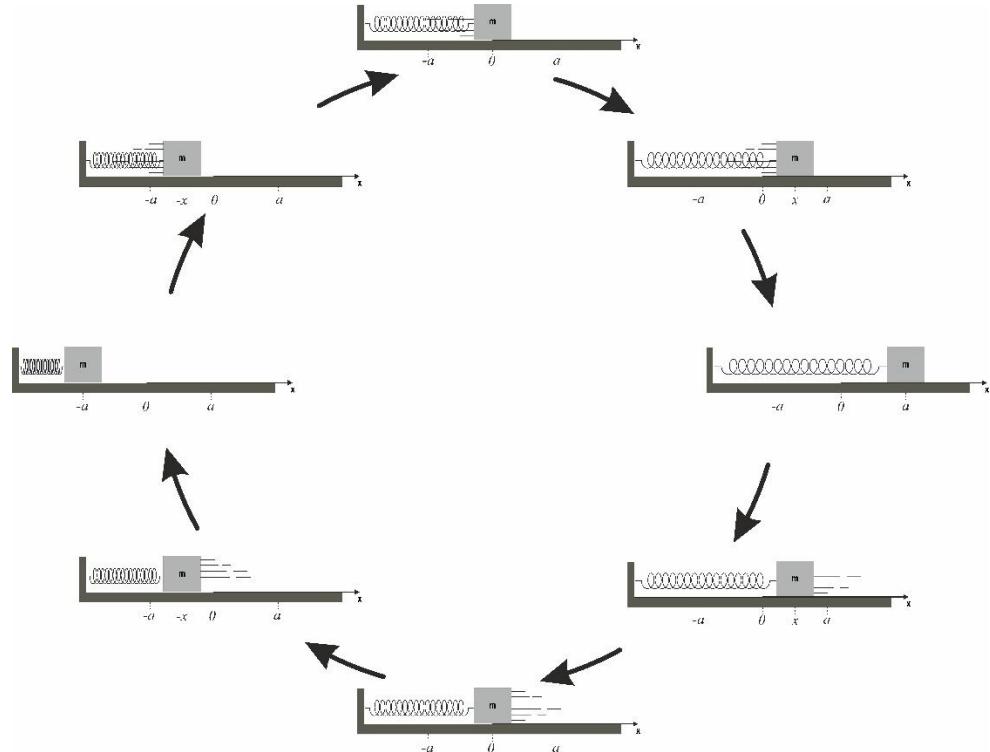
$$a_x = -\omega^2 x. \quad (7)$$

Comparando a expressão 7 com a equação diferencial 3, a equação 4 é uma solução se

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (8)$$

Agora, considere a Figura 2, ao deslocar o bloco de sua posição de equilíbrio e liberá-lo, observa-se a ocorrência de um movimento oscilatório periódico simétrico. Este comportamento evidencia a presença de uma energia mecânica conservada, alternando ciclicamente entre energia cinética e energia potencial elástica.

Figura 2 – Ciclo de oscilação do sistema massa mola (sistema conservativo).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a oscilação do sistema massa-mola, o corpo percorre repetidamente as mesmas posições em torno da posição de equilíbrio. Essa regularidade temporal define uma grandeza fundamental da dinâmica oscilatória: o período T . O período representa o intervalo de tempo necessário para que o sistema complete um ciclo inteiro de oscilação, ou seja, para que retorne à mesma posição com o mesmo sentido de movimento. Ele é o menor intervalo de tempo, que, para todo t , satisfaz à relação:

$$x(t) = x(t + T). \quad (9)$$

Substituindo a equação 4 em 9, temos

$$x(t) = A\cos[\omega(t + T) + \theta] = A\cos(\omega t + \omega T + \theta). \quad (10)$$

A função cosseno e seno recuperam o valor quando a fase é aumentada de 2π e, portanto,

$$\omega T = 2\pi \quad (11)$$

ou

$$\omega = 2\pi \left(\frac{1}{T} \right). \quad (12)$$

Substituindo 12 em 4,

$$x = A \cos \left(2\pi \frac{t}{T} + \theta \right), \quad (13)$$

observa-se, por inspeção, que a cada incremento de T no tempo t , a razão t/T é aumentada em uma unidade, resultando em um acréscimo de 2π na fase do movimento, o que corresponde à conclusão de um ciclo completo da oscilação. A frequência f está relacionada à frequência angular ω pela seguinte expressão:

$$\omega = 2\pi \frac{1}{T} = 2\pi f. \quad (14)$$

De acordo com a expressão 8, a frequência e o período de oscilação de um bloco acoplado a uma mola estão relacionados à constante elástica k e à massa m da seguinte forma:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (15)$$

No caso do MHS o período T depende exclusivamente da massa m do corpo oscilante e da constante elástica k da mola, sendo dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (16)$$

A expressão 16 evidencia que, para um sistema ideal, o período não depende da amplitude do movimento, o que caracteriza a isocronia das oscilações harmônicas simples, uma propriedade essencial em diversas aplicações físicas e tecnológicas, como em relógios mecânicos e sensores de vibração.

O MHS é considerado um modelo ideal de oscilação periódica, uma vez que, em sua formulação clássica, desconsidera efeitos dissipativos como atrito ou resistência do meio. Apesar de sua simplicidade, o modelo fornece uma aproximação altamente eficaz para descrever oscilações em sistemas reais, especialmente quando as amplitudes são pequenas e as forças envolvidas são aproximadamente lineares.

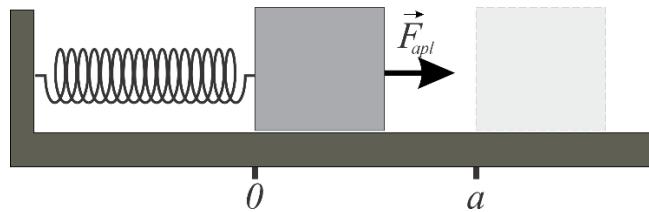
A compreensão dessas relações permite a modelagem precisa do comportamento oscilatório de sistemas físicos diversos, constituindo a base para o estudo de oscilações mais

complexas, bem como para a generalização do conceito de vibração em contextos quânticos, como se discutirá nas seções seguintes.

iii) A energia do Movimento Harmônico Simples

O oscilador harmônico massa-mola constitui mais do que um mero exemplo de movimento periódico, trata-se de um modelo teórico fundamental para a compreensão da dinâmica energética em sistemas físicos conservativos. Durante a oscilação, observa-se uma conversão contínua entre duas formas principais de energia, potencial elástica e cinética, sem qualquer perda ou ganho de energia total, em conformidade com o princípio da conservação da energia mecânica. Essa conservação é garantida pelo fato de que a força restauradora exercida pela mola é uma força conservativa, isto é, uma força cujo trabalho independe do caminho percorrido e depende apenas dos pontos inicial e final. Assim, o trabalho total realizado pela força elástica em qualquer trajetória fechada é nulo, característica essencial para a estabilidade energética do sistema oscilatório.

Figura 3 – Força aplicada puxando uma mola para direita até $x=a$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Supondo que o bloco da Figura 3, preso a mola de massa desprezível, seja puxado, pela força \vec{F}_{apl} a partir da posição de equilíbrio $x = 0$ até a posição $x = a$. O trabalho realizado pela mola sobre o bloco é negativo quando o bloco é tracionado para longe da posição de equilíbrio, pois a força restauradora da mola e o deslocamento do bloco possuem direções opostas. No entanto, ao ser abandonado, a força da mola passa a realizar trabalho positivo sobre o bloco, impulsionando-o de volta à sua posição de equilíbrio e promovendo sua aceleração nesse sentido.

O trabalho total realizado pela força elástica no percurso completo, do ponto $x = 0$ até uma posição arbitrária $x = a$ e no retorno a $x = 0$ é nulo. Esse resultado é independente do valor específico de a , desde que a deformação da mola permaneça dentro de seu regime elástico linear, isto é, sem ultrapassar o limite de proporcionalidade estabelecido pela Lei de

Hooke (Equação 1) (Tipler; Mosca, 2009, p. 202).

Para um deslocamento infinitesimal l , a variação da energia potencial E_p é dada por

$$dE_p = -Fdl. \quad (17)$$

Logo, para calcular a função energia potencial elástica associada a força é

$$dE_p = -F_x dx = -(-kx)dx = +kx dx. \quad (18)$$

Então,

$$E_p = \int kx dx = \frac{1}{2}kx^2 + E_0, \quad (19)$$

no qual E_0 é a energia potencial quando $x = 0$, quando a mola está relaxada. Escolhendo E_0 igual a zero, temos que a energia potencial de uma mola é dada por

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}m\omega^2x, \quad (20)$$

no qual k é a constante elástica da mola e x o deslocamento em relação à posição de equilíbrio.

A energia potencial de uma mola atinge seu valor máximo quando o bloco se encontra nas posições extremas do movimento, nos pontos $x = -a$ e $x = a$, onde a representa a amplitude máxima da oscilação. Nos instantes de máxima elongação ($x = -a$ e $x = a$), a velocidade do bloco é nula e toda a energia do sistema está armazenada sob a forma de deformação da mola.

Por outro lado, a energia cinética E_c do sistema atinge seu valor máximo na posição de equilíbrio ($x = 0$), onde a velocidade do corpo é máxima e a mola encontra-se em sua extensão natural, ou seja, sem deformação, no ponto equilíbrio. A energia cinética, neste contexto, é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2, \quad (21)$$

sendo m a massa do bloco e v sua velocidade instantânea.

A energia mecânica total E_m do sistema é conservada e constante ao longo de toda a oscilação, sendo a soma das energias potencial e cinética em qualquer instante:

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}m\omega^2x^2. \quad (22)$$

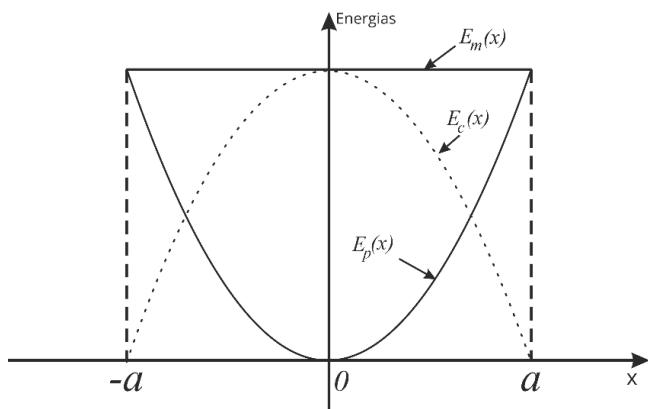
Essa conservação evidencia a natureza idealizada do sistema, no qual não há dissipação de energia por atrito ou resistência do meio. O comportamento energético do OHS reflete uma troca periódica e simétrica entre E_p e E_c , com papel central na descrição de diversos sistemas físicos.

No contexto da mecânica clássica, a probabilidade de encontrar o bloco em um intervalo infinitesimal dx é diretamente proporcional ao tempo que ele permanece nesse intervalo, o qual é dado por $dt = dx/v$. A velocidade v do bloco pode ser determinada por meio da aplicação do princípio da conservação da energia mecânica, conforme expresso na equação 22. Dessa forma, a densidade de probabilidade clássica de localização do bloco é

$$P_c(x)dx \propto \frac{dx}{v} = \frac{dx}{\sqrt{\frac{2}{m}(E_m - \frac{1}{2}m\omega^2x^2)}}. \quad (23)$$

O Gráfico 1 ilustra a distribuição espacial das energias mecânica total (E_m), potencial elástica (E_p) e cinética (E_c) em função da posição x ao longo do movimento oscilatório de um sistema massa-mola ideal. Os limites do deslocamento ($x = \pm a$) correspondem às amplitudes máxima e mínima da oscilação, definindo os pontos extremos do movimento. O valor da energia total E_m é, em princípio, permitido. O menor valor possível é $E_m = 0$, o qual corresponde ao caso limite em que o bloco permanece em repouso na posição de equilíbrio, confinado na região entre $-a$ e a , sem realizar movimento oscilatório.

Gráfico 1 – Gráfico da distribuição das Energias Cinética, Potencial e Mecânica no Oscilador Harmônico Simples.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva de energia potencial elástica $E_p(x)$ representada pela linha contínua, apresenta comportamento parabólico simétrico com vértice na origem ($x = 0$), conforme a expressão 20.

Nesse gráfico, observa-se que E_p é mínima (nula) na posição de equilíbrio ($x = 0$) e máxima nas extremidades da oscilação ($x = \pm a$). Isso ocorre porque, nesses pontos, a deformação da mola é máxima, enquanto a velocidade do bloco se anula.

Por sua vez, a energia cinética $E_c(x)$, representada pela linha tracejada, apresenta forma complementar à energia potencial, atingindo seu valor máximo na posição de equilíbrio e decrescendo até zero nas extremidades do movimento. A expressão da energia cinética, com $v(x)$ derivado da função posição no MHS, pode ser escrita como:

$$E_c(x) = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k(a^2 - x^2). \quad (24)$$

Essa relação revela que a energia cinética depende da diferença entre a amplitude quadrada e o quadrado do deslocamento, o que justifica a concavidade voltada para baixo da curva cinética.

A linha horizontal constante, identificada como $E_m(x)$, corresponde à energia mecânica total do sistema, dada pela expressão 22 e permanece inalterada ao longo de toda a oscilação. Essa constância representa, graficamente, a conservação da energia mecânica em sistemas ideais, nos quais não há dissipação por atrito ou resistência do meio.

A simetria das curvas de E_p e E_c em torno da posição de equilíbrio ilustra a alternância contínua entre essas duas formas de energia, com a soma de ambas igualando-se, em qualquer posição, à energia total do sistema. Tal dinâmica é fundamental não apenas para o entendimento do MHS clássico, mas também para a transição ao modelo quântico, no qual essas energias assumem valores discretos.

4.3 O vácuo eletromagnético

De acordo com a Mecânica Quântica, todos os campos quânticos, sejam eles de matéria ou de força, apresentam energia de ponto zero, sendo essa uma característica fundamental dos campos quantizados. O campo eletromagnético, o mais antigo e amplamente estudado, é essencial para a compreensão das propriedades das teorias de campos quânticos, não apenas por sua relevância prática, mas também por ser representativo das demais teorias dessa natureza (Milonni, 1994, p. 35).

4.3.1 O Oscilador Harmônico Quântico

O MHS no contexto macroscópico, constitui um modelo teórico amplamente aplicável à descrição de diversos fenômenos oscilatórios, como as vibrações em sistemas massa-mola, as oscilações de pêndulos físicos e as vibrações estruturais em edificações e pontes. Nesse regime, o comportamento energético do sistema é regido pelas leis da Mecânica Clássica, segundo as quais a energia pode variar continuamente entre seus limites mínimo e máximo. A troca entre energia cinética e energia potencial ocorre de maneira fluida, sem restrições discretas quanto aos valores energéticos que o sistema pode assumir.

Contudo, ao transpor a análise para as escalas microscópicas, isto é, para o domínio de átomos, moléculas e partículas subatômicas, revela-se um limite intrínseco à aplicabilidade do formalismo clássico, exigindo a adoção dos princípios da Mecânica Quântica. Neste regime, torna-se necessário adotar os princípios da Mecânica Quântica, os quais introduzem profundas modificações no entendimento do comportamento oscilatório da matéria.

Um dos aspectos mais notáveis dessa nova descrição é a quantização da energia. Diferentemente do regime clássico, onde a energia pode variar de modo contínuo, em sistemas quânticos a energia total é restrita a um conjunto discreto de valores, denominados níveis de energia, cujas separações são bem definidas e determinadas pelas propriedades do sistema. Esta propriedade, conhecida como quantização, estabelece que os estados permitidos de um sistema oscilatório, como, por exemplo, uma molécula diatômica, são restritos a múltiplos inteiros de uma unidade mínima de energia, com separações energéticas bem definidas entre si.

O paradigma clássico do oscilador harmônico consiste em uma partícula de massa m conectada a uma mola ideal de constante elástica k . Como previamente discutido, a dinâmica do sistema é regida pela Lei de Hooke (equação 1), segundo a qual a força restauradora é proporcional e oposta ao deslocamento em relação à posição de equilíbrio em que, ignorando o atrito, a solução é

$$x(t) = A\sin(\omega t) + B\cos(\omega t), \quad (25)$$

na qual ω é a frequência angular natural e a energia potencial é dada pela equação 20 (Griffiths, 2011, p. 30).

O problema do Oscilador Harmônico Quântico (OHQ) consiste na resolução da equação de Schrödinger independente do tempo, considerando-se um potencial harmônico da forma:

$$E(x) = \frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2. \quad (26)$$

A equação de Schrödinger para o problema do oscilador harmônico é

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2\psi(x) = E\psi(x), \quad (27)$$

onde \hbar é a constante de Planck reduzida ($\hbar = h/2\pi$, no qual $h = 6,53 \times 10^{-34} \text{J.s}$) e $\psi(x)$ é a função de onda.

Esse problema admite duas abordagens distintas. A primeira consiste na resolução direta da equação diferencial associada utilizando o método das séries de potências para determinar as soluções analíticas. A segunda abordagem, de natureza algébrica, baseia-se na introdução de operadores de criação e aniquilação (também conhecidos como operadores escada), que permitem obter os autoestados e autovalores de forma sistemática (Griffiths, 2011, p. 31). Ambas as abordagens determinam as energias permitidas.

Em razão de sua elegância formal e da eficiência na obtenção de resultados, adota-se, neste estudo, a abordagem algébrica, fundamentada na introdução dos operadores de criação e aniquilação. Conforme destacam Sakurai e Napolitano (2013, p. 88), tal método permite uma determinação sistemática dos autovalores e autoestados, ao mesmo tempo em que favorece uma compreensão aprofundada da estrutura discreta dos níveis de energia característicos de sistemas quantizados.

Além de simplificar significativamente os cálculos, a abordagem algébrica revela-se particularmente eficaz na análise das flutuações do vácuo quântico, bem como no entendimento das propriedades fundamentais dos campos quantizados. De modo semelhante, Griffiths (2011, p. 31) ressalta que, ao evitar a complexidade técnica inerente ao método das séries de potências, o formalismo algébrico configura-se como uma ferramenta didaticamente mais acessível e conceitualmente mais direta para a construção dos estados quânticos.

Considerando que esta seção tem por objetivo explorar as implicações físicas e conceituais associadas à quantização da energia e às flutuações do vácuo, conclui-se que o tratamento algébrico é o mais apropriado aos propósitos aqui estabelecidos. A partir da equação da equação 27, dado que o momento linear é definido por

$$\hat{p} = -i\hbar\frac{d}{dx}, \quad (28)$$

substituindo na equação 27, obtemos

$$\frac{\hat{p}^2\psi(x)}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2\psi(x) = E\psi(x) \quad (29)$$

ou

$$\frac{1}{2m}[\hat{p}^2 + (m\omega x)^2]\psi(\hat{x}) = E\psi(x). \quad (30)$$

O objetivo é fatorar o Hamiltoniano:

$$\hat{H} = \frac{1}{2m}[\hat{p}^2 + (m\omega\hat{x})^2]. \quad (31)$$

Entretanto, como \hat{p} e \hat{x} são operadores não comutativos, a aplicação direta de fatorações algébricas usuais torna-se inadequada. De fato, a não comutatividade implica que $\hat{x}\hat{p} \neq \hat{p}\hat{x}$ conforme se evidencia pela relação fundamental de comutação da Mecânica Quântica (Griffiths, 2011, p. 32). Portanto utilizaremos os operadores escada. Primeiramente, dividiremos os dois lados do Hamiltoniano (Equação 31) por $\hbar m$, obtendo

$$\frac{\hat{H}}{\hbar m} = \frac{1}{2\hbar\omega m}\hat{p}^2 + \frac{m\omega\hat{x}^2}{2\hbar}, \quad (32)$$

agora, aplicando ao contexto dos operadores na Mecânica Quântica, para o caso dos operadores de criação e aniquilação, temos

$$a^- = c_1\hat{x} + ic_2\hat{p}, \quad (33)$$

e

$$a^+ = c_1\hat{x} - ic_2\hat{p}, \quad (34)$$

nos quais \hat{x} é o operador posição, \hat{p} é o operador momento e c_1 e c_2 são constantes reais.

Para melhor organizar o raciocínio, usaremos uma expressão geral:

$$a^\pm = c_1\hat{x} \mp ic_2\hat{p}, \quad (35)$$

Definindo-se os operadores escada a^- e a^+ como combinações lineares dos operadores de posição e momento, atribuem-se às constantes os seguintes valores, de modo a assegurar a consistência dimensional e a correta normalização das relações de comutação. Assim, as constantes reais são dadas por:

$$c_1 = \sqrt{\frac{\omega m}{2\hbar}} \quad (36)$$

e

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}}. \quad (37)$$

Com os valores das constantes definidos, logo a expressão 33 é

$$a^\pm = \sqrt{\frac{\omega m}{2\hbar}} \hat{x} \mp i \frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}} \hat{p} = \frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}} (\omega m \hat{x} \mp i \hat{p}), \quad (38)$$

no qual temos o operador de aniquilação (ou abaixamento):

$$a = \frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}} (\omega m \hat{x} + i \hat{p}) \quad (39)$$

e o operador de criação (ou levantamento):

$$a^+ = \frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}} (\omega m \hat{x} - i \hat{p}). \quad (40)$$

Fazendo o produto aa^\dagger , temos

$$a^- a^+ = \frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}} (\omega m \hat{x} + i \hat{p})(\omega m \hat{x} - i \hat{p}) \quad (41)$$

$$a^- a^+ = \frac{1}{\hbar\omega} \left(\frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 \hat{x}^2 \right) - \frac{i}{2\hbar} (\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x}). \quad (42)$$

O segundo termo entre parênteses na equação 42 representa o comutador dos operadores posição e momento, definido como por $[\hat{x}, \hat{p}] = (\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x})$. Esta relação, fundamental na Mecânica Quântica, expressa a não comutatividade desses operadores e está diretamente vinculada ao Princípio da Incerteza de Heisenberg.

$$a^- a^+ = \frac{1}{\hbar\omega} H - \frac{i}{2\hbar} [\hat{x}, \hat{p}]. \quad (43)$$

Para determinar o valor explícito deste comutador $[\hat{x}, \hat{p}]$, consideremos sua ação sobre uma função de prova $f(x)$

$$[\hat{x}, \hat{p}]f(x) = \hat{x}\hat{p}f(x) - \hat{p}\hat{x}f(x), \quad (44)$$

como $\hat{x} = x$ e $\hat{p} = -\hbar d/dx$, temos

$$[\hat{x}, \hat{p}]f(x) = x \left(\frac{\hbar}{i} \frac{df(x)}{dx} \right) - \left(\frac{\hbar}{i} \frac{d}{dx} \right) xf(x) = i\hbar f(x). \quad (45)$$

Logo temos que

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i \hbar, \quad (46)$$

então

$$a^- a^+ = \frac{1}{\hbar\omega} \hat{H} - \frac{i}{2\hbar} i \hbar = \frac{1}{\hbar\omega} \hat{H} + \frac{1}{2}. \quad (47)$$

Dessa forma, o Hamiltoniano do oscilador harmônico quântico pode ser expresso em função dos operadores escada, segundo a relação:

$$\hat{H} = \left(a^- a^+ + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega. \quad (48)$$

Em geral, retornando à equação de Schrödinger independente do tempo, em que $H\psi = E\psi$, temos

$$\hbar\omega \left(a^\pm a^\mp + \frac{1}{2} \right) \psi(x) = E\psi(x). \quad (49)$$

Em particular, o parêntese de Poisson par $[a, a^\dagger]$, aplicando também uma função teste $f(x)$ temos

$$[a^-, a^+]f(x) = \left(\frac{1}{\hbar\omega} \hat{H} + \frac{1}{2} \right) f(x) - \left(\frac{1}{\hbar\omega} \hat{H} - \frac{1}{2} \right) f(x) = 1f(x). \quad (50)$$

Portanto, o parêntese de Poisson para $[a^-, a^+]$ é

$$[a^-, a^+] = 1. \quad (51)$$

Agora temos duas propriedades importantes para os operadores a^- e a^+ :

1ª propriedade: Se ψ é um autovetor do Hamiltoniano com autovalor E ($H\psi = E\psi$), então $a^+\psi$ é também um autovetor, correspondente ao autovalor $E + \hbar\omega$. Isto evidencia que o operador a^+ atua elevando o sistema a um nível energético superior, sendo, por isso, denominado operador de criação.

Vamos demonstrar essa propriedade, onde

$$\hat{H}(a^+\psi) = \hbar\omega \left(a^+a^- + \frac{1}{2} \right) a^+\psi = \hbar\omega a^+ \left(a^-a^+ + \frac{1}{2} \right) \psi, \quad (52)$$

como

$$[a^-, a^+] = a^-a^+ - a^+a^- = 1, \quad (53)$$

logo

$$a^-a^+ = a^+a^- + 1, \quad (54)$$

Então temos que

$$\hat{H}(a^+\psi) = \hbar\omega a^+ \left(a^+a^- + 1 + \frac{1}{2} \right) \psi. \quad (55)$$

De forma análoga o que se obteve na equação 47 em que apresenta a^-a^+ , temos para a^+a^- :

$$a^+a^- = \frac{1}{\hbar\omega} \hat{H} - \frac{1}{2}, \quad (56)$$

portanto,

$$\hat{H}(a^+\psi) = \hbar\omega a^+ \left(\frac{1}{\hbar\omega} \hat{H} - \frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2} \right) \psi = (E + \hbar\omega)(a^+\psi) \quad (57)$$

E pelo mesmo motivo, temos a segunda propriedade:

2ª propriedade: Seja ψ um autovetor do Hamiltoniano com autovalor E , ou seja $H\psi = E\psi$. Então. O vetor de estado $a\psi$ é também um autovetor de H , associado ao autovalor $E - \hbar\omega$. Esse resultado demonstra que o operador a . Denominado operador de aniquilação, atua reduzindo o sistema a um nível energético inferior.

Seguindo os mesmos passos da demonstração anterior para $\hat{H}(a^+\psi)$, agora, para $\hat{H}(a^-\psi)$, temos

$$\hat{H}(a^-\psi) = \hbar\omega a^- \left(a^-a^+ - \frac{1}{2} \right) \psi = (E - \hbar\omega)(a^-\psi) \quad (58)$$

Supomos agora aplicar o operador aniquilação (a^-) repetidas vezes, em algum momento o processo chega ao estado fundamental ψ_0 , pois não é possível abaixar a energia além de E_0 .

Para determinar a função de onda do estado fundamental $\psi_0(x)$, impõe-se a

condição de aniquilação:

$$a\psi_0 = 0, \quad (59)$$

o que traduz a inexistência de estados com energia inferior a ψ_0 . A partir dessa condição, obtém-se uma equação diferencial cuja solução corresponde a uma função de tipo gaussiano, compatível com a natureza do potencial harmônico. Logo,

$$\frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}}(\omega mx + i\hat{p})\psi_0 = 0 \quad (60)$$

Como $\hat{p} = -\hbar d/dx$, temos

$$\frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}}\left(\omega mx\psi_0 + i\frac{d\psi_0}{dx}\right) = 0, \quad (61)$$

multiplicando ambos os lados da equação por $\sqrt{2\hbar m\omega}$ para simplificar

$$\frac{d\psi_0}{dx} = -\omega mx\psi_0. \quad (62)$$

Dividindo ambos os lados por i e fazendo a separação de variáveis, temos

$$\frac{d\psi_0}{\psi_0} = -\omega m\hat{x}dx. \quad (63)$$

Aplicando integral aos dois lados da igualdade em seguida o exponencial, obtém-se

$$\psi_0 = Ae^{-\frac{m\omega x^2}{2\hbar}}, \quad (64)$$

no qual A é a constante.

Aplicando a normalização

$$A^2 = \sqrt{\frac{m\omega}{\hbar\pi}}, \quad (65)$$

portanto:

$$\psi_0(x) = \left(\frac{m\omega}{\hbar\pi}\right)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{1m\omega x^2}{2\hbar}}, \quad (66)$$

que é a equação do estado fundamental.

Para determinar a energia do estado fundamental, exploraremos o fato que da

$a\psi_0 = 0$ em $H\psi_0 = E_0\psi_0$, logo

$$E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega, \quad (67)$$

Esse resultado confirma a energia de ponto zero, característica inevitável do regime quântico

Com as soluções da equação do estado fundamental (Equação 66) e a energia do estado fundamental (Equação 67), percebe-se que, ambas são obtidas aplicando n vezes. Então, de forma geral, a equação do estado pode ser escrita como

$$\psi_n(x) = A_n(a^+)^n\psi_0(x), \quad (68)$$

e a energia de estado como

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega, \quad (69)$$

no qual E_n é a energia do nível n ($n = 1, 2, 3, \dots, n$)

“Assim, a energia do estado fundamental, $\hbar\omega/2$, e o espaçamento dos níveis de energia é constante, a distância entre níveis vizinhos é $\hbar\omega$ que é a energia do fóton emitido ou absorvido em uma transição do tipo dipolo elétrico” (Tipler; Llewellyn, 2014, p.159-160).

Este resultado implica que, mesmo no estado fundamental ($n = 0$), o sistema apresenta uma energia distinta de zero, denominada energia de ponto zero, a qual decorre diretamente da impossibilidade de repouso absoluto, imposta pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg (Cougo-Pinto; Farina; Tort, 2000, p. 126).

4.3.2 Ondas eletromagnéticas

De acordo com a Física contemporânea, todos os campos quânticos, sejam eles de matéria ou de força, apresentam energia de ponto zero, sendo essa uma característica fundamental dos campos quantizados. O campo eletromagnético, o mais antigo e amplamente estudado, é essencial para a compreensão das propriedades das teorias de campos quânticos, não apenas por sua relevância prática, mas também por ser representativo das demais teorias dessa natureza (Milonni, 1994, p. 35).

As ondas eletromagnéticas são responsáveis por muitos fenômenos essenciais do nosso dia a dia, desde a luz que enxergamos até as tecnologias que utilizamos para nos conectar como o rádio, Wi-Fi e redes móveis. Sem essas ondas, não teríamos transmissões de TV,

comunicação via satélite nem exames médicos como o raio X.

As ondas eletromagnéticas são perturbações que se propagam no espaço a partir do resultado das variações do campo elétrico e do campo magnético, essa variação de ambos os campos dá origem ao outro campo respectivo gerando uma perturbação autossustentável. A Figura 4 mostra a propagação da onda eletromagnética formada pelos campos elétrico e magnético perpendiculares entre si. A propagação da onda também é perpendicular aos campos que a formam.

A velocidade de propagação no vácuo das ondas eletromagnéticas é de 300.000 km/s . Essa velocidade depende das propriedades elétricas e magnéticas do meio. A velocidade dessa onda pode ser obtida através da equação:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (70)$$

No qual ϵ e μ são as constantes de permissividade elétrica e permeabilidade magnética, respectivamente.

No vácuo, a velocidade da onda eletromagnética é dada pela equação:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}. \quad (71)$$

No qual ϵ_0 e μ_0 são as constantes de permissividade elétrica no vácuo e permeabilidade magnética no vácuo, respectivamente. Repare que quando tratamos da velocidade da onda eletromagnética no vácuo ou da luz no vácuo, a representamos pela letra c , que deriva-se da palavra do latim *celeritas* ou ligeireza.

As ondas eletromagnéticas transportam energia através da oscilação conjunta dos campos elétrico e magnético, propagando-se inclusive no vácuo. Diferentemente das ondas mecânicas, que precisam de um meio material para se deslocar, as ondas eletromagnéticas podem viajar pelo espaço sem necessidade de um meio físico, permitindo, por exemplo, que a luz do Sol chegue à Terra. Elas são formadas quando uma carga elétrica em movimento oscilatório, gerando variações no campo elétrico que, por sua vez, induzem variações no campo magnético, criando uma relação de dependência mútua entre os dois campos.

Essas ondas não necessitam de um meio material para se deslocar, pois sua propagação é sustentada pela interação entre os campos. As ondas eletromagnéticas abrangem uma ampla faixa de frequências e comprimentos de onda que compõem o espectro eletromagnético, o qual inclui ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível,

ultravioleta, raios X e raios gama, cada uma com características e aplicações distintas.

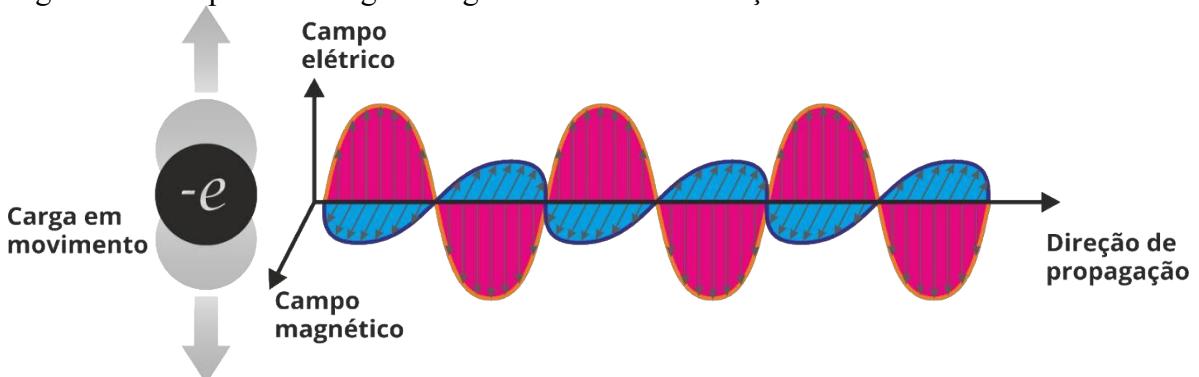
Essas ondas não necessitam de um meio material para se deslocar, pois sua propagação é sustentada pela interação entre os campos. As ondas eletromagnéticas abrangem uma ampla faixa de frequências e comprimentos de onda que compõem o espectro eletromagnético, o qual inclui ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama, cada uma com características e aplicações distintas.

4.3.3 Campo eletromagnético clássico

O campo eletromagnético é uma região do espaço onde cargas elétricas em movimento exercem influência umas sobre as outras. Esse campo é descrito pela teoria clássica do eletromagnetismo, formulada por James Clerk Maxwell, que mostrou que mudanças em campos elétrico e magnético podem se propagar pelo espaço na forma de ondas eletromagnéticas.

Essas ondas são geradas sempre que cargas elétricas aceleram ou oscilam (Figura 4). Um exemplo comum são as ondas de rádio, utilizadas em transmissões AM e FM. Em uma antena transmissora, cargas elétricas oscilam em alta frequência, gerando ondas eletromagnéticas que se propagam e podem ser captadas por antenas receptoras. A frequência dessas ondas é a mesma frequência com que as cargas oscilam na antena transmissora.

Figura 4 – Campo eletromagnético gerado devido a oscilação de um elétron.



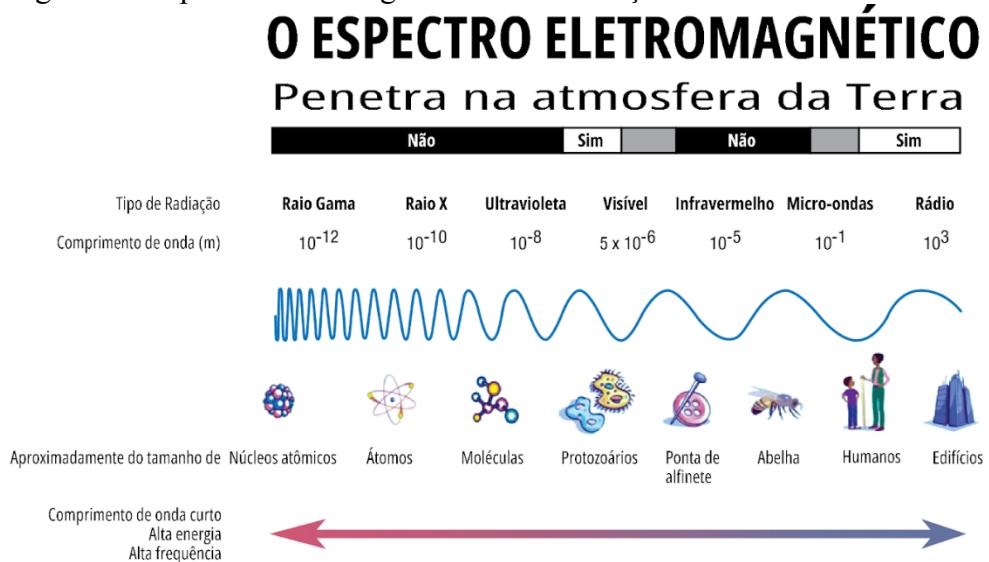
Fonte: Elaborado pelo autor.

As ondas eletromagnéticas não precisam de um meio material para se propagar, ao contrário das ondas sonoras, que necessitam do ar ou de outro meio. Isso permite que a radiação eletromagnética viaje pelo vácuo, como ocorre com a luz do Sol que chega até a Terra.

Além das ondas de rádio, há outros tipos de ondas eletromagnéticas, organizadas no chamado espectro eletromagnético (Figura 5). Ondas com menor frequência e maior comprimento de onda, como as ondas de rádio e micro-ondas, são usadas em comunicações e

tecnologia. Já ondas com maior frequência e menor comprimento de onda, como os raios X e raios gama, possuem maior energia e são utilizadas em exames médicos e tratamentos.

Figura 5 – Espectro eletromagnético e sua interação com a atmosfera terrestre.



Fonte: MY NASA DATA. **Electromagnetic Spectrum Diagram**. [s. l.; s. d.]. Disponível em: https://mynasadata.larc.nasa.gov/sites/default/files/2021-08/Electromagnetic_Spectrum_Diagram%20flipped_FINAL.pdf. Acesso em: 30 mar. 2025

Os raios X, por exemplo, podem ser produzidos quando elétrons em alta velocidade colidem com um alvo metálico. Esse fenômeno gera um tipo de radiação chamada *bremssstrahlung*, ou radiação de freamento, pois a energia dos elétrons é dissipada ao serem desacelerados rapidamente. Além disso, os raios X também podem ser gerados quando elétrons dentro dos átomos mudam de nível de energia, liberando quantidades específicas de energia na forma de luz invisível para os olhos humanos.

Outro exemplo importante de radiação eletromagnética é a radiação síncrotron, que ocorre quando partículas carregadas, como elétrons e pósitrons, são aceleradas em trajetórias circulares dentro de campos magnéticos muito intensos. Esse movimento acelerado faz com que elas emitam ondas eletromagnéticas de alta energia. Nos laboratórios, essa radiação é utilizada para análise de materiais, exames médicos e estudos avançados em Física e Química.

Por fim, há também a radiação térmica, que ocorre quando um objeto aquece e emite ondas eletromagnéticas. Esse é o caso da radiação de corpo negro, que descreve a luz e o calor emitidos por objetos quentes, como o ferro incandescente, quando aquecido a altas temperaturas emitindo um brilho avermelhado ou alaranjado devido à excitação térmica de seus átomos ou a superfície do Sol.

O estudo do campo eletromagnético clássico nos permite compreender fenômenos essenciais do nosso cotidiano. No entanto, ao analisarmos a luz em escalas muito pequenas,

percebemos que ela não se comporta apenas como uma onda contínua, mas também como partículas discretas de energia chamadas fótons. Essa descoberta levou à formulação do campo eletromagnético quântico, um dos pilares da Mecânica Quântica.

4.3.4 Campo eletromagnético quântico

No modelo quântico do eletromagnetismo, a luz e outras ondas eletromagnéticas não são contínuas, mas compostas por pequenos pacotes discretos de energia chamados fótons. Assim como no Oscilador Harmônico Simples Quântico (OHS quântico), no qual a energia aparece em valores bem definidos, uma onda eletromagnética também pode ser descrita como um conjunto de fótons, cada um transportando uma quantidade específica de energia, determinada pela equação:

$$E_{n_\gamma} = \left(n + \frac{1}{2} \right) hf \quad (72)$$

Onde n_γ é o número de fótons e E_{n_γ} é a energia total associada à onda eletromagnética.

De forma análoga ao que ocorre no OHS quântico, a remoção de fótons da onda eletromagnética resulta na diminuição de sua energia. Quando todos os fótons são removidos, a onda deixa de existir, restando apenas a energia de ponto zero do campo eletromagnético, equivalente a $0,5hf$.

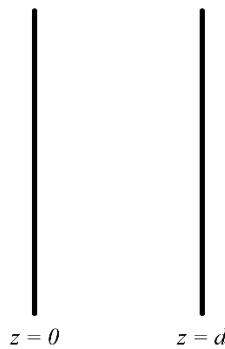
4.4 O Efeito Casimir

No âmbito da Mecânica Quântica, a concepção de vácuo sofreu uma reformulação profunda, distanciando-se da noção clássica de um espaço absolutamente vazio e inativo. A partir da quantização dos campos, o vácuo passou a ser compreendido como um estado físico dotado de propriedades dinâmicas, marcado pela presença de flutuações quânticas mesmo na ausência de partículas reais. Nesse contexto, emergem fenômenos notáveis que evidenciam a atividade do campo eletromagnético do vácuo, entre os quais se destaca o Efeito Casimir. Este efeito constitui uma evidência da realidade das flutuações do vácuo e ilustra, de maneira emblemática, a natureza não trivial do espaço vazio na teoria quântica de campos. Segundo Milonni (1993, p. 217), antes de sua formulação, já se reconheciam outras consequências das flutuações do vácuo, como a emissão espontânea, o deslocamento de Lamb e as forças de van

der Waals, contudo, é no Efeito Casimir que se observa de forma mais direta a atuação da energia de ponto zero entre superfícies condutoras.

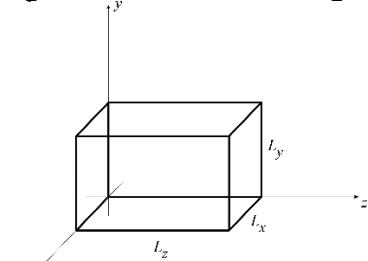
Em 1948, o físico holandês Hendrik Casimir demonstrou que uma das consequências do campo da energia de ponto zero é uma força de atração entre duas placas perfeitamente condutoras, descarregadas e separadas por uma distância d (Figura 6). Nessa seção será revisada o cálculo da força de Casimir.

Figura 6 – Representação do Efeito Casimir.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 – Cavidade retangular.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os modos apropriados ao interior de um paralelepípedo (Figura 7) com lados. Para paredes perfeitamente condutoras, as funções de modo que satisfazem a condição de contorno de que a componente tangencial do campo elétrico se anule nas paredes são

$$A(r) = A_x(r)\hat{i} + A_y(r)\hat{j} + A_z(r)\hat{k}. \quad (73)$$

A condição de normalização impõe que o modo total do campo vetorial seja normalizado no volume $V = L_x L_y L_z$, ou seja,

$$\int_0^L dx \int_0^L dy \int_0^{L_z} dz [A_x^2(r) + A_y^2(r) + A_z^2(r)] = 1. \quad (74)$$

Consideraremos primeiramente uma componente, A_x , essa normalização individual será

$$\int_0^L A_x^2(r) d^3r = a_x^2, \quad (75)$$

no qual a_x é o componente de polarização, e, esperasse, que $a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1$, garantindo-se a normalização total ao somar os três componentes.

A função $A_x(r)$ tem a seguinte forma:

$$A_x(r) = C \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z). \quad (76)$$

Substituindo 76 em 75, temos

$$\int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^2 \cos^2(k_x x) \sin^2(k_y y) \sin^2(k_z z) dx dy dz = a_x^2. \quad (77)$$

Resolvendo a integral, obtemos:

$$C^2 \left(\frac{L_x}{2}\right) \left(\frac{L_y}{2}\right) \left(\frac{L_z}{2}\right) = a_x^2, \quad (78)$$

$$C = \left(\frac{8}{V}\right)^{\frac{1}{2}} a_x, \quad (79)$$

logo, a forma normalizada de $A_x(r)$ é

$$A_x(r) = \left(\frac{8}{V}\right)^{\frac{1}{2}} a_x \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z). \quad (80)$$

O mesmo raciocínio se aplica para $A_y(r)$ e $A_z(r)$, com os fatores a_y e a_z :

$$A_y(r) = \left(\frac{8}{V}\right)^{\frac{1}{2}} a_y \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z), \quad (81)$$

$$A_z(r) = \left(\frac{8}{V}\right)^{\frac{1}{2}} a_z \sin(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z). \quad (82)$$

Considera-se a situação física geral da Figura 7. Ao se impor o limite em que $L_x = L_y = L$ e $L_z = d$, sob a restrição $L \gg d$, temos a situação de interesse. Logo,

$$V = L^2 L_z, \quad (83)$$

e

$$k_x = \frac{l\pi}{L}, k_y = \frac{m\pi}{L}, k_z = \frac{n\pi}{L}, \quad (84)$$

nos quais l, m e n podem assumir todos os valores inteiros positivos e zero.

Para que sejam satisfeitas as condições de transversalidade ($\nabla \cdot A = 0$), impõe-se, adicionalmente, a exigência de que

$$k_x A_x + k_y A_y + k_z A_z = \frac{\pi}{L} (l A_x + m A_y) + \frac{\pi}{L_z} (n A_z) = 0. \quad (85)$$

Dessa forma, há duas polarizações independentes, exceto quando um dos inteiros l , m ou n for igual a zero, situação na qual a equação 85 indica a existência de apenas uma polarização. Pode-se verificar facilmente que as equações 80, 81 e 82 descrevem funções de modo transversais que satisfazem tanto a equação de Helmholtz ($\nabla^2 A_o(r) + k^2 A_o(r) = 0$) no qual $k = \omega/c$ quanto a condição de que as componentes transversais do campo elétrico se anulem nas paredes da cavidade. Além disso, essas funções de modo são ortogonais entre si e obedecem à condição de normalização estabelecidas pela expressão 74.

Para o cálculo da força de Casimir, são necessárias as frequências permitidas definidas pelas expressões 84:

$$\omega_{lmn} = k_{lmn} c = \pi c \left(\frac{l^2}{L^2} + \frac{m^2}{L^2} + \frac{n^2}{L_z^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (86)$$

Portanto, a energia de ponto zero dentro da cavidade é

$$\sum_{l,m,n} '(2) \frac{1}{2} \hbar \omega_{lmn} = \sum_{l,m,n} ' \pi \hbar c \left[\frac{l^2}{L^2} + \frac{m^2}{L^2} + \frac{n^2}{L_z^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (87)$$

O símbolo de somatório com apóstrofo indica que, se qualquer um dos inteiros l, m e n for igual a zero, deve-se incluir apenas uma polarização (ou multiplicar por 1/2). O fator 2, decorre das duas polarizações independentes dos modos com $l, m, n \neq 0$.

Nesta situação, L é muito maior que $L_z=d$, logo podemos substituir as somas sobre

l e m na equação 87 por integrais:

$$\sum_{l,m,n} \rightarrow \sum_n' \left(\frac{L}{\pi}\right)^2 \iint dk_x dk_y \quad (88)$$

e

$$E(d) = \sum_{l,m,n} ' (2) \frac{1}{2} \hbar \omega_{lmn} \rightarrow \left(\frac{L^2}{\pi^2} (\hbar c) \sum_n' \int_0^\infty dk_x \int_0^\infty dk_y \right) \times \left(k_x^2 + k_y^2 + \frac{n^2 \pi^2}{d^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (89)$$

A soma sobre os modos de oscilação do campo eletromagnético evidencia que a energia de ponto zero associada ao vácuo diverge, resultando em um valor infinitamente grande, mesmo quando considerada em um volume finito. Tal divergência decorre do fato de que há infinitos modos de frequência, cada um contribuindo com uma parcela finita de energia, o que, em conjunto, leva a uma energia total do vácuo formalmente infinita.

Se a distância d entre as placas também for considerada arbitrariamente grande, a soma sobre os modos discretos n pode ser substituída por uma integral contínua. Nessa aproximação, a expressão para a energia de ponto zero, conforme apresentada anteriormente na equação 89, assume a forma integral correspondente a

$$E(\infty) = \frac{L^2}{\pi^2} (\hbar c) \frac{d}{\pi} \int_0^\infty dk_x \int_0^\infty dk_y \int_0^\infty dk_z (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (90)$$

que também é infinito.

A energia potencial do sistema quando as placas estão separadas por uma distância d é dada por $U = E(d) - E(\infty)$, logo, a energia necessária para trazer as placas desde uma distância muito grande até uma distância d é

$$U(d) = \frac{L^2 \hbar c}{\pi^2} \left[\sum_n' \int_0^\infty dk_x \int_0^\infty dk_y \left(k_x^2 + k_y^2 + \frac{n^2 \pi^2}{d^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right. \\ \left. - \frac{d}{\pi} \int_0^\infty dk_x \int_0^\infty dk_y \int_0^\infty dk_z (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (91)$$

Ao realizar a mudança de variáveis para coordenadas polares u e θ no plano bidimensional definido pelos vetores de onda k_x e k_y é transformada em $udu d\theta$:

$$U(d) = \frac{L^2 \hbar c}{\pi^2} \left(\frac{\pi}{2} \right) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} du u \left(u^2 + \frac{n^2 \pi^2}{d^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{d}{\pi} \int_0^{\infty} dk_z \int_0^{\infty} du u (u^2 + k_z^2)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (92)$$

considerando que a integração se restringe ao primeiro quadrante do plano $k_x \times k_y$, o ângulo polar θ varia no intervalo de 0 a $\pi/2$. Fisicamente, pode-se argumentar a introdução de uma função de corte $f(k)$ definida como $f(k) = f\sqrt{u^2 + k_z^2}$, que atua como fator de supressão para frequências muito elevadas. Essa função é construída de modo que $f(k) = 1$ para $k \ll k_m$ e $f(k) = 0$ para $k \gg k_m$, restringindo, assim, as contribuições de modos de alta frequência.

Fisicamente, essa modificação é justificada pelo fato de que a hipótese de paredes perfeitamente condutoras deixa de ser válida para comprimentos de onda extremamente curtos, em especial aqueles comparáveis à escala atômica. Com base nesse argumento, adota-se que o parâmetro de corte satisfaz $k_m \approx 1/a_0$, sendo a_0 o raio de Bohr. Com isso, assume-se que o efeito Casimir ocorre predominantemente em regimes de baixas frequências e que as contribuições relativísticas de altas energias não desempenham papel significativo na formulação do problema.

Dessa forma, a expressão para a energia potencial $U(d)$ anteriormente obtida, passa a incorporar explicitamente essa função de corte, resultando na seguinte forma regularizada da equação 92

$$U(d) = \frac{L^2 \hbar c}{\pi^2} \left(\frac{\pi}{2} \right) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} du u \left(u^2 + \frac{n^2 \pi^2}{d^2} \right)^{\frac{1}{2}} f \left[\left(u^2 + \frac{n^2 \pi^2}{d^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] - \frac{d}{\pi} \int_0^{\infty} dk_z \int_0^{\infty} du u (u^2 + k_z^2)^{\frac{1}{2}} f \left[(u^2 + k_z^2)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (93)$$

$$U(d) = \frac{L^2 \hbar c}{4\pi} \left(\frac{\pi^3}{d^3} \right) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} dx (x^2 + n^2)^{\frac{1}{2}} f \left[\frac{\pi}{d} (x + n^2)^{\frac{1}{2}} \right] - \int_0^{\infty} dk \int_0^{\infty} dx (x^2 + k^2)^{\frac{1}{2}} f \left[\frac{\pi}{d} (x + k^2)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}. \quad (94)$$

A partir da introdução de novas variáveis de integração, definidas por $x = u^2 d^2 / \pi^2$ e $k = k_z d / \pi$, é possível reescrever a expressão da energia potencial associada ao efeito Casimir em uma forma mais conveniente para o tratamento analítico:

$$U(d) = \left(\frac{\pi^2 \hbar}{4d^3}\right) L^2 \left[\frac{1}{2} F(0) + \sum_{n=1}^{\infty} F(n) - \int_0^{\infty} k F(k) \right], \quad (95)$$

na qual a função $F(k)$ é definida por:

$$F(k) \equiv \int_0^{\infty} dx (x + k^2)^{\frac{1}{2}} f \left[\frac{\pi}{d} (x + k^2)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (96)$$

Aplicando a soma da fórmula de Euler-Maclauri, temos

$$\sum_{n=1}^{\infty} F(n) - \int_0^{\infty} k F(k) = -\frac{1}{2} F(0) - \frac{1}{12} F'(0) + \frac{1}{720} F'''(0) \dots \quad (97)$$

sob a condição de que $F(\infty) \rightarrow 0$. Para determinar as derivadas de ordem superior, observa-se que

$$F(k) = \int_{k^2}^{\infty} \sqrt{u} du f \left(\frac{\pi}{d} \sqrt{u} \right), \quad (98)$$

$$F'(k) = -2k^2 f \left(\frac{\pi}{d} k \right). \quad (99)$$

Assim, considerando que $F'(0) = 0$, $F'''(0) = -4$ e que todas as derivadas superiores da função de corte $f(k)$ se anulam em $k = 0$, conclui-se que

$$\sum_{n=1}^{\infty} F(n) - \int_0^{\infty} dk F(k) = -\frac{1}{2} F(0) - \frac{4}{720} \quad (100)$$

substituindo na equação 95 obtemos,

$$U(d) = \left(\frac{\pi^2 \hbar c}{4d^3}\right) L^2 \left(\frac{-4}{720} \right) = -\left(\frac{\pi^2 \hbar c}{720 d^3}\right) L^2 \quad (101)$$

Esse resultado é finito e independente da função de corte. A força atrativa por unidade de área entre as placas é, portanto, dada por:

$$F(d) = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^4} \quad (102)$$

Esse é o valor da força de Casimir. Conclui-se que as variações na energia de ponto zero do vácuo eletromagnético, embora originadas de quantidades infinitas, podem resultar em efeitos físicos finitos e mensuráveis.

5 METODOLOGIA

5.1 O Produto Educacional

O produto educacional desenvolvido nesta pesquisa intitula-se “Conexões Quânticas: vibrações, ondas e efeito Casimir”. Trata-se de uma proposta didática orientada pelos pressupostos da aprendizagem significativa de David Ausubel e fundamentada no uso de analogias experimentais como recurso metodológico para o ensino de conceitos da Mecânica Quântica na Educação Básica, em especial no contexto do Ensino Médio.

A proposta busca atenuar a lacuna existente entre os conteúdos tradicionalmente abordados em sala de aula e os avanços teóricos da Física Moderna e Contemporânea, possibilitando a inserção de noções introdutórias de Mecânica Quântica por meio de uma abordagem acessível, contextualizada e experimental. O foco da proposta concentra-se sobre o fenômeno conhecido como Efeito Casimir, consequência da manifestação das flutuações do vácuo quântico, tema de grande relevância tanto no campo da pesquisa científica quanto na popularização da ciência, mas cuja abstração representa um desafio particular para o ensino da Educação Básica.

Diante desse desafio, o produto educacional aqui apresentado consiste em um arranjo hidrodinâmico, baseado em ondas de água, concebido para representar por analogia aspectos do efeito Casimir, possibilitando manipulação direta pelos estudantes, observação de padrões ondulatórios e discussão guiada sobre ondas estacionárias e aproximação de placas; emprega materiais de fácil obtenção, apresenta baixa complexidade de montagem e operação e é compatível com a infraestrutura usual de laboratórios escolares e articulado a uma sequência de atividades didáticas escalonadas que compreendem desde a exploração de conceitos clássicos, como vibrações, ressonância e incerteza, até a introdução progressiva da ideia de flutuações quânticas. O modelo didático análogo (MDA-EC) é acompanhado de três cadernos complementares: um manual para o professor, com orientações metodológicas e sugestões de abordagem, um caderno para o aluno, com textos acessíveis e questões investigativas e o manual de fabricação do MDA-EC. Os materiais foram elaborados para permitir flexibilidade de aplicação em diferentes contextos escolares, respeitando as particularidades de infraestrutura e perfil discente.

A proposta visa, portanto, não apenas facilitar a abordagem de temas de fronteira da ciência, mas também fomentar uma prática docente mais investigativa, exploratória e reflexiva, alinhada às competências e habilidades previstas na BNCC para a área de Ciências

da Natureza e suas Tecnologias.

5.2 Caraterização da pesquisa

Esta pesquisa insere-se no campo do Ensino de Física, com ênfase na formação científica crítica e no desenvolvimento de práticas pedagógicas inovadoras voltadas para a Educação Básica ao nível de Ensino Médio. Sua abordagem é qualitativa, pois, de acordo com Lüdke e André (1986, p. 11), a abordagem qualitativa “supõe o contato direto e prolongado do pesquisador com o ambiente e a situação que está sendo investigada”. Tal perspectiva se concretiza neste estudo a partir da atuação direta do autor como professor-pesquisador, inserido no cotidiano da escola pública e responsável pela aplicação integral da proposta didática. O envolvimento contínuo com os sujeitos da pesquisa e com os desafios estruturais e pedagógicos do contexto escolar permitiu a construção de uma compreensão situada, sensível às interações, às mediações e às transformações observadas ao longo do processo de implementação do produto educacional. Assim, a investigação valoriza a complexidade do ambiente educativo e busca interpretar os sentidos atribuídos pelos próprios participantes à experiência didática, em consonância com os pressupostos da abordagem qualitativa.

A pesquisa qualitativa ou naturalística, segundo Bogdan e Biklen (1982), caracteriza-se pela coleta de dados de natureza descritiva, produzidos no contato direto do pesquisador com o campo empírico e privilegia os processos em detrimento dos produtos e busca representar a perspectiva dos participantes. Essa concepção também norteia o presente trabalho, no qual o foco recai sobre a vivência pedagógica, a mediação docente e as interpretações que emergem da interação entre os sujeitos e o modelo didático proposto. Com isso, valoriza-se a compreensão do processo educativo em sua complexidade, com ênfase na construção de sentidos, nas adaptações realizadas em sala de aula e nos modos pelos quais os alunos ressignificam os conceitos científicos mobilizados.

Essa pesquisa é de natureza aplicada, pois busca “gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos” (Gerhardt; Silveira, 2009, p. 35), especificamente no campo do ensino de Física Moderna no Ensino Médio. Ao mesmo tempo, caracteriza-se como uma investigação de caráter exploratório, na medida em que visa proporcionar maior familiaridade com um problema pedagógico ainda pouco abordado, a inserção de conceitos da Mecânica Quântica na Educação Básica, com o propósito de torná-lo mais explícito e subsidiar a elaboração de soluções didáticas viáveis. Nesse sentido, a proposta envolve a concepção, aplicação e análise de um produto educacional baseado em um modelo

análogo ao Efeito Casimir, que busca contribuir para o ensino de tópicos avançados da Física, notadamente as flutuações do vácuo quântico, utilizando recursos acessíveis e adaptáveis à realidade da escola pública.

Do ponto de vista epistemológico, o trabalho adota uma abordagem construtivista, compreendendo o conhecimento como uma construção ativa do sujeito, mediada pela interação com objetos, fenômenos e situações contextualizadas. Nesse sentido, a pesquisa dialoga com os fundamentos da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, que destaca a importância dos subsunções cognitivos já presentes na estrutura mental dos alunos como ponto de partida para a incorporação de novos significados.

Como estratégia metodológica central, adotou-se o ensino por analogias experimentais, permitindo a transposição didática de fenômenos complexos da Física Quântica para representações observáveis no mundo macroscópico. Tal abordagem potencializa o envolvimento do estudante por meio da experimentação concreta e da visualização de padrões, ao mesmo tempo em que favorece o desenvolvimento do pensamento abstrato e da argumentação científica.

A investigação foi realizada em uma escola pública estadual, com aplicação direta pelo autor da pesquisa em uma turma da Educação de Jovens e Adultos (EJA) do Ensino Médio. Essa escolha decorre da necessidade de compreender a eficácia pedagógica do modelo didático em um contexto marcado por diversidade etária, heterogeneidade de experiências escolares e desafios estruturais recorrentes na rede pública. Os dados coletados foram predominantemente de natureza qualitativa, consistindo em registros escritos dos alunos, fotografias, observações de aula, respostas em questionário eletrônico e devolutivas verbais dos participantes.

Por fim, a presente pesquisa também se caracteriza por sua dimensão intervintiva, uma vez que propõe e analisa uma ação pedagógica concreta, com vistas a transformar práticas de ensino-aprendizagem e ampliar o acesso dos estudantes a temas relevantes da ciência contemporânea.

5.3 Estrutura do produto educacional

O produto educacional desenvolvido nesta pesquisa está integralmente disponibilizado em formato digital, com o objetivo de favorecer o acesso aberto e a replicabilidade da proposta em diferentes contextos escolares. Será hospedado em site pessoal do autor e em plataformas institucionais, como repositórios acadêmicos de acesso público, garantindo sua difusão e reutilização por docentes interessados na abordagem investigativa de

tópicos da Física Moderna na Educação Básica.

O material é composto por três documentos principais: (i) o Manual para o Professor, (ii) o Caderno para o Aluno, e (iii) um Guia de Construção do MDA-EC que em conjunto intitulam-se como Conexões Quânticas: vibrações, ondas e Efeito Casimir. O conjunto está estruturado de modo a permitir ao docente não apenas a implementação direta da proposta, mas também sua adaptação didática e metodológica, respeitando as particularidades das turmas e da infraestrutura disponível na escola.

O Manual para o Professor organiza-se em quatro sequências didáticas, uma de sensibilização introdutória e três encontros experimentais correspondentes a assuntos articulados em progressão conceitual. Cada sequência é composta por introdução teórica, orientações metodológicas, sugestões de mediação, atividades práticas e momentos de reflexão. As sequências são:

- i) sessão Introdutória de Sensibilização: Aborda a Lei de Moore e o processo de miniaturização dos transistores, articulando a Física Moderna com questões tecnológicas e de inovação. Funciona como eixo motivador para o início da sequência;
- ii) sessão de Experimentação 1 – Vibrações e Osciladores: Introduz os conceitos de oscilação e ressonância por meio do experimento do pêndulo simples e da caixa de ressonância com diapasão, estabelecendo a base fenomenológica para as discussões subsequentes;
- iii) sessão de Experimentação 2 – O Princípio da Incerteza de Heisenberg: Trabalha uma analogia experimental com um plano inclinado, possibilitando a construção de significados em torno da incerteza nas grandezas conjugadas da Mecânica Quântica, em uma linguagem acessível ao nível do Ensino Médio;
- iv) sessão de Experimentação 3 – Flutuações Quânticas do Vácuo e o Efeito Casimir: Culmina com a apresentação e utilização do modelo didático análogo ao Efeito Casimir a partir da propagação de ondas de água. O experimento visa tornar visível um fenômeno de base quântica por meio da analogia com padrões de interferência e confinamento de modos ondulatórios.

Cada sequência didática tem duração média de 40 minutos e apresenta sugestões de avaliação formativa, entendendo, segundo Miquelante *et al.* (2017, p. 267) a avaliação formativa de caráter eminentemente processual, através de um diálogo contínuo entre professor e aluno ao longo do percurso de ensino-aprendizagem, e um instrumento diagnóstico inicial (questionário) que pode ser aplicado de forma adaptada conforme o nível da turma. O material

destaca explicitamente as competências e habilidades da BNCC que são mobilizadas em cada etapa, organizadas em seção própria intitulada Referencial Normativo e Diretrizes Curriculares. O manual enfatiza a autonomia docente, sugerindo que os experimentos podem ser utilizados de forma sequencial, isolada, em estações rotativas ou combinadas com outras abordagens didáticas.

O Caderno para o Aluno está organizado em quatro capítulos, em correspondência direta com os experimentos desenvolvidos:

- a) Vibrações;
- b) Oscilador Harmônico Simples e Quântico;
- c) Flutuações do Vácuo Quântico;
- d) O Efeito Casimir.

O material apresenta textos introdutórios acessíveis, ilustrações e atividades escritas de observação, análise e reflexão. Sua estrutura é voltada para o desenvolvimento progressivo da compreensão conceitual, incentivando o protagonismo do estudante na construção do conhecimento.

Por fim, o terceiro documento consiste em um guia técnico detalhado para montagem do Modelo Didático análogo do Efeito Casimir com ondas de água. O guia apresenta a lista de materiais necessários, instruções com passo a passo da montagem com ilustrações, sugestões de ambientação e precauções e variações possíveis para a construção.

Os demais experimentos (pêndulo, diapasão e plano inclinado) são de domínio amplo, podendo ser reproduzidos com recursos comumente disponíveis em laboratórios escolares ou adaptados com materiais acessíveis. O objetivo do guia é facilitar a reprodução autônoma do aparato central da proposta, considerando seu potencial como recurso inovador.

Em resumo, a estrutura do produto educacional foi concebida de forma articulada, progressiva e adaptável, sustentando-se em bases conceituais sólidas e em práticas experimentais de caráter analógico que favorecem a compreensão significativa de fenômenos da Física Quântica, respeitando os limites e as potencialidades da realidade escolar brasileira.

5.4 Sequência didática

A sequência didática desenvolvida no âmbito deste produto educacional foi concebida de maneira linear, apresentando início, desenvolvimento e conclusão claramente delineados em forma de planos de aula. Embora sua aplicação se articule a partir de conteúdos pertencentes à Física Clássica, como vibrações, ondas, oscilações e energia, sua organização

foi pensada para criar pontes conceituais que conduzam, de forma introdutória, à compreensão de tópicos da Mecânica Quântica, especialmente no que se refere às flutuações do vácuo quântico que ocasionam o Efeito Casimir. Importante destacar que essa abordagem não tem como objetivo substituir os conteúdos obrigatórios definidos nos currículos das instituições de ensino básico, mas complementar e expandir as possibilidades de exploração didática no ensino de Física Moderna e Contemporânea.

A sequência foi planejada para ser desenvolvida em um total de oito aulas de 40 minutos cada, distribuídas da seguinte forma: uma aula destinada à avaliação diagnóstica, uma aula com caráter introdutório de sensibilização e seis aulas dedicadas às sessões experimentais. Cada prática experimental, das três que compõem a sequência, foi planejada para ocorrer em duas aulas consecutivas, de modo a garantir tempo suficiente para a execução dos experimentos, a análise dos fenômenos observados e a realização das discussões orientadas pelos roteiros, que contêm perguntas norteadoras elaboradas para promover a construção coletiva dos conceitos em sala de aula.

Do ponto de vista metodológico, a proposta está fundamentada no ensino por analogias, articulado a uma abordagem de caráter investigativo, em consonância com os pressupostos da aprendizagem significativa. Cada experimento foi selecionado e sequenciado de modo a oferecer aos estudantes oportunidades concretas de observação, manipulação de fenômenos físicos e construção coletiva de explicações, permitindo que conceitos abstratos da Física Moderna fossem gradualmente relacionados a experiências tangíveis.

5.5 Método de implementação do produto educacional

As estratégias de mediação docente envolveram a condução de experimentos mediados, acompanhados de perguntas orientadoras, elaboradas com o propósito de suscitar a problematização dos fenômenos observados. Os alunos foram organizados em grupos, nos quais realizaram registros escritos como parte das atividades, respondendo às questões propostas nos roteiros e anotando as interpretações construídas coletivamente durante as discussões. Embora a retomada de conceitos prévios não estivesse explicitamente formalizada nos roteiros, ela ocorreu de maneira natural e necessária ao longo do desenvolvimento das atividades, sobretudo quando emergiram dúvidas ou quando se fez necessária a ressignificação de conhecimentos anteriormente adquiridos.

A aplicação da sequência ocorreu de forma contínua, em dias subsequentes, dentro do tempo regular de aula da modalidade EJA. Diante das especificidades do perfil dos

estudantes, muitos dos quais apresentavam lacunas significativas em relação à interpretação textual e à formalização matemática, foram necessárias adaptações metodológicas, especialmente no que se refere ao tempo dedicado à manipulação dos experimentos e à condução dos diálogos orientados. Nessas circunstâncias, a mediação docente assumiu papel central, buscando garantir que os grupos compreendessem o objetivo das questões propostas e estabelecessem relações significativas entre os fenômenos observados e os conceitos físicos em estudo.

A implementação foi documentada por meio de registros fotográficos, bem como pela coleta de produções textuais e frases escritas pelos alunos durante as atividades, compondo um conjunto de evidências qualitativas que subsidiaram a análise dos resultados apresentados nos capítulos posteriores desta dissertação.

5.6 Procedimento de coleta de dados

Os procedimentos de coleta de dados nesta pesquisa foram concebidos com a finalidade de subsidiar a análise qualitativa da eficácia do produto educacional desenvolvido, considerando, sobretudo, os processos de construção de conhecimento dos estudantes ao longo da sequência didática. A ênfase recaiu na análise processual, priorizando a observação do percurso de aprendizagem, das interações e das interpretações construídas pelos alunos a partir dos experimentos realizados.

Foram utilizados, como instrumentos de coleta de dados, um questionário diagnóstico, aplicado no início da sequência, registros fotográficos, anotações dos relatos verbais dos alunos e as produções escritas realizadas pelos grupos durante os roteiros experimentais. O questionário diagnóstico foi estruturado em formato digital, contendo cinco questões objetivas, e teve como finalidade inicial identificar as concepções prévias dos estudantes sobre os conceitos que seriam trabalhados, bem como mapear eventuais dificuldades conceituais associadas aos tópicos de ondas, vibrações e, posteriormente, às noções introdutórias das flutuações do vácuo quântico.

Os registros fotográficos foram realizados de forma pontual documentando momentos específicos das atividades experimentais, especialmente aqueles relacionados à prática e à participação dos estudantes nas discussões em grupo. As produções escritas dos alunos integraram diretamente os roteiros dos experimentos, nos quais foram propostas perguntas norteadoras que exigiam dos grupos a elaboração de respostas baseadas nas observações empíricas e na análise dos fenômenos experimentais.

A coleta de dados foi realizada ao longo de toda a sequência didática, abrangendo desde a aplicação do questionário diagnóstico até as atividades desenvolvidas nas sessões de experimentação e nas discussões subsequentes. Todo o processo foi conduzido pelo próprio professor-pesquisador, sem apoio externo, assegurando uma presença constante e direta na mediação das atividades e na observação dos comportamentos, interações e produções dos alunos.

O questionário diagnóstico foi realizado de forma digital, a partir do *Google Formulários*, os demais registros foram coletados presencialmente, no contexto das aulas da EJA. Para a realização dos registros fotográficos, das anotações e da coleta das produções escritas, foi obtido consentimento verbal dos participantes, garantindo-se a preservação da privacidade, do anonimato e do respeito à dignidade dos estudantes envolvidos.

O principal objetivo dos procedimentos de coleta foi verificar as aprendizagens construídas pelos alunos a partir dos experimentos realizados e das discussões promovidas, observando como cada grupo se apropriou dos conceitos mediados, especialmente no que se refere à transição de conceitos entre os fenômenos clássicos, como vibração e ressonância, e as interpretações introdutórias das flutuações do vácuo quântico e do Efeito Casimir.

Cabe destacar que, embora a pesquisa não tenha utilizado estratégias formais de triangulação de dados, todos os registros produzidos durante o desenvolvimento da sequência foram considerados na análise, compondo um corpus qualitativo robusto, capaz de oferecer subsídios consistentes para a compreensão dos efeitos da intervenção didática proposta.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo tem por finalidade apresentar, analisar e discutir os resultados obtidos a partir da aplicação do produto educacional desenvolvido no contexto desta pesquisa. Inicialmente, será realizada uma caracterização detalhada do ambiente escolar, da turma participante e dos elementos diagnósticos que permitiram compreender o perfil dos estudantes, suas concepções prévias e suas expectativas em relação aos conteúdos abordados. Na sequência, serão discutidos, de forma sistemática, os resultados dos procedimentos metodológicos adotados durante a intervenção didática, contemplando desde o planejamento até a execução das atividades propostas, com ênfase nas estratégias de ensino-aprendizagem fundamentadas na teoria da aprendizagem significativa e no uso de analogias.

Serão apresentados registros da prática, incluindo relatos dos estudantes, observações do pesquisador e registros fotográficos, de modo a evidenciar as interações, os processos de construção de conhecimento e as dinâmicas emergentes ao longo da atividade experimental que culminou na utilização de um modelo análogo para representar o Efeito Casimir. A análise dos dados será realizada à luz dos referenciais teóricos que sustentam este trabalho, considerando aspectos pedagógicos, epistemológicos e curriculares, bem como as diretrizes estabelecidas na Base Nacional Comum Curricular (BNCC).

Além disso, este capítulo discute as potencialidades e os limites do produto educacional quanto estratégia para o ensino de conceitos relacionados às flutuações quânticas do vácuo e ao Efeito Casimir, tradicionalmente considerados de elevada abstração. Por fim, são apresentadas reflexões sobre os desafios enfrentados, as aprendizagens alcançadas e as perspectivas para a continuidade e aprimoramento de propostas pedagógicas que visem à inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica.

6.1 Contexto da implementação do produto educacional

A presente pesquisa foi desenvolvida na Escola de Ensino Médio em Tempo Integral Rotary Club São Miguel, uma instituição pertencente à rede pública estadual do Ceará. A escola está situada no bairro São Miguel, região urbana periférica do município de Caucaia, que integra a Região Metropolitana de Fortaleza. Este contexto geográfico é caracterizado por dinâmicas socioculturais próprias das periferias urbanas, onde coexistem, de forma marcante, desafios socioeconômicos e educacionais que impactam diretamente o processo de ensino-aprendizagem.

A escola ocupa uma área física aproximada de 1.806 m², dispondo de uma infraestrutura que contempla sete salas de aula, as quais são equipadas com mobiliário adequado, bem conservado e climatizadas, proporcionando, portanto, boas condições de conforto térmico, acústico e de iluminação para a realização das atividades pedagógicas.

No que se refere aos espaços pedagógicos especializados, a instituição conta com um laboratório de informática em funcionamento, utilizado tanto nas práticas regulares quanto em atividades específicas que demandam suporte tecnológico. Contudo, há também um laboratório de Ciências, que, à época da implementação desta pesquisa, encontrava-se interditado devido a problemas estruturais, notadamente o comprometimento das paredes e do teto em virtude de umidade elevada, impossibilitando, portanto, sua utilização plena nas práticas experimentais.

O espaço de leitura é representado por uma biblioteca escolar, cujo acervo é predominantemente voltado à literatura clássica, contemporânea e obras paradidáticas, havendo, no entanto, uma clara limitação quanto à quantidade de livros técnicos e científicos que poderiam enriquecer as práticas no ensino de Ciências e Física. Complementando os ambientes pedagógicos, a escola dispõe de uma sala de professores ampla, com banheiros e equipada com dois computadores e armários individuais, destinada ao planejamento, reuniões pedagógicas e momentos de interlocução entre os docentes.

As áreas de convivência e práticas coletivas, por sua vez, são restritas. A escola não possui quadra poliesportiva, auditório ou refeitório estruturado, sendo o pátio o único espaço coletivo existente, funcionando de maneira multifuncional, tanto para momentos de socialização quanto como ambiente improvisado para refeições.

No período em que esta pesquisa foi realizada, a instituição estava passando por obras de reforma e reestruturação em diversos ambientes, incluindo a construção de um novo espaço destinado ao laboratório de Ciências, o que reflete uma preocupação institucional em mitigar os impactos das deficiências estruturais e melhorar a qualidade dos ambientes de aprendizagem.

Quanto aos recursos tecnológicos, a escola dispunha de projetores móveis, notebooks de uso docente e uma televisão, além de acesso à rede Wi-Fi restrita aos professores, funcionários administrativos e à equipe gestora, contudo o sinal não alcançava todos os ambientes da instituição. Todos os equipamentos estavam em pleno funcionamento e eram utilizados com frequência pelos docentes, configurando-se como ferramentas essenciais no desenvolvimento das atividades pedagógicas. Ainda que o laboratório de Ciências estivesse fechado, foi possível acessar seu interior para levantamento dos materiais disponíveis, sendo

observado que existem kits didáticos específicos para o ensino de Física, embora parte deles se encontrasse danificada, enquanto outra parte apresentava condições de uso adequadas.

O suporte institucional para o desenvolvimento de práticas pedagógicas inovadoras revelou-se consistente e alinhado com uma gestão escolar aberta à inovação. A gestão oferecia ampla autonomia aos docentes, estimulando a implementação de práticas diferenciadas, e a coordenação pedagógica mostrou-se sensível e colaborativa durante todo o processo de planejamento e execução desta intervenção didática. A escola, inclusive, forneceu todo o material disponível e viável para a efetivação da prática, demonstrando comprometimento institucional com a proposta pedagógica vinculada a esta pesquisa.

Todavia, a evasão escolar configurou-se como desafio. Embora a turma da EJA no turno da noite contasse com 45 alunos regularmente matriculados, a média de participação durante a implementação do produto educacional foi de aproximadamente 16 estudantes, o que evidencia um fenômeno multicausal recorrente no ensino noturno e, especialmente, no atendimento à EJA, onde fatores externos como jornada de trabalho, cansaço físico, responsabilidades familiares e questões socioeconômicas interferem de maneira expressiva na permanência dos alunos no ambiente escolar.

Em síntese, a caracterização da Escola de Ensino Médio em Tempo Integral Rotary Club São Miguel revela um cenário educacional permeado por desafios estruturais e sociais, mas também por uma gestão comprometida, por recursos pedagógicos em constante aprimoramento e por uma abertura significativa ao desenvolvimento de práticas inovadoras, configurando-se, portanto, como um espaço propício à realização de intervenções pedagógicas que visem à ressignificação do ensino de Física, especialmente no que concerne à inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no contexto da Educação Básica.

A intervenção pedagógica proposta neste trabalho foi realizada com uma turma da EJA articulada à Qualificação Profissional, no nível do Ensino Médio, vinculada à 1^a etapa dessa modalidade. Trata-se de uma oferta educacional diferenciada, cujo princípio orientador propõe a reorganização dos tempos e espaços pedagógicos, de modo a adequá-los às especificidades dos sujeitos da EJA. Essa proposta visa, sobretudo, assegurar o direito à educação, articulada à qualificação profissional e à perspectiva da aprendizagem ao longo da vida, promovendo, assim, a inclusão social, econômica e educacional desses indivíduos.

A turma é composta por estudantes cuja faixa etária varia entre 18 e 61 anos, o que evidencia a presença de sujeitos em diferentes fases do ciclo de vida, muitos dos quais retornam ao ambiente escolar após trajetórias educacionais interrompidas. A distribuição por gênero aponta uma leve predominância feminina, sendo 53% mulheres e 47% homens, o que reflete,

em parte, os movimentos sociais e culturais que têm proporcionado uma maior busca por escolarização por parte das mulheres em contextos da EJA.

Do ponto de vista sociocultural, observa-se uma diversidade nos perfis ocupacionais dos estudantes. Dados levantados indicam que 32% dos discentes estão inseridos no mercado de trabalho formal, 5% atuam como autônomos, 21% exercem atividades domésticas (cuidados do lar), 5% encontram-se desempregados e 37% estão dedicados exclusivamente aos estudos. Este panorama revela uma realidade na qual, apesar das múltiplas demandas da vida adulta, uma parcela significativa dos alunos encontra na escola uma oportunidade concreta de retomada de seus percursos educacionais.

No que concerne aos aspectos acadêmicos e cognitivos, verifica-se que a turma apresenta níveis consideráveis de desmotivação e apatia frente às atividades tradicionais propostas no contexto escolar. Tal comportamento se manifesta, em parte, pela existência de dificuldades evidentes nos domínios da leitura, da escrita e, consequentemente, na elaboração de raciocínios mais abstratos, especialmente quando confrontados com conteúdo de maior densidade conceitual, como é o caso dos tópicos de Física Moderna e Contemporânea.

Ainda assim, destaca-se a existência de um grupo reduzido de alunos que se mostra mais receptivo, curioso e engajado, sobretudo quando as práticas pedagógicas rompem com os métodos expositivos tradicionais e incorporam estratégias que se aproximam do cotidiano, da experiência prática e da realidade concreta dos estudantes.

Em termos atitudinais, constatou-se que, apesar da resistência inicial observada em relação aos conteúdos de caráter científico e mais abstrato, a turma demonstrou expressivo aumento no interesse e na participação quando envolvida em atividades experimentais e interativas, como as desenvolvidas no âmbito deste produto educacional. Esse engajamento foi particularmente perceptível no manuseio dos materiais didáticos e dos aparatos experimentais, ocasião na qual até mesmo os estudantes normalmente mais apáticos se mostraram motivados, participativos e curiosos frente à possibilidade de interagir com os fenômenos físicos representados.

Ainda que não se observe, de modo generalizado, uma valorização intrínseca do conhecimento científico por parte da turma, ficou evidente que, quando os conceitos são mediados por subsunções concretos, contextualizados e alinhados às experiências de vida dos alunos, ocorre uma abertura maior para o diálogo, para a construção coletiva do conhecimento e, consequentemente, para o desenvolvimento de aprendizagens mais significativas.

Em síntese, o perfil da turma evidencia os desafios estruturais, cognitivos e motivacionais típicos do ensino na modalidade EJA, especialmente quando associada ao ensino

de conteúdos tradicionalmente considerados de alta abstração, como os da Física Moderna. Entretanto, também revela o potencial latente desses sujeitos quando são mobilizados por propostas metodológicas inovadoras, contextualizadas e centradas na mediação ativa e significativa dos saberes.

6.2 Avaliação diagnóstica

Com o objetivo de compreender as concepções prévias dos estudantes, suas dificuldades, grau de familiaridade com os conteúdos de Física e sua capacidade de abstração, foi realizada, antes da implementação do produto educacional, uma avaliação diagnóstica estruturada sob a forma de um formulário eletrônico. Este instrumento foi elaborado para mapear tanto os saberes espontâneos quanto as possíveis lacunas conceituais dos discentes, permitindo, assim, uma intervenção pedagógica mais alinhada às reais necessidades da turma.

O diagnóstico teve como foco avaliar temas fundamentais que servem de alicerce para a compreensão dos tópicos abordados no produto educacional, nomeadamente: movimento oscilatório, estrutura atômica, energia e suas transformações, ondas e a concepção de vácuo. Além dos conceitos formais, o questionário contemplava questões que buscavam estabelecer relações com o cotidiano dos estudantes, de modo a identificar seus conhecimentos empíricos, suas experiências prévias e a forma como interpretam fenômenos naturais a partir de suas vivências (APÊNDICE A).

A análise dos dados obtidos a partir da avaliação diagnóstica revelou um conjunto significativo de dificuldades conceituais, que impactam diretamente na compreensão de conteúdos da Física de moderna e Contemporânea, sobretudo aqueles de natureza mais abstrata, como os fenômenos quânticos.

A seguir, são apresentados os resultados e as análises qualitativas da avaliação diagnóstica em formato digital aplicada com 19 alunos da turma (Figura 8) na qual foi implementado o produto educacional. As respostas obtidas pelos estudantes encontram-se registradas nos gráficos subsequentes, os quais ilustram de forma quantitativa a distribuição das alternativas assinaladas, possibilitando uma análise diagnóstica fundamentada dos dados coletados.

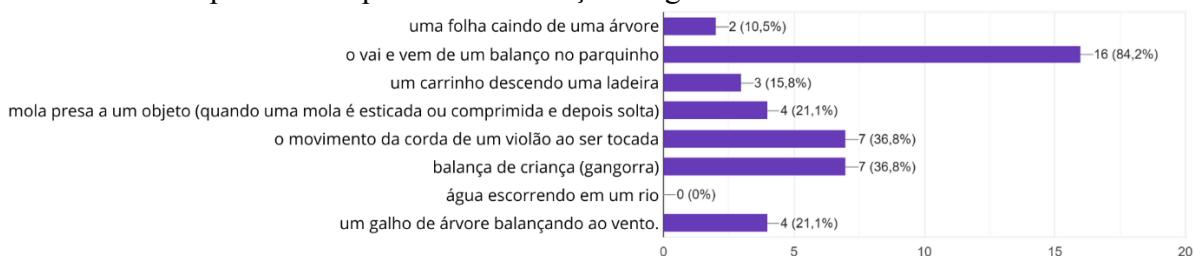
Figura 8 – Alunos realizando a avaliação diagnóstica em formato digital no laboratório de informática.



Fonte: Acervo do autor.

1^a Questão: verifica se o aluno consegue reconhecer e aplicar os princípios que definem o movimento oscilatório, distinguindo-o de outros tipos de deslocamento. Ela examina especificamente se o discente identifica a existência de uma posição de equilíbrio, a periodicidade do movimento e a atuação de uma força restauradora. As respostas encontram-se devidamente registradas no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Respostas à 1^a questão da avaliação diagnóstica:



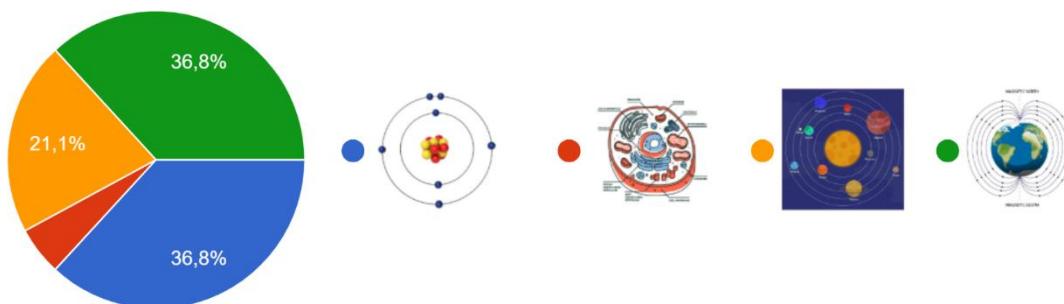
Fonte: próprio autor.

O item mais reconhecido pelos estudantes foi o balanço (84,2%), um exemplo clássico de pêndulo simples. Em contrapartida, os sistemas mola-massa (21,1%) e as cordas vibrantes (36,8%) apresentaram índices de acerto significativamente inferiores, evidenciando uma lacuna na capacidade de generalização do conceito de movimento oscilatório. Dois distratores que representam movimentos não oscilatórios, a queda de uma folha e o deslocamento de um carrinho em uma ladeira, foram assinalados por 10,5% e 15,8% dos respondentes, respectivamente, o que sugere uma possível confusão entre qualquer trajetória

curva e o conceito de oscilação. Por fim, a ausência total de marcações na opção “água escorrendo em um rio” indica que parte dos alunos já é capaz de distinguir fenômenos de escoamento contínuo daqueles que envolvem oscilação.

2^a Questão: tem como objetivo avaliar os conhecimentos prévios dos alunos acerca da estrutura atômica, conceito essencial tanto para a Química quanto para a Física. Ao verificar a capacidade do aluno em reconhecer visualmente a representação de um átomo e distingui-la de outros modelos e estruturas, a atividade diagnóstica fornece uma base conceitual imprescindível para a construção de saberes mais complexos. As respostas encontram-se devidamente registradas no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Respostas à 2^a questão da avaliação diagnóstica.



Fonte: próprio autor.

A taxa de acerto foi de 36,8%, valor equiparável à incidência de respostas equivocadas associadas à representação das linhas de campo magnético. Outros 26,4% dos alunos distribuíram suas respostas entre um modelo astronômico do sistema solar e o diagrama de uma célula biológica, totalizando 63,2% de equívocos. Esse padrão indica ausência de um reconhecimento confiável das imagens didáticas do átomo tradicional, representado segundo o modelo de Bohr, adotado na formulação da questão.

Esse padrão revela três dificuldades conceituais centrais. Primeiramente, observa-se uma leitura predominantemente visual das imagens, baseada em formas circulares ou radiais, sem a mobilização dos elementos estruturais que compõem o modelo científico. A forte adesão à imagem planetária confirma que a metáfora solar permanece internalizada nos materiais didáticos e, quando não problematizada, induz a interpretações simplistas do conceito de átomo (Teixeira e Santos, 2023, p. 9). Por fim, a equiparação do átomo às linhas de campo evidencia uma sobreposição indevida entre topologias de campo e estruturas corpusculares, situação já documentada nos estudos de Krapas e Silva (2008), ao tratarem da polissemia do conceito de campo nos manuais escolares. Esses resultados reforçam a importância de intervenções didáticas voltadas ao desenvolvimento da interpretação crítica de representações visuais, bem

como à explicitação dos limites inerentes ao uso de analogias no ensino de Física.

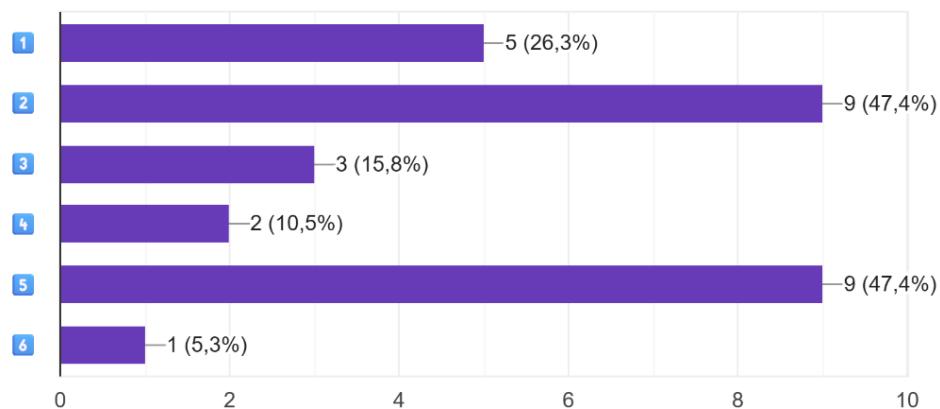
3^a Questão: A questão tem como finalidade avaliar os conhecimentos prévios dos alunos sobre o conceito de energia e suas transformações, temática central no campo da Física Quântica. Por meio da análise de situações do cotidiano, busca-se verificar se os estudantes reconhecem a presença e a conversão da energia em distintos contextos, permitindo diagnosticar eventuais lacunas na compreensão desse conteúdo fundamental. A questão apresenta 6 situações que os alunos tiveram que analisar:

1. Um ciclista com sua bicicleta descendo uma ladeira sem que precise pedalar.
2. Uma panela de água no fogão começando a soltar vapor.
3. Uma bola sendo chutada em direção ao gol.
4. Uma onda quebrando na praia, arrastando areia e conchas.
5. Um alto-falante emitindo música em um show ao ar livre.
6. Um quadro pendurado na parede de uma sala de aula.

A partir das situações, as respostas às perguntas foram:

As respostas quanto a indagação: Quais dessas situações envolvem a ideia de energia? As respostas encontram-se devidamente registradas no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Respostas a 3^a Questão: Quais dessas situações envolvem a ideia de energia?



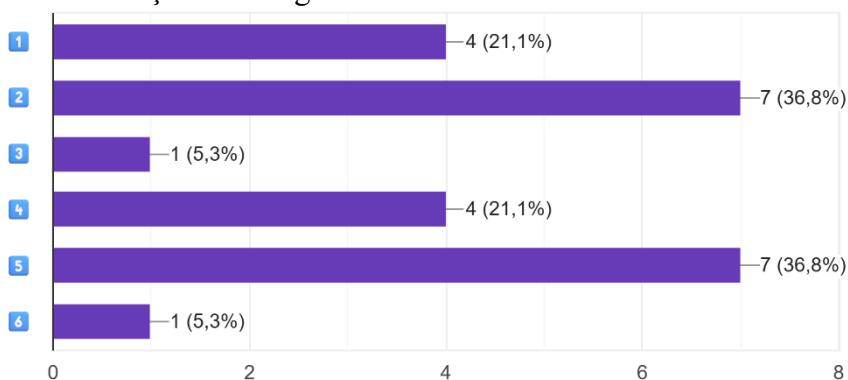
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os estudantes demonstram maior reconhecimento da presença de energia em contextos nos quais há liberação de calor, como no caso da panela aquecida, ou emissão sonora, como no alto-falante. Contudo, evidenciam dificuldades em identificar manifestações energéticas em processos de natureza mecânica, como nas situações 1 e 3, e em fenômenos ondulatórios, representados na situação 4. Apenas um aluno selecionou o item correspondente ao quadro fixo, o que indica que o grupo tende a associar a presença de energia quase

exclusivamente a transformações visíveis ou sensorialmente perceptíveis, deixando de lado estados energéticos potenciais. Observa-se também que a Lei da Conservação da Energia raramente é mobilizada pelos estudantes, mesmo a situação que envolve a descida do ciclista, um exemplo clássico da transformação de energia potencial gravitacional em energia cinética, que obteve baixo índice de escolha pelos alunos.

As respostas quanto a indagação: Em quais delas há transformação de energia? As respostas encontram-se devidamente registradas no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Respostas a 3^a Questão: Em quais delas há transformação de energia?

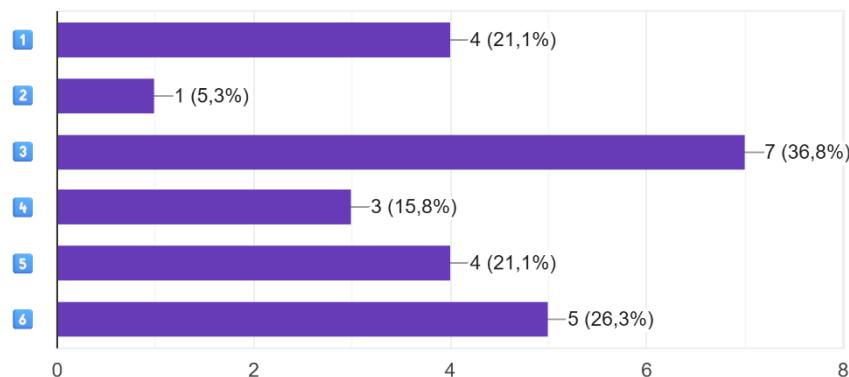


Fonte: Elaborado pelo autor.

Apenas duas situações, a conversão de calor em movimento molecular (situação 2) e a conversão de eletricidade em som (situação 5), obtiveram reconhecimento por mais de um terço dos estudantes. Em contrapartida, as situações envolvendo conversões energéticas de natureza mecânica (situações 1, 3 e 4), frequentes no cotidiano, foram pouco identificadas, enquanto o quadro estático (situação 6) praticamente não foi assinalado.

A última indagação da 3^a Questão é: Quais ou qual situação na lista que não apresenta transformação de energia no momento descrito? As respostas encontram-se devidamente registradas no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Respostas a 3^a Questão: Quais ou qual situação na lista que não apresenta transformação de energia no momento descrito?



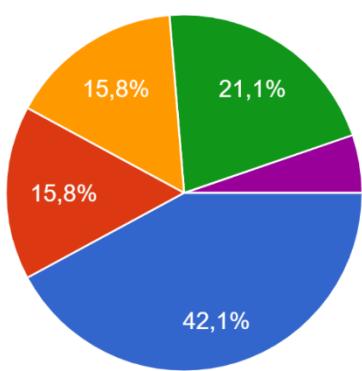
Fonte: Elaborado pelo autor.

A discrepância entre os 26,3% de estudantes que corretamente identificaram o quadro estático (situação 6) como o único caso sem conversão energética e os 36,8% que, equivocadamente, atribuíram a mesma ausência de transformação à bola chutada (situação 3) revela que uma parcela significativa da turma ancora sua compreensão em uma perspectiva fenomenológica sensorial. Nessa visão, a energia só se manifesta quando seus efeitos são visíveis, audíveis ou térmicos (Bucussi, 2006, p. 18–20). Esse reducionismo coexiste com uma fragmentação conceitual, na qual o princípio da conservação permanece limitado a exemplos tradicionais e, conforme indicam análises curriculares recentes, dificulta a integração das formas mecânicas com as termodinâmicas e eletromagnéticas do conceito (Hansen et al., 2020, p. 122).

4^a Questão: tem como finalidade avaliar os conhecimentos prévios dos alunos sobre a natureza do movimento ondulatório na água, temática central no estudo das ondas mecânicas. Por meio da análise de uma situação cotidiana, busca-se verificar se os estudantes comprehendem a distinção entre a propagação de energia e o transporte de matéria, reconhecendo que as ondas na água combinam componentes transversal e longitudinal sem deslocar permanentemente a substância do meio. Essa avaliação permite diagnosticar eventuais lacunas na compreensão desse conceito fundamental, bem como identificar a persistência de concepções alternativas baseadas em experiências sensoriais cotidianas. Para contextualizar a análise dos resultados, a questão submetida aos alunos apresentava o seguinte cenário: em uma lagoa em repouso, em seguida, o lançamento de uma pedra gera ondas que se propagam radialmente, enquanto um barquinho de papel próximo ao ponto de impacto permanece executando apenas movimentos verticais, sem deslocar-se lateralmente na direção das cristas. Solicitou-se aos estudantes que assinalassem os motivos pelos quais o objeto flutuante não acompanha o avanço horizontal da

onda e que avaliassem se esse comportamento seria exclusivo das ondas na água ou observável em outras situações análogas. As respostas encontram-se devidamente registradas no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Respostas aos itens da 4^a Questão da avaliação diagnóstica.



- A) O barquinho se move para cima, para baixo e também oscila levemente para frente e para trás porque a onda na água combina dois tipos de movimentos: um que faz a água subir e descer e outro que a desloca momentaneamente na direção da propagação da onda, sem que ele seja transportado para longe.
- B) O barquinho se move para cima e para baixo porque as ondas apenas passam por ele, sem transportá-lo continuamente para frente. Isso acontece porque a onda na água não carrega matéria a grandes distâncias, assim como ocorre com outros tipos de ondas, como o som.
- C) O barquinho não vai para frente porque a água apenas vibra no mesmo lugar, sem qualquer deslocamento horizontal da superfície.
- D) O barquinho fica no mesmo lugar porque a água não está realmente se movendo, apenas a superfície parece estar em movimento.
- E) O barquinho não se desloca porque a densidade da água impede que ondas se propaguem com intensidade suficiente para transportá-lo.

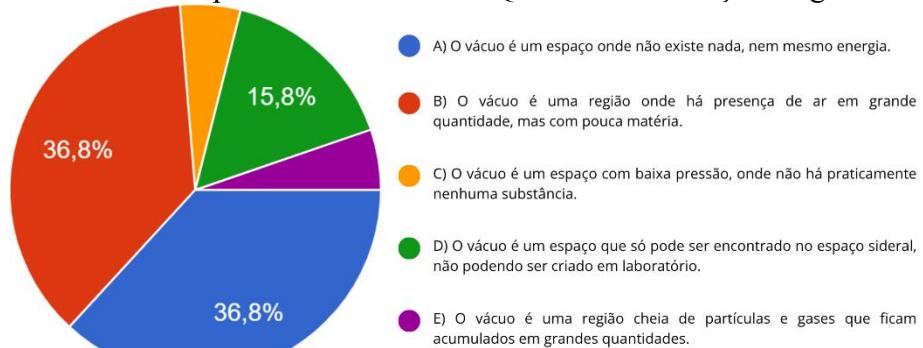
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos 19 alunos que responderam, apenas 3 (15,8%) selecionaram a alternativa B, a única que reconhece corretamente que a onda na água combina pequenas componentes transversal e longitudinal, fazendo o barquinho oscilar sem transportá-lo para longe. A maioria (84,2%) distribuiu-se entre as alternativas A, C, D e E, todas variantes do denominado modelo de transporte de matéria, segundo o qual a onda empurraria permanentemente a água (e o barco) ou, inversamente, não deslocaria nada, limitando-se a vibrar a superfície. Esse padrão corrobora o diagnóstico de Errobidart *et al.* (2013, p. 446), segundo o qual, antes de um ensino sistemático, os estudantes tendem a interpretar fenômenos ondulatórios a partir de experiências sensoriais cotidianas, especialmente aquelas observadas na superfície do mar ou do rio, e, por isso, associam a propagação das ondas ao deslocamento macroscópico da substância envolvida. A prevalência dessa concepção alternativa também explica por que 42,1% optaram pela alternativa A (onda “passa sem transportar”), enquanto outros 52,6% escolheram enunciados que negam ou minimizam qualquer deslocamento horizontal da água, desconsiderando o caráter de transferência de energia sem transporte de massa, conforme previsto pelo modelo científico.

5^a Questão: tem como finalidade avaliar os conhecimentos prévios dos alunos sobre o conceito físico de vácuo, temática fundamental para a compreensão de fenômenos em Física Moderna e Astrofísica. Por meio da análise de uma situação contextualizada, busca-se verificar se os estudantes compreendem o vácuo como uma região de baixa pressão e escassa quantidade de matéria, em contraste com concepções alternativas que o interpretam como “nada absoluto” ou como um espaço repleto de ar ou partículas. Essa avaliação permite identificar possíveis lacunas conceituais e a persistência de visões pré-científicas herdadas de interpretações

históricas, contribuindo para orientar intervenções didáticas mais efetivas. As respostas encontram-se devidamente registradas no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Respostas aos itens da 5^a Questão da avaliação diagnóstica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos 19 alunos que responderam, apenas 1 (5,3%) identificou corretamente o vácuo como um espaço de pressão extremamente baixa, praticamente desprovido de matéria (alternativa C). A ampla maioria (73,6%) distribuiu-se entre as alternativas A e B, que refletem concepções equivocadas do vácuo como “nada absoluto” ou como “grande quantidade de ar”, enquanto 21,1% optaram por outras definições igualmente incorretas (alternativas D e E). Esse padrão sugere que os alunos ainda mobilizam modelos pré-científicos herdados do debate histórico do *horror vacui*, segundo o qual a natureza não toleraria o vazio (Longuini; Nardi, 2000, p. 64–66), e desconhecem a noção contemporânea de vácuo como “parcialidade de vazio”, isto é, um volume contendo pouquíssimas partículas, mas nunca totalmente desprovido de energia ou radiação (Casimir, 1948, p. 795). A persistência dessas concepções alternativas evidencia a força de significados contextualmente inadequados que resistem à instrução formal e reforça a necessidade de sequências didáticas que confrontem explicitamente essas imagens intuitivas por meio de atividades experimentais de baixa pressão, acompanhadas de discussões conceituais orientadas.

É importante ressaltar que, embora o levantamento tenha evidenciado um quadro generalizado de dificuldades conceituais, não houve qualquer resistência por parte dos alunos quanto à realização da atividade diagnóstica, o que demonstra uma abertura inicial ao processo de ensino-aprendizagem, ainda que marcada por uma postura, em grande parte, passiva ou desmotivada.

Diante desse cenário, tornou-se imprescindível realizar ajustes metodológicos significativos na condução da intervenção pedagógica. O planejamento inicial foi revisado, e optou-se por intensificar o uso de exemplos do cotidiano dos alunos, buscando, assim,

minimizar o uso excessivo de abstrações e favorecer a construção de subsunções mais concretos, acessíveis e significativos, nos termos propostos pela Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel. Tal decisão se refletiu, não apenas na seleção dos exemplos e dos contextos apresentados durante as atividades, mas também na organização dos momentos experimentais e nas estratégias de mediação adotadas ao longo de todo o desenvolvimento do produto educacional.

6.3 Implementação do produto educacional

A implementação do produto educacional seguiu o roteiro metodológico descrito no Manual do Professor "Conexões Quânticas: Vibração, Ondas e Efeito Casimir", com pequenas adaptações decorrentes da dinâmica e das particularidades observadas durante o desenvolvimento das atividades com a turma. As sessões foram realizadas em ordem sequencial, articulando teoria, experimentação e discussões coletivas, respeitando os objetivos gerais e específicos de cada etapa, porém considerando as características próprias dos estudantes da EJA, especialmente em relação ao tempo disponível e às estratégias de mediação necessárias.

6.3.1 Sessão introdutória de sensibilização: Lei de Moore: a miniaturização dos transistores

A aula inicial foi planejada tomando como eixo problematizador a Lei de Moore, conforme previsto no manual, para instigar os estudantes a refletirem sobre a evolução tecnológica dos dispositivos eletrônicos. Durante a discussão, enfatizou-se que o avanço dos processadores está diretamente relacionado à capacidade de reduzir progressivamente o tamanho dos transistores, o que possibilita o aumento exponencial da quantidade desses componentes em um mesmo chip, sem que haja ampliação física do processador. Essa contextualização permitiu aos alunos compreender que a miniaturização, além de impulsionar o desempenho e reduzir custos, também impõe desafios científicos, preparando o terreno para problematizações posteriores sobre os limites impostos pelos fenômenos quânticos.

Conforme previsto no Manual para o Professor, a atividade inicial previa que os alunos fossem divididos em pequenos grupos para analisar um gráfico da Lei de Moore e responder a questões norteadoras sobre as variáveis representadas, a relação entre tempo e número de transistores, as tendências observadas e os desafios emergentes desse fenômeno. Entretanto, diante da dinâmica estabelecida durante a aula, marcada pelo caráter expositivo

inicial e pela necessidade de mediação contínua, a estratégia foi adaptada para uma discussão coletiva. Essa adaptação permitiu que as análises e justificativas fossem construídas em conjunto, mediadas pelo professor, favorecendo o esclarecimento de dúvidas à medida que surgiam e garantindo maior engajamento de todos os presentes.

Na sequência, foi exibido aos alunos o gráfico histórico da Lei de Moore, apresentando a evolução dos processadores desde o Intel 4004, lançado em 1971, até modelos contemporâneos. Para estabelecer uma conexão com o cotidiano dos estudantes, utilizou-se como exemplo comparativo o chip Apple A13, presente no iPhone 11 Pro, aparelho amplamente conhecido por eles. Durante a discussão, destacou-se que o Apple A13, com aproximadamente 8,5 bilhões de transistores, possui capacidade de processamento equivalente a cerca de 3,7 milhões de chips Intel 4004. Como efeito de comparação, foi ressaltado que, caso se tentasse atingir o mesmo desempenho utilizando exclusivamente os processadores Intel 4004, seria necessário construir um chip com área aproximada de 44,4 m², equivalente a três vagas de estacionamento de automóveis. Essa comparação física e quantitativa permitiu aos alunos perceberem, de maneira concreta, como os avanços científicos e tecnológicos alcançados em um intervalo de 48 anos possibilitaram a drástica miniaturização dos transistores, permitindo que bilhões desses componentes fossem integrados em um único processador compacto, que ainda divide espaço interno com outros dispositivos no interior de um smartphone.

Até aquele momento, os estudantes não haviam manifestado verbalmente quaisquer reações ou questionamentos. Demonstravam atenção à exposição, porém não davam sinais evidentes de participação oral ativa. Ao serem diretamente indagados sobre o conteúdo apresentado, tornou-se claro que, para a maioria dos alunos, as informações referentes ao funcionamento interno dos chips, bem como à relação entre o número de transistores e a capacidade de processamento, representavam conhecimentos totalmente novos para eles. Essa constatação ressaltou a importância de uma mediação pedagógica criteriosa, com explicações acessíveis, contextualizadas e adequadas ao perfil da turma, com o intuito de assegurar a compreensão inicial e criar condições favoráveis para as discussões conceituais posteriores.

Em continuidade à exposição, foi apresentada aos estudantes uma citação de Gordon Moore, na qual o autor de sua célebre lei afirma que o número de transistores em um chip dobraria aproximadamente a cada dois anos, mantendo um aumento mínimo nos custos de produção. Essa reflexão foi articulada com a informação de que, atualmente, os transistores mais avançados já atingem dimensões próximas ao tamanho de um átomo, o que evidencia o limite físico iminente para a miniaturização contínua desses componentes.

A problematização desse cenário despertou, pela primeira vez, uma reação

espontânea da turma. Uma aluna, demonstrando curiosidade e inquietação diante do tema, questionou: “Vão enfiar esses transistores dentro desse mecanismo (chip) até quanto?” A pergunta, além de pertinente, abriu espaço para discutir as fronteiras tecnológicas e científicas que se impõem ao desenvolvimento de processadores, servindo como gancho para introduzir, nas etapas posteriores, as implicações das flutuações quânticas e fenômenos como o Efeito Casimir.

6.3.2 Sessão de Experimentação 1 – Vibrações e Osciladores: conceitos fundamentais e propagação de ondas

O segundo encontro foi dedicado à primeira sessão experimental, cujo objetivo, conforme descrito no Manual para o Professor, consistiu em investigar fenômenos relacionados ao Movimento Harmônico Simples (MHS) e à propagação de ondas mecânicas. Essa etapa foi estruturada em dois experimentos complementares: (i) determinação do período e da frequência de um pêndulo simples e (ii) análise qualitativa da amplificação sonora produzida pelo contado de um diapasão a uma caixa de ressonância.

Conforme previsto no manual, a turma foi dividida em três equipes para realizar um rodízio entre os dois experimentos montados em pontos distintos da sala: o pêndulo simples em um extremo e o diapasão com caixa de ressonância no outro. Essa organização estimulou a autonomia e favoreceu o engajamento dos estudantes, permitindo que cada grupo vivenciasse ativamente as práticas experimentais, manipulando os materiais, realizando medições e registrando suas observações.

Figura 9 – Alunos registrando as medições do experimento com o pêndulo simples.



Fonte: Acervo do Autor.

Durante o experimento com o pêndulo simples, os estudantes coletaram medições do tempo necessário para um determinado número de oscilações em função do comprimento

do fio, buscando identificar a relação direta prevista pela teoria (Figura 9). As anotações das medições realizadas por duas das equipes estão representadas na Figura 10, Figura 11 e Figura 12:

Figura 10 – Dados coletados pela primeira equipe durante o experimento com o pêndulo simples.

Comprimento do (l) em cm	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Tempo 4 (s)	Média do tempo (s)	Período (T) (s)	Frequência (f) (Hz)
13 cm	4.10	3.99	4.7	3.29	4,02		
16 cm	4.55	3.82	3.67	3.70	3,93		
23 cm	4.44	4.12	4.57	4.12	4,31		
25 cm	0.55	0.48	0.80	0.52	0.60		

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 11 – Dados coletados pela segunda equipe durante o experimento com o pêndulo simples.

Comprimento do (l) em cm	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Tempo 4 (s)	Média do tempo (s)	Período (T) (s)	Frequência (f) (Hz)
13	04,09	04,39	03,09	02,92	3,5925		
17,9	05,08	05,02	04,49	04,91	4,875		
23 cm	05,24	05,57	05,40	05,46	5,4175		
30 cm	05,57	05,67	05,69	05,36	5,6725		

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 12 – Dados coletados pela terceira equipe durante o experimento com o pêndulo simples.

Comprimento do (l) em cm	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Tempo 4 (s)	Média do tempo (s)	Período (T) (s)	Frequência (f) (Hz)
12.7	04.20	04.02	05.06	05.39	4,80		
22.	05.78	05.32	05.39	04.54	5,25		
23.5	04.34	04.60	05.38	05.32	4,92		
30	04.74	05.15	05.51	05.39	5,20		

Fonte: Dados da pesquisa.

Os estudantes mostraram significativo interesse durante a realização das medições, embora tenham encontrado dificuldades iniciais relacionadas ao uso do cronômetro nos próprios celulares e à definição consensual da equipe sobre a definição do ponto de início da contagem das oscilações. Um momento particularmente relevante ocorreu quando um estudante, ao conferir os tempos obtidos, expressou preocupação em relação a uma das medições, dirigindo-se ao grupo com a seguinte observação: “esse tempo não está parecido com os outros, vamos conferir de novo”. Tal manifestação crítica levou os demais membros de sua equipe a revisarem e, posteriormente, repetirem suas medições. Essa postura investigativa rapidamente se espalhou para as outras equipes, que também passaram a reavaliar suas anotações, revisando e, em alguns casos, refazendo medições para garantir maior consistência dos resultados.

É importante destacar, porém, que as Figura 10, Figura 11 e Figura 12 mostram que as colunas destinadas ao cálculo do período e da frequência permaneceram em branco, denotando a dificuldade dos estudantes em realizar o tratamento matemático dos dados coletados. Mesmo tratando-se de cálculos relativamente simples, envolvendo apenas operações com frações, essa etapa revelou-se um desafio significativo para as equipes. Por decisão do professor-pesquisador, com o intuito de não mudar o objetivo conceitual da atividade, considerou-se não desprender o foco dos alunos no experimento em troca da formalização matemática dos dados, entendendo que o não preenchimento dessas colunas não implicou prejuízo ao alcance dos objetivos pedagógicos centrais da atividade. De fato, mesmo diante dessas dificuldades matemáticas, os estudantes conseguiram estabelecer relações qualitativas importantes em seus discursos, identificando corretamente a relação direta entre o comprimento do pêndulo e o tempo das oscilações.

Segundo os próprios alunos, o experimento exigiu reconhecer que o pêndulo realiza um movimento oscilatório periódico, no qual a massa descreve um vai e vem em torno de uma posição de equilíbrio. “Cada ida e volta completa corresponde a um período, e percebemos que o tempo de cada oscilação depende do comprimento do fio”, relataram. Também destacaram que há sempre uma força restauradora, a componente do peso, que tende a trazer o pêndulo de volta à posição de equilíbrio, que identifica o movimento como um exemplo aproximado de movimento harmônico simples.

Consequentemente, os objetivos conceituais principais, tais como a compreensão prática dos sistemas oscilatórios mecânicos e do caráter periódico do movimento harmônico simples, foram alcançados com êxito.

Essa experiência também está alinhada às competências previstas na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para Ciências da Natureza, ao destacar a importância da análise

crítica, do raciocínio investigativo e da comunicação de resultados científicos com base em evidências confiáveis. Em síntese, apesar das dificuldades encontradas na etapa quantitativa do experimento, a atividade revelou-se valiosa para promover nos alunos uma postura investigativa, reflexiva e próxima das práticas científicas autênticas.

No segundo experimento, envolvendo o diapasão e a caixa de ressonância (Figura 13), os estudantes puderam perceber, de forma auditiva, como a vibração do diapasão isolado se intensificava quando sua base tocava a superfície da caixa, fenômeno explicado pelo aumento da ressonância sonora. Essa experiência foi particularmente impactante para a turma, pois ofereceu uma manifestação sensorial clara de um conceito abstrato. Foram propostas algumas perguntas para que, entre as equipes, discutissem alguns pontos (Figura 14)

Figura 14). Um deles foi como eles descrevem a diferença das vibrações produzidas pelo diapasão isolado (no ar) e pelo diapasão encostado à caixa de ressonância. Algumas das respostas seguem na Figura 15.

Figura 13 – Experimento do diapasão com a caixa de ressonância.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 14 – Equipes discutindo sobre o experimento do diapasão com a caixa de ressonância.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 15 - Resposta da primeira equipe sobre a percepção da vibração do diapasão nas duas situações propostas.

Como você descreve qualitativamente a diferença das vibrações produzidas pelo diapasão isolado (no ar) e pelo diapasão acoplado à caixa de ressonância?

No ar ele vibra na caixa ele transmite um som afinado e longo

Transcrição: “No ar ele vibra na caixa ele transmite um som afinado e longo”.

Fonte: Dados da pesquisa.

A mesma equipe, quanto a intensidade sonora, fez a seguinte observação que consta na Figura 16.

Figura 16 – Resposta da primeira equipe sobre a intensidade sonora do diapasão nas duas situações propostas.

Situação experimental	Intensidade sonora observada (qualitativa)	Observações adicionais
Diapasão vibrando no ar	<i>Som agudo</i>	
Diapasão com caixa ressonante	<i>Parece um só agudo vibratório</i>	

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 17 – Resposta da segunda equipe sobre a intensidade sonora do diapasão nas duas situações propostas.

Situação experimental	Intensidade sonora observada (qualitativa)	Observações adicionais
Diapasão vibrando no ar	<i>a vibração do diapasão no ar é isolada</i>	
Diapasão com caixa ressonante	<i>a vibração na caixa é distribuída</i>	

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar as respostas apresentadas pelos estudantes, é possível observar a recorrência de termos-chave relacionados ao fenômeno estudado, tais como “vibra”, “vibratório” e “transmissão”, evidenciando a maneira pela qual os alunos interpretam a propagação das vibrações mecânicas. Para eles, a vibração é claramente compreendida como algo capaz de ser transmitido e distribuído através de diferentes meios. Na resposta registrada pela equipe apresentada na Figura 17, os estudantes mencionam que a vibração do diapasão no ar é

“isolada”, apenas no local da base em que seguram o diapasão sentindo pelo tato nos dedos, enquanto na caixa é “distribuída”, indicando uma percepção qualitativa inicial coerente com a ideia da propagação do fenômeno vibratório.

Essa associação feita pelos estudantes sugere uma construção preliminar de significado acerca dos conceitos físicos abordados, alinhando-se diretamente ao objetivo da atividade, que consiste em promover a observação cuidadosa e a interpretação qualitativa dos fenômenos ondulatórios.

Conforme recomendado pelo manual do professor, a mediação docente enfatizou continuamente a conexão entre os fenômenos macroscópicos observados experimentalmente e situações próximas da realidade dos estudantes. Além disso, foi introduzida, de forma acessível e contextualizada, uma reflexão sobre vibrações em escala microscópica, destacando-se as diferenças fundamentais entre o oscilador harmônico clássico e o quântico. Embora a abordagem referente à escala quântica tenha sido mencionada brevemente, esse momento foi essencial para a criação de pontes conceituais que seriam exploradas mais profundamente nas etapas subsequentes.

A avaliação formativa ocorreu de maneira processual, levando em conta a participação dos estudantes nas medições, a qualidade das observações registradas e sua capacidade de formular explicações consistentes para os fenômenos experimentados.

Em síntese, a primeira sessão experimental demonstrou-se eficaz para a introdução e consolidação inicial de conceitos fundamentais relativos a vibrações e ressonância, fornecendo uma base conceitual sólida para a compreensão dos tópicos subsequentes sobre osciladores quânticos, propagação ondulatória e, finalmente, sobre as flutuações do vácuo.

6.3.3 Sessão de Experimentação 2 – O Princípio da Incerteza de Heisenberg: Analogias com um plano Inclinado

O terceiro encontro foi dedicado à segunda sessão experimental, cujo objetivo principal era introduzir, por meio de uma analogia experimental acessível, a ideia fundamental do Princípio da Incerteza de Heisenberg. Conforme previsto no Manual para o Professor, a atividade buscou evidenciar, por meio de um experimento simples, as dificuldades inerentes à medição simultânea de duas grandezas conjugadas, neste caso, posição e tempo, os estudantes utilizaram uma bola rolando sobre um plano inclinado (Figura 18). Embora se tratasse de um experimento clássico, sua estrutura pedagógica permitiu que os estudantes compreendessem de forma preliminar que as incertezas não são exclusivas de limitações instrumentais ou erros

humanos, mas podem refletir uma característica intrínseca à natureza dos fenômenos físicos, especialmente quando considerados em escala quântica.

Figura 18 – Equipes discutindo sobre o experimento do plano inclinado como analogia do princípio da incerteza de Heisenberg.



Fonte: Acervo do autor.

Devido ao reduzido número de alunos presentes nesse encontro, a dinâmica inicialmente proposta no manual precisou ser adaptada pelo professor-pesquisador. Nesse contexto, as medições previstas originalmente foram simplificadas, mantendo-se apenas a medição dos instantes em que a bola atingia uma posição previamente estabelecida no plano inclinado. A turma foi organizada em três equipes, com cada grupo realizando medições sequenciais para assegurar o envolvimento ativo de todos os estudantes na coleta e registro dos dados obtidos (Figura 19). Esse ajuste metodológico, embora tenha suprimido parcialmente a atividade original, preservou os objetivos centrais da sessão, permitindo uma exploração profunda das incertezas experimentais.

Desde o início da atividade, destacou-se a importância da colaboração entre os integrantes de cada equipe, considerando que a precisão das medições dependia diretamente da coordenação entre quem liberava a bola, quem cronometrava e quem registrava os resultados. Esse cenário cooperativo estimulou um ambiente de investigação coletiva, no qual foram frequentes comentários críticos e sugestões espontâneas de ajustes nas medições, demonstrando um engajamento reflexivo por parte dos estudantes com o experimento realizado.

Figura 19 – Medição do tempo na posição 80 cm do plano inclinado realizadas pelas equipes.
Equipe 1:

Posição	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Média do Δt
80 cm	0,68	0,63	0,69	0,70	0,74

Equipe 2:

Posição	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Média do Δt
80	0,78	0,81	0,87	0,75	0,80

Equipe 3:

Posição	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Média do Δt
80	0,54	0,41	0,61	0,48	0,6

Fonte: Dados da pesquisa.

Na discussão coletiva subsequente, o professor mediou cuidadosamente a análise dos dados registrados, questionando os grupos sobre possíveis explicações para a variabilidade observada nas medições. Inicialmente, os estudantes atribuíram essas variações somente a falhas humanas ou limitações instrumentais, o que representou uma oportunidade importante para problematizar a diferença entre as chamadas “incertezas experimentais” e a “incerteza intrínseca” característica dos sistemas quânticos. Essa reflexão conceitual foi construída gradualmente, em consonância com as orientações presentes no manual, estabelecendo uma transição conceitual fundamental para o entendimento posterior dos fenômenos quânticos investigados.

Por tratar-se da última sessão dedicada exclusivamente às experimentações práticas, essa atividade foi conduzida simultaneamente à experimentação sobre o análogo das ondas do efeito Casimir, detalhado na próxima sessão desta dissertação. Dessa forma, foi possível estabelecer uma ponte conceitual entre as atividades, reforçando a perspectiva metodológica embasada na teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel. Segundo essa perspectiva, a construção de novos conhecimentos ocorre por meio do estabelecimento de relações substantivas e não arbitrárias com os subsunções cognitivos já presentes na estrutura mental

dos alunos. De fato, os estudantes mobilizaram intuitivamente subsunções conceituais já familiares a eles, relacionados às experiências prévias com medições no cotidiano e aos limites práticos da precisão instrumental em situações do dia a dia. Esses subsunções, embora ainda preliminares, foram eficazes na construção inicial de significados mais robustos relacionados à ideia de incerteza e ao reconhecimento de que tais limitações vão além de simples erros de medição.

Em síntese, apesar das adaptações necessárias em função do contexto de aplicação, a sessão experimental sobre o Princípio da Incerteza cumpriu satisfatoriamente seu papel didático-pedagógico. Ela possibilitou aos estudantes uma compreensão inicial e significativa acerca da natureza das incertezas físicas, pavimentando o caminho conceitual para a compreensão posterior das flutuações quânticas e, consequentemente, do efeito Casimir, conforme previsto na proposta didática do produto educacional desenvolvido neste trabalho.

6.3.4 Sessão de Experimentação 3 – Análogo do Efeito Casimir: Ondas de Água e força de radiação

Figura 20 – Alunos dispostos ao redor do Modelo Didático Análogo do Efeito Casimir (MDA-EC).



Fonte: Acervo do autor.

A terceira sessão experimental foi conduzida com os estudantes organizados nas mesmas equipes do experimento anterior. O professor-pesquisador apresentou o MDA-EC, construído de acordo com o manual de fabricação do modelo didático do então produto educacional em questão. Após a explicação do funcionamento do conjunto, solicitou-se a observação atenta do sistema desde o acionamento em baixa intensidade até níveis mais elevados de vibração da plataforma, nos quais se tornava visível o movimento de aproximação das placas (Figura 20). Em seguida, as equipes responderam a cinco de questões orientadoras sobre o que haviam observado (Figura 21).

Figura 21 – Alunos observando e registrando medições no MDA-EC, durante atividade investigativa sobre ondas e aproximação de placas.



Fonte: Acervo do autor.

As respostas foram registradas e analisadas, preservando-se sua grafia original, por se tratar de evidências do processo de construção de significados (Figura 22, Figura 23 e Figura 24).

Figura 22 – Respostas da equipe 1 referentes as observações feitas do MDA-EC.

1. O que ocorre com a movimentação das placas quando o motor é ligado?

DE A LARDO COM AS VIBRAÇÃO ELAS FICAM JUNTAS

2. A oscilação das ondas na região entre as placas difere daquela observada na área externa?

AJ VIBRAÇÃO FAZ COM QUE OCASIONE A MOVIMENTAÇÃO DAS PLACAS DURANTE O PROCESSO DE VIBRAÇÃO DA ÁGUA QUE ACABAM LASIONADO . MOVIMENTAÇÃO DAS PLACAS QUE ESTÃO NO CENTRO

3. Quais diferenças você observa na amplitude e na propagação das ondas na região entre as placas em comparação com as áreas externas?

O movimento de forma o mais intenso que o do dentro

4. De que forma a ativação da superfície vibratória altera o comportamento das ondas na água?

com a vibração na superfície a vibração vai ficando muito extensa

5. Como você descreveria a movimentação das placas antes e após as vibrações?

ANTES DAS VIBRAÇÃO ELAS ESTAVAM COM AVIBRAÇÃO ELAS SE VENEM.

Fonte: Dados da pesquisa

Figura 23 – Respostas da equipe 2 referentes as observações feitas do MDA-EC.

1. O que ocorre com a movimentação das placas quando o motor é ligado?
Com a movimentação das ondas as placas se juntam
2. A oscilação das ondas na região entre as placas difere daquela observada na área externa?
A diferença ondas diminuem no centro
3. Quais diferenças você observa na amplitude e na propagação das ondas na região entre as placas em comparação com as áreas externas?
A frequência da externa é maior que a interna
4. De que forma a ativação da superfície vibratória altera o comportamento das ondas na água?
altera como uma forma de onda como se a agua estivesse fervendo
5. Como você descreveria a movimentação das placas antes e após as vibrações?
Antes as placas estão no seu lugar certo
depois estão comprimidas e se juntam
depois voltam ao seu lugar

Fonte: Dados da pesquisa

Figura 24 – Respostas da equipe 3 referentes as observações feitas do MDA-EC.

1. O que ocorre com a movimentação das placas quando o motor é ligado?
De acordo com a pressão da água faz as placas ficar juntas.
2. A oscilação das ondas na região entre as placas difere daquela observada na área externa?
Onde as placas
a oscilação entre as placas é bem maior do que as parte externa.
3. Quais diferenças você observa na amplitude e na propagação das ondas na região entre as placas em comparação com as áreas externas?
a oscilação entre os placas é maior que a externa.
4. De que forma a ativação da superfície vibratória altera o comportamento das ondas na água?
de acordo com a aumento da vibratória as onda das agua aumentam.
5. Como você descreveria a movimentação das placas antes e após as vibrações?
COM A FORÇA DA ENERGIA FAZ AS PLACAS FICAR JUNTAS

Fonte: Dados da pesquisa

De modo geral, todas as equipes reconheceram que, com a vibração da superfície líquida, as placas se aproximam (“as placas se juntam”; “a pressão da água faz as placas ficar

juntas”). Essa convergência qualitativa indica que os estudantes apreenderam o núcleo fenomenológico do análogo: a excitação da água produz padrões de onda distintos nas regiões interna e externa às placas. Denardo e Larraza (2009, p. 1095), explicam que praticamente não há movimento ondulatório entre as placas, devido à existência de um menor comprimento de onda no recipiente, enquanto fora delas o campo de ondas é aproximadamente homogêneo e isotrópico; portanto, a atração decorre do desbalanceamento da pressão de radiação. À luz da Teoria da Aprendizagem Significativa, observa-se a mobilização de subsunções cotidianas, como as ideias de “pressão” ou “agitação” do meio, para ancorar a interpretação do fenômeno, favorecendo a atribuição de significado ao comportamento observado.

As descrições sobre a oscilação entre as placas em comparação à região externa revelaram percepções distintas: enquanto alguns grupos relataram menor “intensidade” no interior, outros apontaram maior “oscilação” ou “frequência” entre as placas. Tal divergência é compatível com a natureza do sistema: variações no espaçamento entre as placas e no nível de excitação podem suprimir determinados modos permitidos no interior (confinamento) ou, localmente, realçar amplitudes devido à formação de padrões quase-estacionários. Do ponto de vista didático, a heterogeneidade das respostas indica que os estudantes observaram aspectos relevantes do campo de ondas, ainda que com vocabulário não padronizado, o que demanda mediação explícita sobre o que comparar (interior/exterior), onde observar (próximo às bordas/centro) e em que regime de excitação.

Nas questões relativas a amplitude, frequência e propagação, os termos foram, por vezes, empregados como sinônimos (“fora é mais intensa”, “a frequência externa é maior”, “a oscilação entre as placas é maior”), evidenciando conflitos semânticos esperados em estágios iniciais de aprendizagem. Em termos ausubelianos, os estudantes recorreram a subsunções pré-formais (“mais forte”, “maior”, “rápido”) para significar grandezas físicas distintas. Cabe, portanto, uma intervenção docente que diferencie amplitude (variação máxima da superfície), frequência (número de oscilações por segundo) e intensidade (fluxo de energia), consolidando uma diferenciação progressiva e preparando a reconciliação integrativa desses conceitos.

Os registros também mostram que os estudantes reconheceram o papel do controle de excitação da plataforma (“as ondas aumentam”, “como se a água estivesse fervendo”) como variável que altera o regime de ondas e, por consequência, a força observada sobre as placas. A metáfora “fervura” funcionou como subsunção imagético, aproximando a experiência do cotidiano e sustentando a transição para uma leitura mais formal (aumento de amplitude/energia e mudança de padrão modal com a excitação).

Por fim, as descrições sobre o comportamento antes e depois da vibração indicam

a percepção de uma cadeia causal qualitativa: excitação da superfície para a modificação do padrão de ondas para aproximação das placas, seguida de eventual retorno ao posicionamento inicial. Essa menção ao retorno sugere que os alunos também intuem a ação de forças restauradoras (peso, flutuabilidade, tensões do suporte), o que enriquece a leitura fenomenológica e cria pontes com conteúdos clássicos de equilíbrio e dinâmica.

Em síntese, a sessão cumpriu a função de culminância experimental da sequência, consolidando o elemento essencial do análogo do Efeito Casimir, a aproximação de placas mediada por diferenças no campo de ondas, e preparando semanticamente a transição para a discussão teórica sobre flutuações do vácuo e pressão de radiação no contexto quântico. Embora persistam dificuldades terminológicas (amplitude, frequência, intensidade) e a necessidade de formalização quantitativa, as evidências qualitativas coletadas indicam que os objetivos pedagógicos foram alcançados. Os estudantes reconheceram, descreveram e justificaram, com base em observações, os aspectos centrais do fenômeno, configurando uma base de significados adequada para os desdobramentos conceituais por vir subsequente.

6.3.5 Avaliação discente do produto educacional

Em continuidade às análises realizadas nas subseções anteriores, nas quais foram discutidos o desempenho conceitual dos alunos e os resultados das sessões experimentais com pêndulo, diapasão e MDA-EC, esta seção apresenta a apreciação discente sobre o produto educacional. Os resultados são as narrativas registradas em diário de campo e nas falas espontâneas, assumindo caráter predominantemente qualitativo e interpretativo, conforme já delineado no capítulo de metodologia. Ao final, articulam-se os achados às competências da BNCC e ao referencial de aprendizagem significativa (Ausubel, 2003; Brasil, 2017), estabelecendo um diálogo com as conclusões gerais do estudo.

Do ponto de vista das impressões gerais, os estudantes destacaram a novidade de manusear aparatos e observar fenômenos em situação prática, experiência que relataram não ter vivenciado no percurso de disciplinas de Ciências da Natureza cursado anteriormente na EJA Fundamental, última experiência estudantil que tiveram. Tal percepção aparece em comentários como “não havia parado para pensar nesse tipo de comportamento” ao observar a aproximação das placas no MDA-EC, indicando surpresa a e disponibilidade para reorganização conceitual. Também emergiu um paralelo vívido: um aluno resgatou a memória de acompanhar o tio pescador, que recomendava não ancorar duas jangadas lado a lado “porque as ondas do mar fariam com que se chocassem”. Esse vínculo entre experiência cotidiana e observação no

laboratório evidencia a ativação de subsunções concretos para ancorar novos significados, aspecto central da aprendizagem significativa (Ausubel, 2003) e coerente com o uso didático de analogias explicitadas ao longo da sequência.

No eixo das aprendizagens percebidas, o Princípio da Incerteza de Heisenberg foi o conceito mais mencionado. Os estudantes verbalizaram ter compreendido que a incerteza, no âmbito quântico, é intrínseca ao sistema e não mera limitação instrumental, um deslocamento interpretativo que foi sendo produzido ao longo das atividades, com recorrências às experiências já realizadas (plano inclinado e cronometragens). Sobre o Efeito Casimir, além das associações com as jangadas, um discente retomou a sessão de sensibilização a partir da Lei de Moore, relacionando a miniaturização de transistores e a possibilidade de interferências de flutuações do vácuo em escalas muito pequenas. Esses indícios sugerem que a estratégia de modelagem análoga (água/ondas) funcionou como papel intermediador, desde que acompanhada do esclarecimento de correspondências e limite, procedimento pedagógico necessário para evitar extrapolações indevidas e promover reconciliação integrativa entre os domínios clássico e quântico (Ausubel, 2003).

Quanto às dificuldades, os registros convergiram para o tratamento matemático dos dados na atividade do pêndulo: preenchimento incompleto das colunas de período e frequência, bem como fragilidades com frações e proporções (Figura 10, Figura 11 e Figura 12). Tais obstáculos, já identificados nas discussões precedentes, circunscrevem a análise quantitativa e demandam intervenções de apoio (organizador prévio matemático, retomada de leitura de gráficos e de unidades), sem deslocar o foco nuclear da sequência para a formalização.

Em relação à motivação e engajamento, os estudantes foram mais ativos do que em aulas predominantemente expositivas, participando de medições, discussões e registros. Ainda que não tenham mencionado buscas extraclasse, foi recorrente o pedido por mais tempo para “anotações e conclusões”, o que reforça a necessidade de gestão temporal compatível com práticas investigativas: coleta, análise, confronto de explicações e comunicação de resultados entre pares.

A síntese avaliativa das narrativas indica que o produto educacional favoreceu (i) curiosidade intelectual e investigação sobre fenômenos não diretamente acessíveis; (ii) uso consciente de modelos e analogias para interpretar regularidades observáveis; e (iii) argumentação a partir de observações e registros, ainda que com limitações no tratamento numérico. Essas dimensões se alinham às competências gerais da BNCC, notadamente a 2 (investigar e resolver problemas), a 4 (usar diferentes linguagens, inclusive a científica) e a 7 (argumentar com base em evidências), e às competências específicas de Ciências da Natureza

no Ensino Médio, que enfatizam analisar fenômenos por meio de modelos, construir explicações e comunicar conclusões a públicos diversos (Brasil, 2017). Do ponto de vista teórico, a presença de subsunções cotidianas (caso das jangadas) e o retorno a situações experimentais anteriores durante as falas dos estudantes são coerentes com os princípios da diferenciação progressiva e da reconciliação integrativa (Ausubel, 2003), sinalizando avanços no mapeamento conceitual pretendido pela sequência.

Como implicações didáticas, recomenda-se: (a) inserir um organizador prévio matemático breve antes das atividades com séries temporais (período/frequência) e tabelas; (b) explicitar, na condução das discussões, as distinções entre amplitude, frequência e intensidade nas diferentes partes da sequência; e (c) ampliar o tempo de registro e socialização de conclusões ao final de cada sessão, de modo a potencializar a escrita científica dos grupos. Tais ajustes não alteram o núcleo conceitual da proposta, mas mitigam os gargalos apontados e fortalecem a consolidação dos resultados.

Em termos de limitações, convém prudênci na generalização dos achados, dadas as condições típicas da EJA (frequência variável) e o recorte matemático observado. Ainda assim, as evidências trianguladas entre observação, registros e narrativas sustentam que a sequência foi exequível, formativa e aderente às diretrizes curriculares: promoveu engajamento em práticas científicas, articulou conceitos clássicos e modernos por meio de analogias controladas e produziu compreensão qualitativa de noções-chave (incerteza intrínseca e efeito Casimir).

Por fim, esta avaliação discente fecha o bloco de Resultados e Discussões sintetizando a percepção dos estudantes sobre a proposta e fornecendo subsídios diretos para seu aperfeiçoamento. Na seção subsequente, retoma-se o problema de pesquisa à luz do conjunto dos achados empíricos e teóricos, explicitando as conclusões e os desdobramentos para práticas docentes e investigações futuras.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo retomou o desafio de inserir conteúdos de Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica por meio de uma sequência didática centrada em analogias e culminada na construção e uso de um modelo didático análogo do Efeito Casimir com ondas de água. Teve como objetivo geral promover a aprendizagem conceitual de osciladores, ondas e noções introdutórias de flutuações do vácuo, articulando-as a práticas investigativas e à comunicação científica previstas na BNCC, além de verificar a viabilidade pedagógica do produto educacional em contexto real de escola pública, na modalidade EJA.

A síntese dos resultados indicou avanços conceituais consistentes. Os estudantes reconheceram o caráter periódico de sistemas oscilatórios e estabeleceram, de forma qualitativa, a relação entre o comprimento do pêndulo e o tempo de oscilação. Na experiência com o diapasão, compreenderam a amplificação por ressonância. Na analogia do plano inclinado, diferenciaram incertezas de medida e incerteza como traço da própria natureza de certos fenômenos. E, no análogo do Efeito Casimir, descreveram adequadamente a aproximação das placas como efeito da diferença de padrões de onda e de pressão de radiação entre a região interna e externa. Persistiram, contudo, confusões terminológicas entre amplitude, frequência e intensidade, compatíveis com o estágio inicial de formalização.

Em termos metodológicos, a proposta mostrou-se exequível, acessível e aderente às competências gerais e específicas de Ciências da Natureza. O trabalho com problemas concretos, a observação orientada, o registro de evidências e a discussão guiada favoreceram a participação e o engajamento, especialmente quando as atividades convocaram experiências sensoriais (vibrações, som, movimento). O alinhamento com a BNCC revelou-se com a identificação da investigação, análise crítica e a comunicação de resultados que foram exercitadas em cada sessão, com ganhos perceptíveis na qualidade das explicações formuladas pelos grupos.

As implicações educacionais foram duplas. No plano formativo, a sequência aproximou conteúdos de fronteira, tradicionalmente percebidos como “distantes”, da realidade da escola pública, oferecendo itinerários de aprendizagem que respeitaram o ponto de partida dos estudantes e valorizaram subsunções concretos, à luz da aprendizagem significativa. No plano curricular, os resultados reforçaram que a Física Moderna e Contemporânea pode ser abordada no Ensino Médio de forma gradual, rigorosa e acessível quando amparada por analogias bem explicitadas e por experiências simples que façam a mediação entre o visível e o abstrato.

As limitações foram perceptíveis em dois eixos. Em primeiro lugar, o repertório matemático do grupo, especialmente no que se refere sobre frações, proporções e leitura de gráficos, restringiu a formalização quantitativa de algumas atividades, o que exigiu priorizar relações qualitativas para não desviar o foco conceitual. Em segundo lugar, a baixa frequência típica do público EJA reduziu a continuidade de participação e, por consequência, a comparabilidade de desempenhos ao longo das sessões. Tais limitações, de natureza contextual, não anulam os achados, contudo delimita os resultados indicando uma necessária melhoria futura.

As sugestões para trabalhos futuros distribuíram-se em quatro frentes. (i) Ampliação de público e cenário: replicar e adaptar a sequência para outras séries e público, com turmas regulares e até outros perfis de EJA, de modo a testar a consistência do produto educacional proposto e a capacidade a proposta a outros contextos. (ii) Aprofundamento conceitual: incorporar módulos de reforço matemático breves (frações, razão, leitura de gráficos) e atividades específicas para diferenciar amplitude, frequência e intensidade, consolidando a linguagem científica. (iii) Expansão temática por analogias: desenvolver análogos para fenômenos como efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula, difração de elétrons e supercondutividade em abordagem fenomenológica, mantendo a explicitação dos limites de cada analogia. (iv) Validação dos pares: submeter o material a ciclos de avaliação por professores da área (oficinas, protocolos de usabilidade, critérios alinhados à BNCC), de modo a aprimorar clareza, sequenciamento e instrumentos de avaliação formativa.

Em síntese, os objetivos do trabalho foram atendidos: houve aprendizagem conceitual relevante, engajamento em práticas científicas e demonstração de viabilidade do produto educacional no contexto investigado. A experiência evidenciou que a inserção responsável de tópicos de Mecânica Quântica na Educação Básica depende menos de aparelhos sofisticados e mais de boas perguntas, mediações atentas e escolhas didáticas que respeitem o percurso de quem aprende.

Como fechamento, cabe uma nota reflexiva. Ao aproximar o “muito pequeno” da sala de aula, este estudo reafirmou que ensinar ciência é também um gesto de equidade: oferece novas lentes para olhar o mundo e reconhece nos estudantes, inclusive os que retornam à escola pela modalidade EJA, a potência de compreender fenômenos complexos quando estes lhes são apresentados com rigor e humanidade. Se a Mecânica Quântica desafia o senso comum, a escola pode transformar esse desafio em curiosidade, é nesse espaço, entre o conhecido e o por conhecer, que este trabalho encontrou seu lugar.

REFERÊNCIAS

- ABBAGNANO, Nicola. **Dicionário de Filosofia**. 5. ed. Tradução da 1^a edição brasileira coordenada e revista por Alfredo Bossi; revisão da tradução e tradução dos novos textos Ivone Castilho Benedetti. São Paulo: Martins Fontes, 2007, 1014 p. ISBN 978-85-336-2356-9.
- ALMEIDA, Flaviane da Silva. **Sequência de ensino aprendizagem para ensinar os Postulados da Mecânica Quântica no Ensino Médio**. Orientador: Wagner Franklin Balthazar. 2022. 203f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino em Física) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2022.
- ANTONIO, Alan Pereira. **Proposta de UEPS para inserção do conteúdo de física quântica através de uma atividade experimental**. Orientador: Thadeu Josino Pereira Penna. 2019. 140f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense, Volta redonda, 2019.
- ARAÚJO, Carlos Alberto Santos. **Aplicação de jogos no ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma alternativa didática potencializando o aprendizado no ensino médio**. Orientador: Carlos Alberto Santos de Almeida. 2018. 116 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- AUSUBEL, David Paul. **Aquisição e retenção de conhecimentos**: Uma perspectiva cognitiva. Tradução: Lígia Teopisto. Setúbal: Plátano Editora, 2003. 222p. ISBN 978-97-27073-64-1.
- BOZELLI, Fernanda C.; NARDI, Roberto. **Analogias no ensino de Física**: alguns exemplos em mecânica. In. Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 6, 2007, Florianópolis. **Anais** [...] Florianópolis: ABRAPEC, 2007. p. 1-11. Disponível em: <http://www.fep.if.usp.br/~profis/arquivos/vienpec/CR2/p615.pdf>. Acesso em 10 abr. 2025.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018.
- BUCUSSI , Alessandro A. Introdução ao conceito de energia. **Textos de Apoio ao Professor de Física**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 32, 2007. ISSN 1807-2763. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/tapf/v17n3_Bucussi.pdf. Acesso em 10 de jun. 2025.
- CABRAL, Rayanna Correa. **Energia elétrica sustentável e Mecânica Quântica: uma proposta didática para o ensino médio com o uso da aprendizagem baseada em projetos e enfoque STEAM**. Orientador: Silvana Perez. 2022. 171f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências, Matemática e Tecnologias) - Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.
- CARREIRO, Alex Kevyn dos Anjos. **Ensino de Computação Quântica na Nuvem**. Orientador: Matheus Pereira Lobo. 2022. 89f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Campus Universitário de Araguaína, Universidade Federal do Norte do Tocantins, Araguaína, 2022.
- CARVALHO, Anna M.; GIL-PÉREZ, Daniel. **Formação de Professores de Ciências**: tendências e inovações. 10. ed. São Paulo: Cortez, 1998. 120p. ISBN: 85-249-0516-7.

CASIMIR, Hendrik Brugt Gerhard. On the attraction between two perfectly conducting plates. **Indag. Math.**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 793-795, 1948. Disponível em: <http://www.dwc.knaw.nl/DL/publications/PU00018547.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2025.

COUGO-PINTO, Marcus Venicius; FARINA, Carlos; TORT, Alexandre. O Efeito Casimir. [s. l.]: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 1, mar. 2000. Disponível em: https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_122.pdf. Acesso em 17 abr. 2025.

CRUZ, Ubirajara Malaquia. **Jogo Ludophysis para explorar o efeito fotoelétrico no ensino médio por meio de uma UEPS**. Orientador: Francineide Amorim Costa Santos. 2021. 107f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Departamento de Física, Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, 2021.

DARROZ, Luiz Marcelo. Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel. **Revista Espaço Pedagógico**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 576-580, 2018. DOI: 10.5335/rep.v25i2.8180. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/rep/article/view/8180>. Acesso em: 20 fev. 2025.

DENARDO, Bruce C.; PUDA, Joshua J.; LARRAZA, Andrés. A water wave analog of the Casimir effect. **American Journal of Physics**, [s. l.], 2009, v. 77, dez., p. 1095–1101. DOI 10.1119/1.3211416. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article-abstract/77/12/1095/1042888/A-water-wave-analog-of-the-Casimir-effect?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 30 mar. 2025.

DIAS, Diego Nonato Bastos. Possível analogia entre a termodinâmica e a eletricidade no ensino médio. [s. l.]: **Caderno de Física da UEFS**, v. 20, n. 2, p. p. 2401.1–7, 2022. DOI: 10.13102/cadfsuefs.v20i02.9306. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/index.php/cadfs/article/view/9306>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ERCAN, Gonenc; CICEKLI, Ilyas. Using lexical chains for keyword extraction. **Information Processing & Management**, v. 43, n. 6, p. 1705-1714, 1 novembro 2007. ISSN 0306-4573. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306457307000398>. Acesso em: 24 mar. 2025.

ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães; GOBARA, Shirley Takeco; JARDIM, Maria Inês Affonseca; AZEVEDO ERROBIDART, Hudson; MARQUES, Simone Machado. Modelos mentais e representações utilizadas por estudantes do ensino médio para explicar ondas. [s. l.]. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, vol. 12, n. 3, p. 440-457, 2013. ISSN 1579-1513. Disponível em: https://reec.uvigo.es/volumenes/volumen12/REEC_12_3_4_ex701.pdf. Acesso em 11 de jun. 2025.

FAZ de conta. Intérprete: Humberto Gessinger. Compositores: Humberto Gessinger e Melissa Mattos. In: Engenheiros do Hawaii: Acústico Novos Horizontes. Intérprete: Humberto Gessinger. São Paulo. Universal Music Brasil, 2007. 1CD, faixa 12.

FERRY, Alexandre Da Silva; NAGEM, Ronaldo Luiz. Modelo de compreensão do raciocínio analógico por duas vias: uma contribuição para o ensino e a aprendizagem em ciências com recursos às analogias. [s. l.]: **Latin American Journal of Science Education**, v. 1, p. 1-22, mai. 2015. Disponível em: http://www.lajse.org/may15/12062_Ferry.pdf. Acesso em 6 abr. 2025.

GERHARDT, Tatiana Engel; Silveira, Denise Tolfo (org.). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009, 120 p. ISBN 978-85-386-0071-8.

GETNER, Dedre. Structure-Mapping: A Theoretical Framework for Analogy. [s. l.]: **Cognitive Science**, v. 7, n. 5, p. 155-170, 1983. DOI 10.1207/s15516709cog0702_3. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1207/s15516709cog0702_3. Acesso em 13 abr. 2025.

GOMES, André Luiz Sartori. **Homem-Formiga e Fantasma no ensino de mecânica quântica**: produção e análise de produto educacional potencialmente significativo. Orientador: Carlos Raphael Rocha. 2023. 67f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências, Matemática e Tecnologias) – Centro de Ciências tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2023.

GRIFFITHS, David J. **Mecânica Quântica**. Tradução: Lara Freitas. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011, 347 p. ISBN: 978-85-7605-927-1.

HANSEN, Taís Regina; MARSANGO, Daniel; BRUM, Débora Larissa; CLERICI, Kátia Slodkowski; SANTOS, Rosemar Ayres. O conceito de energia em periódicos da área de educação em ciências: a discussão da conservação/degradação de energia em práticas educativas de perspectivas Freire-CTS. **Investigações em Ensino de Ciências**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 120–139, 2020. DOI: 10.22600/1518-8795.ienci2020v25n1p120. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/1485>. Acesso em: 11 de jun. 2025.

HERNÁNDEZ, Pedro Javier Villanueva. **Vácuo Quântico**: Fundamentos e Fronteiras. [s. n; s. l.], p. 1-10, 2023. DOI 10.36227/techrxiv.170244486.60969678/v1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.36227/techrxiv.170244486.60969678/v1>. Acesso em 20 mar. 2025.

HOFFMANN, Marilisa Bialvo; SCHEID, Neusa Maria John. Analogias como ferramenta didática no ensino de Biologia. Belo Horizonte: **Revista Ensaio Pesquisa em Educação**, v. 9, n. 1, p. 21-37, jan/jun 2007. DOI 10.1590/1983-21172007090103. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epec/a/QdXTM75M7LV9KrPnqK7WyPz/>. Acesso em 6 abr. 2025.

JUNIOR, Francisco Miranda Monteiro. A " borracha quântica" aplicada como atividade experimental no ensino da Física quântica para alunos do ensino médio. Orientador: Denilson da Silva Borges. 2021. 102f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências, Matemática e Tecnologias) - Programa Nacional de Mestrado em Ensino de Física, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Manaus, 2021.

KRAPAS, Sonia; Silva, Marcos Corrêa. O conceito de campo: polissemia nos manuais, significados na física do passado e da atualidade. **Revista Ciência & Educação**, Bauru, v. 14, n. 1, p. 15-33, 2008. DOI 10.1590/S1516-73132008000100002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/tRmzfNRQq4WyjSMs3yFSxRH/>. Acesso em 10 de jun. 2025.

KRUMMENAUER , Wilson Leandro; COSTA, Sayonara Salvador Cabral; SILVEIRA, Fernando Lang. Uma experiência de ensino de Física contextualizada para a educação de jovens e adultos. **Revista Ensaio**, Belo Horizonte, v. 12, n 2, p. 69-82, mai./ago. 2010. DOI 10.1590/1983-21172010120205. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epec/a/NkLp9W4vCgmR77yMcVM7qFC/#:~:text=Neste%20artigo%2C%20apresenta-se%20um%20exemplo%20de%20como%20%C3%A9,A9,de%20Paulo%20Freire%2C%20David>

%20Ausubel%20e%20Joseph%20Novak. Acesso em 21 fev. 2025.

LONGUINI, Marcos Daniel; NARDI, Roberto. Origens históricas e considerações acerca do conceito de pressão atmosférica. [s. l.]. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.19, n.1: p.64-75, abr. 2000. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/download/9295/8586/27786>. Acesso em: 12 de jun. 2025.

LÜDKE, Menga; ANDRÉ, Marli Eliza Dalmazo Afonso. **Pesquisa em Educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: EPU, 1986. 99 p. ISBN 85-1230-370-0.

MARCONI, Marina de andrade; LAKATOS, Eva Maria. Fundamentos de metodologia Científica. São Paulo: Atlas, 2003, 311 p. ISBN: 85-224-3397-6.

MARTINS, Sonia Rodrigues. **Introdução de Tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio**. Orientador: Ronni Geraldo Gomes de Amorim. 2019. 105f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

MIGUEZ, Maria Luiza. **Estratégias didáticas para ensino de física moderna usando leds**. Orientador: Carlos Alberto Santos de Almeida. 2024. 157f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

MILONNI, Peter W. **The Quantum Vacuum**: na introduction to quantum electrodynamics. San Diego: Academic Press, Inc., 1994, 522p. ISBN 0-12-498080-5.

MOREIRA, Marco A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1999. 195p. ISBN: 85-12-32140-7.

MOREIRA, Marco, Antonio. A Teoria de Aprendizagem de David Ausubel como Sistema de Referência para a Organização de Conteúdo de Física. **Brazilian Journall of Physics**, v. 9. n. 1, p. 275-292, 1979. ISSN 0103-9733. Disponível em: <https://sbfisica.org.br/bjp/download/v09/v09a19.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2025.

MOREIRA, Marco, Antonio. Aprendizagem Significativa: um conceito subjacente. **Aprendizagem Significativa em Revista**, Porto Alegre, v. 1, n. 3, p. 25 – 46, dez. 2011. ISSN 2238-3905. Disponível em: <http://moreira.if.ufrgs.br/apsigsubport.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2025.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica**: fluidos, oscilações e ondas, calor. 4. Ed. São Paulo: Blucher, 2002, v. 2, 314 p. ISBN 978-85-212-0299-8.

OLIVEIRA, Larissa de Sousa. **Investigando o grande mundo das pequenas partículas: uma proposta para ensinar física de partículas no ensino médio**. Orientador: Fernando Wellysson de Alencar Sobreira. 2024. 171f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em Ensino de Ciências (IENCI)**, Porto Alegre, v. 24, p. 23-48, março 2000. ISSN 1518-8795. Disponível

em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/141158/000294300.pdf?sequence=1>. Acesso em: 19 fev. 2025.

PAGE, Matthew J J. *et al.* A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. Tradução: Galvão, Taís Freire; Tiguman, Gustavo Magno Baldin; Sarkis-Onofre, Rafael. **RESS Revista do SUS**, Brasília, v. 31, n. 2, p. 1-20, 13 julho 2022. ISSN 2237-9622. Disponível em:
http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742022000201700&lng=pt&nrm=iso&tlang=pt. Acesso em: 19 fev. 2025.

PEREIRA, Ana Marcia Lopes. **A Física Quântica no Ensino Médio: o interferômetro de Mach-Zehnder no ensino da dualidade onda-partícula**. Orientador: Maxwell Roger da Purificacao Siqueira. 2019. 180f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2019.

PERES, Marcus Vinicius; LENZ, Jorge; JR, Arandi Ginane Bezerra; BORDIN, Giulio Domenico. A produção de um material utilizando o software tracker para abordagem do experimento da difração de elétrons. **Comunicações**, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 71-93, set.-dez. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.15600/2238-121X/comunicacoes.v28n3p71-93>. Disponível em: <https://revistas.metodista.br/index.php/comunicacoes/article/view/751/722>. Acesso em 19 fev. 2025.

PINTO, Rogerio Goncalves. **Proposta de Uso de Animação para Discussão da Transição da Mecânica Clássica para a Mecânica Quântica**. Orientador: Daniel Augusto Barra de Oliveira. 2023. 55f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino em Física) - Campus Universitário de Araguaína, Universidade Federal do Norte do Tocantins, Araguaína, 2023.

RIBEIRO, Francisco Fabio de Sousa. **Analiz e as Proposições Quânticas: uma proposta pedagógica**. Orientador: Lázaro Luís de Lima Sousa. 2021. 167f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Estatística, Universidade Federal Rural Do Semiárido, Mossoró, 2021.

SANTOS, Renato; REIS, Marcos. A Teoria dos Modelos Mentais e a Aprendizagem da Física Quântica. In: IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciência – IX ENPEC, 2013, Águas de Lindóia. **Anais** [...]. DOI:10.13140/RG.2.1.2448.0162. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258555866_A_Teoria_dos_Modelos_Mentais_e_a_Aprendizagem_da_Fisica_Quantica. Acesso em 21 fev. 2025.

SILVA, Beatriz Mendez; BUSS, Cristiano da Silva. Organizadores Prévios para o Ensino de Física: uma aplicação para o estudo de Ondas Mecânicas. **Revista Educar Mais**, Pelotas, v. 3, n. 1, p. 3-14, 2019. DOI 10.15536/educarmais.3.2019.3-14.1375. Disponível em: <https://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/educarmais/article/view/1375>. Acesso em: 21 fev. 2025.

SILVA, João Marcos Costa. **Transposição Didática da Computação Quântica:** estados emaranhados e teleporte quântico. Orientador: Matheus Pereira Lobo. 2023. 90f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Campus Universitário de Araguaína, Universidade Federal do Norte do Tocantins, Araguaína, 2023.

SOUZA, Djalma Gomes. **Implementação de experimentos de Física Moderna no ensino médio: desafios, dificuldades e discussões metodológicas, da concepção a construção do**

produto educacional. Orientador: Nildo Loiola Dias. 2018. 129f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SPARNAAY, Marcus Johannes. Measurements of attractive forces between flat plates. **Physica**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 751-764, 1958. ISSN 0031-8914. DOI 10.1016/S0031-8914(58)80090-7. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031891458800907>. Acesso em: 12 fev. 2025.

TEIXEIRA, Yana Bárbara da Silva; SANTOS, Saulo Cézar Seiffert. Análise de analogias para o ensino de modelos atômicos presentes nos livros didáticos do PNLD 2020. **Revista de Educação em Ciências e Matemática**. v.19, n. 43, 2023. p. 05-21. ISSN (versão online) 2317-5125. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9277807.pdf>. Acesso em 10 jun. 2025.

TIPLER, Paul A; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**: eletricidade e magnetismo, óptica. Tradução: Naira Maria. Rio de Janeiro: LTC, 2009, v. 2, 530 p. ISBN: 978-216-1711-2.

TIRONI, Cristiano Rodolfo; SCHMIT, Eduardo; SCHUHMACHER, Vera Rejane Niedersberg; SCHUHMACHER , Elcio. A Aprendizagem Significativa no Ensino de Física Moderna e Contemporânea. **Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – IX ENPEC**, São Paulo: ABRAPEC, 2013. Disponível em: https://abrapec.com/atas_enpec/ixenpec/atas/resumos/R0986-1.pdf. Acesso em: 20 fev. 2025.

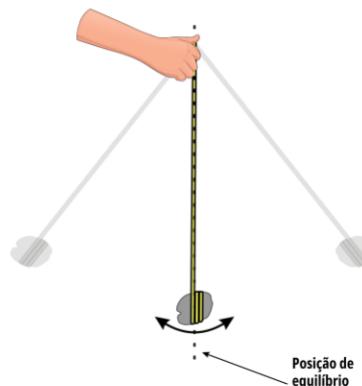
VIEIRA, Valter A. Proposta de critério para avaliação das dissertações de mestrado em administração: uma aplicação no PPA-UEM/UEL. **Revista de Gestão USP**, São Paulo, v. 14, n. V, p. 13-29, janeiro 2007. ISSN 1. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rege/article/download/36587/39308/43124>. Acesso em: 15 fev. 2025.

VOSNIADOU, Stella; ORTONY, Andrew. **Similarity and Analogical Reasoning**. Illinois: Cambridge University Press, 2009. DOI 10.1017/CBO9780511529863. ISBN (online) 978-05-11529863.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DIAGNÓSTICO APLICADO ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Questão 01

O movimento oscilatório é caracterizado pela repetição de um movimento que “vai e volta” em torno de uma posição de equilíbrio. Essa posição de equilíbrio se refere quando o sistema encontra-se em repouso ou relaxado. Esse tipo de movimento é impulsionado por uma força restauradora, que age sempre no sentido de trazer o sistema de volta à sua posição de equilíbrio, sempre que ele é deslocado. Um exemplo clássico desse tipo de movimento é o de uma pedra amarrada em um barbante (um pêndulo), que se move de um lado para o outro, passando sempre pela posição de equilíbrio como indicado na figura 01. Nesse caso, a força restauradora é exercida pelo peso da pedra, que a puxa de volta em direção ao centro do movimento, mantendo a oscilação.



De acordo com as características do movimento oscilatório apresentado no texto, marque todas as situações que podem ser um exemplo também de movimento oscilatório.

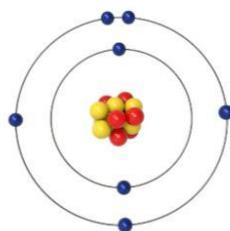
- uma folha caindo de uma árvore.
- o vai e vem de um balanço no parquinho.
- um carrinho descendo uma ladeira.
- mola presa a um objeto (quando uma mola é esticada ou comprimida e depois solta).
- o movimento da corda de um violão ao ser tocada.
- balança de criança (gangorra).
- água escorrendo em um rio.
- um galho de árvore balançando ao vento.

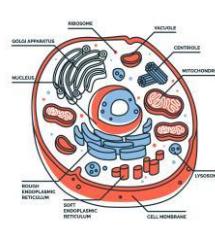
Justificativa: A questão avalia a capacidade do aluno de identificar e aplicar os conceitos de movimento oscilatório, distinguindo-os de outros tipos de movimento. Ela testa a compreensão do aluno sobre a presença de uma posição de equilíbrio, a repetição do movimento e a ação de uma força restauradora.

Questão 02

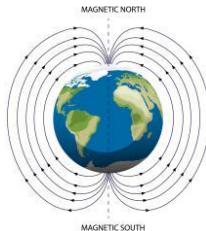
O átomo é a menor unidade de matéria e constitui a base para a composição de todas as substâncias. Ele é composto por um núcleo central, formado por duas partículas fundamentais: os prótons, que possuem carga positiva, e os nêutrons, que são neutros. Ao redor desse núcleo, estão os elétrons, que possuem carga negativa e se encontram em diferentes níveis ou órbitas de energia. A forma mais comum de representar um átomo é com o núcleo no centro, cercado pelas órbitas de elétrons, que se distribuem conforme as camadas de energia.

Qual das imagens a seguir representa um átomo? Marque apenas 1 das imagens.









Justificativa: A questão avalia o conhecimento prévio dos alunos sobre a estrutura atômica, um conceito fundamental em química e física. Ao identificar se o aluno reconhece visualmente um átomo e o diferencia de outros modelos e estruturas, a questão diagnóstica é a base conceitual necessária para a construção de conhecimentos mais avançados.

Questão 03

A energia é a capacidade de realizar trabalho ou provocar mudanças em um sistema. Ela se manifesta de diversas maneiras em nosso cotidiano, como movimento, calor, som e luz. A energia pode ser transformada de uma forma para outra, mas, de acordo com a lei da conservação, ela não pode ser criada nem destruída, apenas transferida ou convertida entre diferentes tipos. Esse princípio é fundamental para compreender como a energia circula e se transforma nos processos naturais e tecnológicos.

Com base no conceito apresentado, analise as situações a seguir:

- 1** Um ciclista com sua bicicleta descendo uma ladeira sem que precise pedalar.  
- 2** Uma panela de água no fogão começando a soltar vapor.  
- 3** Uma bola sendo chutada em direção ao gol.  
- 4** Uma onda quebrando na praia, arrastando areia e conchas.  
- 5** Um alto-falante emitindo música em um show ao ar livre.  
- 6** Um quadro pendurado na parede de uma sala de aula.  

De acordo com as situações acima descritas, marque com um "X" sobre o número da situação para cada pergunta:

Quais dessas situações envolvem a ideia de energia?

Situações: **1** **2** **3** **4** **5** **6**

Em quais delas há transformação de energia?

Situações: **1** **2** **3** **4** **5** **6**

Quais ou qual situação na lista que não apresenta transformação de energia no momento descrito?

Situações: **1** **2** **3** **4** **5** **6**

Justificativa:

A questão avalia o conhecimento prévio dos alunos sobre o conceito de energia e suas transformações, um tema central em física quântica. Ao analisar situações cotidianas, a questão permite identificar se os alunos compreendem a presença e a transformação da energia em diferentes contextos, diagnosticando possíveis lacunas no entendimento.

Questão 04

Em um dia sem ventos, Téo está sentado à beira de uma lagoa observando a água calma. Para se distrair, ele pega uma pequena pedra e a joga na superfície. Assim que a pedra toca a água, pequenas ondulações começam a se espalhar para todas as direções.

Ele percebe que, próximo ao local onde a pedra caiu, há um barquinho de papel flutuando. Téo observa atentamente e percebe algo curioso: apesar das ondas se moverem para longe do ponto de impacto, o barquinho apenas sobe e desce, sem ser levado na direção em que as ondas estão indo.

Intrigado, ele se pergunta: “se a onda está se deslocando pela lagoa, por que o barquinho não vai junto com ela? Isso acontece apenas com esse tipo de onda ou pode ocorrer em outras situações?”

Com base na situação, escolha a explicação que mais faz sentido para o que acontece com o barquinho:

- A) O barquinho se move para cima e para baixo porque as ondas apenas passam por ele, sem transportá-lo continuamente para frente. Isso acontece porque a onda na água não carrega matéria a grandes distâncias, assim como ocorre com outros tipos de ondas, como o som.
- B) O barquinho se move para cima, para baixo e também oscila levemente para frente e para trás porque a onda na água combina dois tipos de movimentos: um que faz a água subir e descer e outro que a desloca momentaneamente na direção da propagação da onda, sem que ele seja transportado para longe.
- C) O barquinho não vai para frente porque a água apenas vibra no mesmo lugar, sem qualquer deslocamento horizontal da superfície.
- D) O barquinho fica no mesmo lugar porque a água não está realmente se movendo, apenas a superfície parece estar em movimento.
- E) O barquinho não se desloca porque a densidade da água impede que ondas se propaguem com intensidade suficiente para transportá-lo.

Justificativa:

A) INCORRETA.

O estudante comprehende a situação, mas faz uma generalização incorreta ao afirmar que as ondas não transportam nada. Embora a onda na água realmente não transporte matéria permanentemente, ela transmite energia, e o movimento do barquinho não ocorre devido à falta de deslocamento horizontal da água, mas sim ao efeito combinado das vibrações verticais e horizontais, como será explicado na alternativa correta.

B) CERTA.

O estudante raciocina corretamente e identifica que a onda na água possui um movimento misto: uma componente transversal (que faz a água subir e descer) e uma componente longitudinal (que desloca a água temporariamente na direção da propagação da onda). Isso é o que causa a oscilação do barquinho para cima e para baixo, e levemente na direção da onda, mas sem transportá-lo para longe, o que está em conformidade com o comportamento das ondas na água.

C) INCORRETA.

O estudante apresenta uma interpretação incorreta ao sugerir que a água "vibra no mesmo lugar" sem qualquer deslocamento horizontal. Embora seja verdade que a água não se desloque muito longe de seu ponto de origem, o movimento da água ainda inclui uma pequena componente longitudinal que leva o barquinho a oscilar levemente na direção da onda. A onda não é apenas uma vibração local, mas também uma propagação de energia que afeta a posição do barquinho de forma mista.

D) INCORRETA.

O estudante não comprehende a natureza do movimento das ondas na água. Embora a água não se move com a intensidade de um fluxo contínuo, ela experimenta uma propagação de energia na forma de ondas. A superfície da água parece estar em movimento devido ao efeito de propagação dessas ondas, e o barquinho sofre os efeitos dessa propagação, subindo e descendo. A afirmação de que a água "não está realmente se movendo" é equivocada, pois se refere apenas ao movimento limitado das partículas de água, que ainda influenciam o barquinho.

E) INCORRETA.

O estudante aplica uma explicação incorreta ao relacionar a densidade da água com a propagação da onda e o movimento do barquinho. A densidade da água não impede a propagação da onda, mas influencia sua velocidade. A explicação de que a densidade impede a onda de transportar o barquinho está errada, já que a densidade não tem a função de bloquear o movimento da água ou a propagação das ondas, apenas altera a forma como elas se movem.

Questão 05

O vácuo é frequentemente associado à ideia de um espaço completamente vazio, sem ar ou qualquer substância. Na física, o vácuo é uma região onde a pressão do ar é extremamente baixa ou inexistente. Isso pode ser alcançado em laboratórios, onde o ar é retirado de um recipiente para criar um espaço quase sem partículas. O vácuo também pode ser encontrado no espaço sideral, onde a quantidade de matéria é muito pequena.

Com base nesse contexto, é correto afirmar que:

- A) O vácuo é um espaço onde não existe nada, nem mesmo energia.
- B) O vácuo é uma região onde há presença de ar em grande quantidade, mas com pouca matéria.
- C) O vácuo é um espaço com baixa pressão, onde não há praticamente nenhuma substância.

- D) O vácuo é um espaço que só pode ser encontrado no espaço sideral, não podendo ser criado em laboratório.
- E) O vácuo é uma região cheia de partículas e gases que ficam acumulados em grandes quantidades.

Justificativa:

A) INCORRETA.

O estudante comete um erro ao afirmar que no vácuo "não existe nada, nem mesmo energia". No vácuo, embora não haja partículas materiais, ele ainda pode conter radiação eletromagnética (como luz ou micro-ondas) e flutuações do campo quântico. Portanto, é incorreto afirmar que não existe energia em um vácuo, já que ele pode ser uma região onde certos tipos de energia ainda estão presentes.

B) INCORRETA.

O estudante confunde o conceito de vácuo ao dizer que ele "tem presença de ar em grande quantidade, mas com pouca matéria". No vácuo, a presença de ar é mínima, ou seja, a quantidade de partículas de ar (ou qualquer outra substância) é extremamente baixa, podendo até ser inexistente. A descrição de "grande quantidade de ar" contradiz a definição de vácuo.

C) CERTA.

O estudante está correto ao afirmar que o vácuo é "uma região com baixa pressão, onde não há praticamente nenhuma substância". A definição de vácuo na física é justamente essa: uma região onde a pressão é muito baixa (quase inexistente), com poucas ou nenhuma partícula material. A afirmação está alinhada com os conceitos de vácuo em laboratório e no espaço sideral.

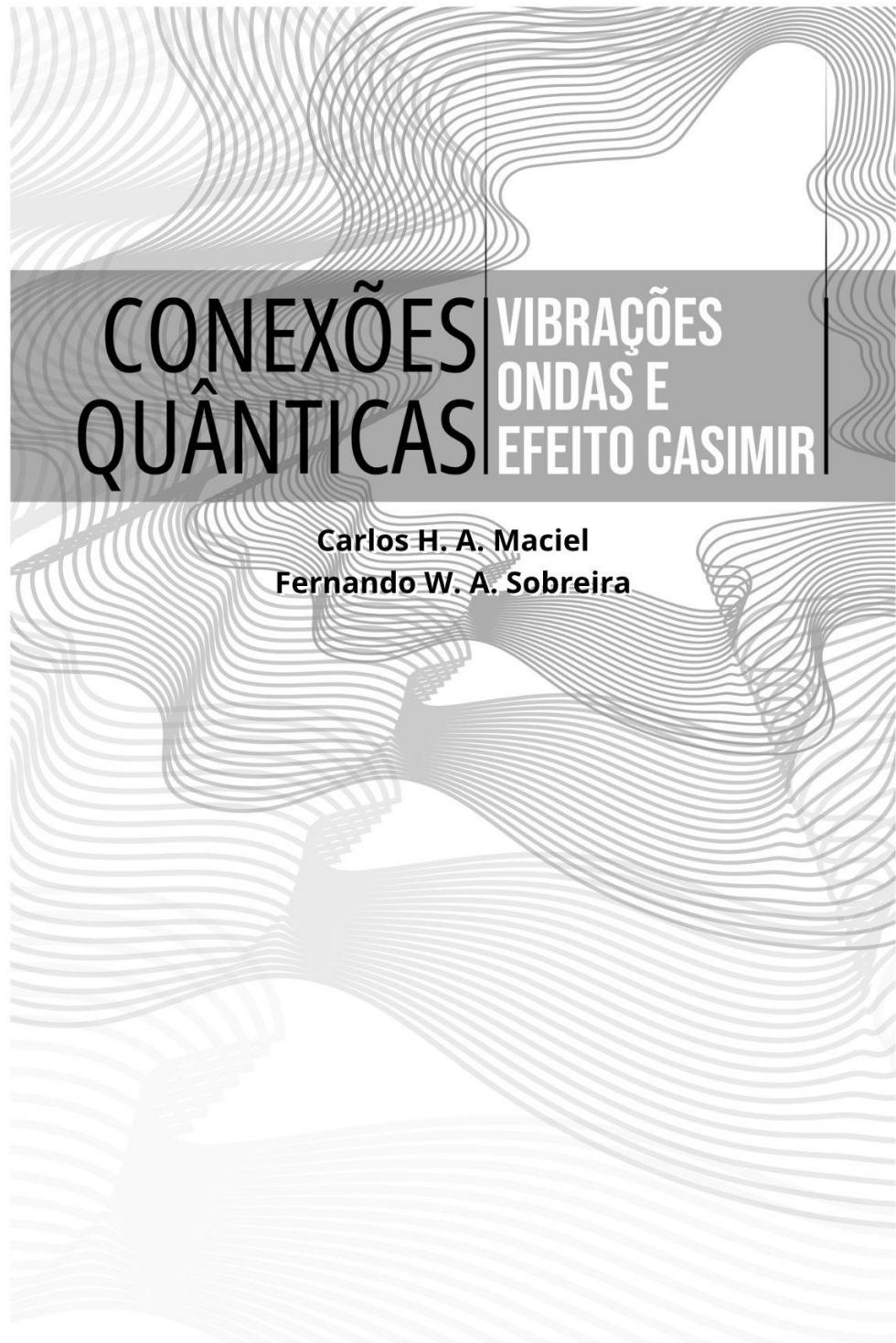
D) INCORRETA.

O estudante incorre ao afirmar que o vácuo só pode ser encontrado no espaço sideral e não pode ser criado em laboratório. Isso é falso, pois em laboratórios é possível criar condições de vácuo, ou seja, retirar ar de um recipiente para criar uma região com baixa pressão. O vácuo pode ser simulado artificialmente em ambientes controlados, como em tubos de vácuo.

E) INCORRETA.

O estudante comete um erro ao afirmar que o vácuo é "cheio de partículas e gases em grandes quantidades". No vácuo, a quantidade de partículas e gases é muito pequena, quase inexistente, e não em grandes quantidades. Portanto, essa descrição está completamente errada em relação ao conceito físico de vácuo, que implica em uma região de baixa densidade de matéria.

**APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL - CONEXÕES QUÂNTICAS:
VIBRAÇÕES, ONDAS E EFEITO CASIMIR**





**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 43**

AUTORES:
**CARLOS HENRIQUE DE ABREU MACIEL
FERNANDO WELLYSSON DE ALENCAR SOBREIRA**

**FORTALEZA
2025**

APRESENTAÇÃO

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: FLUTUAÇÕES DO VÁCUO QUÂNTICO NO ENSINO MÉDIO: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA COM ANÁLOGO HIDRODINÂMICO DO EFEITO CASIMIR, desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 42 – UFC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Este Produto Educacional, apresenta um modelo didático análogo do efeito Casimir (ondas de água) — MDA-EC, acompanhado de guia de fabricação, manual do professor com sequência didática e caderno do aluno. Destina-se prioritariamente a professores de Física da Educação Básica (Ensino Médio e EJA), bem como a formadores em cursos de licenciatura e ações de formação continuada. Sua intenção é proporcionar uma porta de entrada segura e pedagogicamente estruturada para tópicos introdutórios de Mecânica Quântica, articulando-os às competências da BNCC por meio de analogias clássicas de fácil replicação e atividades experimentais com aparelhos manipuláveis.

A motivação central decorre do desafio de inserir conteúdos de Física Moderna no contexto escolar de maneira conceitualmente rigorosa, didaticamente acessível e operacionalmente compatível com a infraestrutura usual dos laboratórios escolares. O MDA-EC foi concebido para favorecer investigação, argumentação e comunicação científica, possibilitando a observação de padrões ondulatórios e a discussão orientada sobre pressão de radiação e aproximação de placas no análogo hidrodinâmico.

Quanto às expectativas de uso, o material foi estruturado para ter vida própria, ou seja, pode ser empregado sem consulta necessária à dissertação que lhe deu origem. Oferece roteiros, critérios de segurança, orientações de condução, instrumentos de avaliação e elementos de adaptação. Em termos de alternativas e abrangência, a proposta admite: (i) aplicação integral da sequência; (ii) uso modular de sessões (oscilações e ondas; analogia do princípio da incerteza; análogo do efeito Casimir); (iii) incorporação em projetos interdisciplinares, clubes de Ciências e eventos de divulgação; e (iv) adaptação a tempos escolares distintos e a diferentes perfis de turma.

Em síntese, trata-se de um convite de professor para professor: um conjunto coerente de materiais e procedimentos que viabiliza, com clareza e reprodutibilidade, a abordagem inicial de conceitos de Física Moderna em sala de aula, preservando a autonomia docente e o foco na aprendizagem significativa dos estudantes.

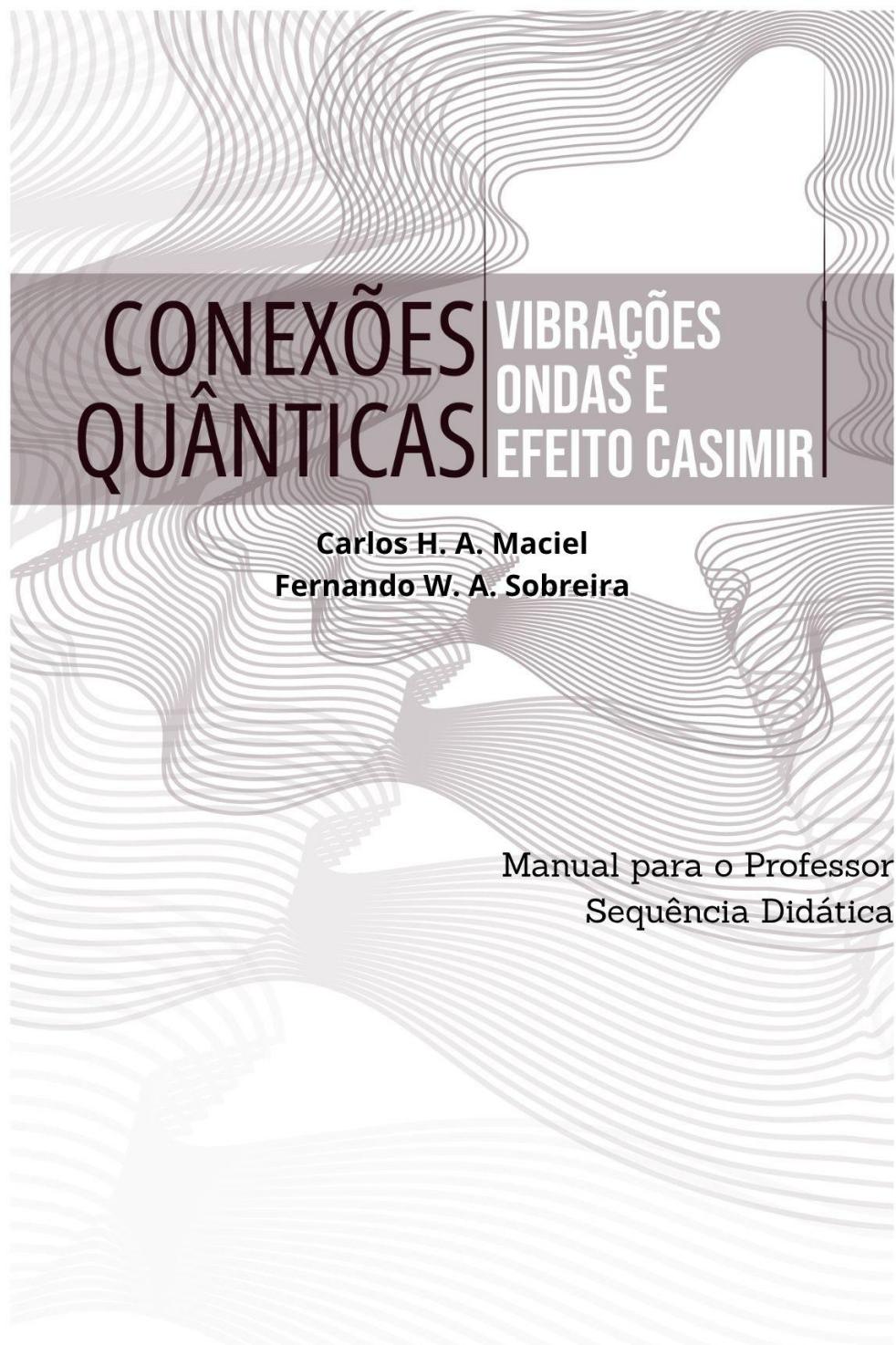
O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

SUMÁRIO

MANUAL PARA O PROFESSOR: SEQUÊNCIA DIDÁTICA	7
SESSÃO INTRODUTÓRIA DE SENSIBILIZAÇÃO	
Lei de Moore: a miniaturização dos transistores.....	16
SESSÃO DE EXPERIMENTAÇÃO 1	
Vibrações e Osciladores: conceitos fundamentais e propagação de ondas.....	20
SESSÃO DE EXPERIMENTAÇÃO 2	
O Princípio da Incerteza de Heisenberg: Analogias com um plano Inclinado.....	27
SESSÃO DE EXPERIMENTAÇÃO 3	
Análogo do Efeito Casimir: Ondas de Água e força de radiação.....	32
 MANUAL DE FABRICAÇÃO DO MODELOS DIDÁTICO	
ANÁLOGO DO EFEITO CASIMIR (MDA-EC)	35
 CADERNO PARA O ALUNO	
63	
 MECÂNICA QUÂNTICA E O NOVO CONCEITO DE VÁCUO	
A pedra fundamental da Mecânica Quântica.....	69
Einstein e o efeito fotoelétrico: a confirmação do quantum de energia.....	70
O fóton e a dualidade da natureza	70
Do quantum de energia ao vácuo dinâmico.....	71
 CAPÍTULO 1 - OSCILAÇÕES	
1.1 Oscilações Macroscópicas	72
Movimento Harmônico Simples (MHS).....	74
Aplicações e Relevância das Vibrações.....	79
Energia do Movimento Harmônico Simples.....	80
 1.2 Vibrações Microscópicas	82
Oscilador Harmônico Simples Quântico (OHSQ).....	86
A Energia do Oscilador Harmônico Simples Quântico	86
Representação Gráfica da Energia do OHS Quântico	88

CAPÍTULO 2 - ONDAS E CAMPOS	92
2.1 Ondas Eletromagnéticas	93
<i>Campo Eletromagnético Clássico</i>	94
<i>Campo Eletromagnético Quântico</i>	96
2.2 Ondas Mecânicas	96
<i>Ondas transversais</i>	98
<i>Ondas longitudinais</i>	99
<i>Ondas mistas</i>	100
2.3 Energia das ondas	101
CAPÍTULO 3 - FLUTUAÇÕES QUÂNTICAS DO VÁCUO	106
3.1 O Princípio da Incerteza de Heisenberg	107
<i>Incerteza na Natureza</i>	108
<i>A Relação entre Energia e Tempo</i>	110
3.2 Flutuações Quânticas no Vácuo	111
<i>Flutuações do Vácuo e Suas Consequências</i>	113
<i>O Vácuo não é inerte</i>	113
CAPÍTULO 4 - O EFEITO CASIMIR	118
4.1 Fundamentação Teórica do Efeito Casimir	120
<i>Revisitando o Vácuo Quântico e as Flutuações</i>	120
<i>Origem e Formulação do Efeito Casimir</i>	120
4.2 O Efeito Casimir na Eletrodinâmica Quântica	123
<i>Aspectos Teóricos</i>	123
<i>Implicações Físicas e Experimentais</i>	123
4.3 Análogos do Efeito Casimir	124
<i>O Conceito de Análogo Físico</i>	124
<i>Efeito Casimir e Ondas Mecânicas</i>	125
<i>Força de Radiação e o Princípio do Efeito Casimir</i>	126
<i>Comparação entre o Efeito Casimir Tradicional e seu Análogo em Ondas de Superfície</i>	126
<i>Implicações dos Análogos do Efeito Casimir</i>	127

4.4 O Análogo do Efeito Casimir em Ondas de Água: Observação e Hipóteses.....	128
<i>Procedimento Experimental</i>	128
<i>Discussão e Reflexão Inicial</i>	129
4.5 Reflexão e Conexões com a Física Moderna.....	129
<i>Discussão das Observações</i>	129
<i>Limitações e Desafios do Experimento</i>	130
<i>Aplicações do Efeito Casimir na Ciência e Tecnologia.....</i>	130
<i>Conclusão e Perspectivas Finais.....</i>	131



CONEXÕES QUÂNTICAS

VIBRAÇÕES ONDAS E EFEITO CASIMIR

Carlos H. A. Maciel
AUTOR, ILUSTRÇÃO E DIAGRAMAÇÃO

Fernando W. A. Sobreira
ORIENTADOR



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ



Carta ao(à) Professor(a)

Prezado(a) colega,

É com grande satisfação que lhe apresentamos o Manual “Conexões Quânticas: Vibração, Ondas e Efeito Casimir”, concebido para apoiar o ensino de Física Moderna e Contemporânea em sala de aula, de modo gradual, experimental e conceitual. O material propõe uma sequência didática em quatro momentos:

- **Sessão introdutória de sensibilização** – Nesta sessão, o(a) professor(a) tem a liberdade de selecionar o tema norteador que julgar mais adequado à realidade didático-pedagógica de sua turma, podendo optar, por exemplo, por tópicos como **Expansão Cósmica e Matéria Escura, Supercondutividade, Entrelaçamento Quântico, Nanotecnologia**, entre outros assuntos correlatos às Flutuações Quânticas no Vácuo. Como sugestão, este manual propõe a abordagem da **Lei de Moore**, a qual problematiza o processo de miniaturização dos transistores enquanto marco histórico-tecnológico, constituindo-se como ponto de partida para discussões posteriores acerca das limitações impostas pela física quântica à continuidade dessa tendência.
- **Sessão de experimentação 1 – Vibrações e osciladores:** investiga períodos, frequências e propagação de ondas mecânicas, conectando o cotidiano dos estudantes a fundamentos formais do Movimento Harmônico Simples.
- **Sessão de experimentação 2 – Analogias para o Princípio da Incerteza:** utiliza um plano inclinado para ilustrar analogamente as dificuldades de medir simultaneamente posição e tempo, estabelecendo um paralelo acessível com a incerteza quântica.
- **Sessão de experimentação 3 – Análogo do Efeito Casimir:** recorre a ondas de água entre placas para ilustrar, também por analogia, de maneira qualitativa, a força de radiação originada pela restrição de modos no vácuo quântico.

Conexão com a BNCC

Cada atividade foi mapeada às Competências Específicas da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias para o Ensino Médio e às habilidades, favorecendo a análise de situações-problema, a comunicação científica em múltiplas mídias e a reflexão crítica sobre tecnologias emergentes. Desse modo, o manual contribui para a materialização das aprendizagens essenciais previstas na BNCC, promovendo uma abordagem interdisciplinar, histórica e socialmente contextualizada da Física Moderna.

Orientações metodológicas

- **Aprendizagem significativa:** cada roteiro parte de conhecimentos prévios observáveis (pêndulo, diapasão, ondas na água) para introduzir conceitos abstratos, em consonância com a teoria de Ausubel.
- **Investigação orientada:** quadros de hipóteses e questões-guia requerem que os estudantes coletam, tabulem e interpretem dados, fortalecendo competências investigativas e o letramento científico.
- **Interdisciplinaridade:** a leitura de gráficos da Lei de Moore integra conteúdos de Matemática; a discussão sobre dispositivos eletrônicos aproxima-se da área de Tecnologia e Engenharia.
- **Avaliação formativa:** rubricas sugeridas ao fim de cada sessão contemplam observação processual, relatórios experimentais e debates, valorizando tanto o domínio conceitual quanto atitudes colaborativas.

Possíveis adaptações

Reconhecemos a diversidade de realidades escolares. Assim, você poderá:

- modular o tempo de cada sessão, distribuindo-a em aulas de 40 minutos ou em oficinas de maior duração;
- substituir equipamentos específicos por alternativas e acessíveis (por exemplo, cronômetros de celular, báqueres reutilizados);
- integrar recursos digitais (simuladores ou vídeos) para reforçar visualmente os fenômenos em ambientes com restrição de espaço experimental.

Considerações finais

Ao incluir conceitos de Mecânica Quântica da Educação Básica de forma investigativa, buscamos não apenas ampliar o repertório científico dos estudantes, mas também motivá-los a reconhecer a Física como instrumento de compreensão e transformação da realidade. Convidamos você a explorar este manual, adaptá-lo às necessidades de sua turma e compartilhar conosco sugestões de aprimoramento.

Desejo que a experiência seja tão instigante para seus alunos quanto enriquecedora para sua prática docente.

Vamos construir juntos esse caminho?
A Física agradece. E o universo, talvez, também.

Com estima científica,

Carlos Maciel
Criar, aprender, descobrir.

SUMÁRIO

SESSÃO INTRODUTÓRIA DE SENSIBILIZAÇÃO	
Lei de Moore: a miniaturização dos transistores.....	16
SESSÃO DE EXPERIMENTAÇÃO 1	
Vibrações e Osciladores: conceitos fundamentais e propagação de ondas.....	20
SESSÃO DE EXPERIMENTAÇÃO 2	
O Princípio da Incerteza de Heisenberg: Analogias com um plano Inclinado.....	27
SESSÃO DE EXPERIMENTAÇÃO 3	
Análogo do Efeito Casimir: Ondas de Água e força de radiação.....	32

A Sequência Didática

Para facilitar o planejamento e a integração do material nas aulas, apresentamos um *framework* com cinco eixos estruturantes:

- Objetivo geral: competência central a ser desenvolvida.
- Objetivos específicos: resultados de aprendizagem esperados.
- Conteúdo: conceitos físicos e aplicações tecnológicas.
- Sessão: correspondência com o roteiro do manual.

Este quadro serve como um mapa de navegação para uma implementação mais fluida e alinhada aos objetivos de aprendizagem. A sequência didática completa é dividida em módulos que integram teoria, investigação e reflexão tecnológica, respeitando as competências da BNCC.

É importante destacar que os tempos sugeridos para os encontros são referências. O professor deve:

- Flexibilizar a carga horária conforme a dinâmica da turma.
- Reconfigurar encontros para otimizar o tempo e aprofundar temas.
- Adaptar estratégias e recursos conforme o contexto escolar.
- Realizar avaliação formativa contínua para ajustar o roteiro.

Essa maleabilidade é essencial para manter o foco na aprendizagem significativa, permitindo que a sequência didática seja utilizada como guia pedagógica, adaptando-se às realidades e potencialidades dos alunos.

Título: Conexões Quânticas: ondas, vibrações e Efeito Casimir						
Público-alvo						
Caracterização dos alunos		Caracterização da escola	Caracterização do ambiente escolar			
Alunos do Ensino Médio da Educação Básica						
Problematização		De que forma os efeitos do vácuo quântico impactam o desenvolvimento tecnológico e as nossas vidas?				
Objetivo geral		Promover a compreensão dos efeitos do vácuo quântico e suas implicações tecnológicas, incentivando os estudantes a estabelecer conexões entre conceitos teóricos da Física Moderna e suas aplicações práticas no desenvolvimento de inovações que impactam a sociedade.				
Metodologia de ensino						
Encontro	Objetivo geral da aula	Objetivos específicos da aula	Conteúdos	Sessão		
1	Apresentar e discutir a Lei de Moore como um marco na evolução dos computadores e das tecnologias digitais, enfatizando a miniaturização dos transistores e sua representação gráfica. Essa abordagem servirá para contextualizar e motivar o tema geral da sequência didática (que, em um momento posterior, abordará o Efeito Casimir e as implicações das flutuações quânticas decorrentes dessa miniaturização).	<ul style="list-style-type: none"> Compreensão Conceitual: <ul style="list-style-type: none"> Identificar o enunciado e as implicações da Lei de Moore por meio de sua representação gráfica, relacionando o crescimento exponencial do número de transistores com o avanço tecnológico. Discutir como a miniaturização dos transistores impulsiona o desempenho dos processadores e reduz custos, contribuindo para o desenvolvimento de novas tecnologias digitais. Análise Crítica e Contextualização: <ul style="list-style-type: none"> Discussão sobre o avanço tecnológico, impulsionado pela Lei de Moore, e seu impacto no desenvolvimento de novas tecnologias digitais. Refletir sobre os desafios que emergem da redução das dimensões dos componentes eletrônicos, preparando o terreno para, futuramente, a problematização dos efeitos das flutuações quânticas – seja, neste momento, citar diretamente o Efeito Casimir. Integração Interdisciplinar: <ul style="list-style-type: none"> Utilizar representações gráficas para interpretar dados e analisar o fenômeno, conectando conhecimentos de Ciências da Natureza e Matemática e estimulando o letramento digital dos alunos. 	Lei de Moore: a miniaturização dos transistores	Sessão Introdutória de Sensibilização		

13

Encontro	Objetivo geral da aula	Objetivos específicos da aula	Conteúdos	Sessão
2	Proporcionar aos estudantes uma compreensão abrangente do movimento harmônico simples (MHS) e sua energia, identificando suas características e exemplos no cotidiano para estabelecer uma base conceitual sobre vibrações macroscópicas e sua relação com sistemas físicos cotidianos.	<ul style="list-style-type: none"> Compreender o conceito de movimento harmônico simples (MHS) e sua aplicação em fenômenos cotidianos. Analisa a energia associada ao movimento harmônico simples, diferenciando entre energia cinética e potencial. Relacionar vibrações macroscópicas ao comportamento de sistemas físicos próximos à realidade dos alunos. 	Vibrações 1. Vibrações Macroscópicas 1. Movimento Harmônico Simples (MHS) 2. A Energia do Movimento Harmônico Simples	Sessão de Experimentação 1
	Introduzir os alunos ao conceito de vibrações quânticas em sistemas microscópicos, diferenciando-as das vibrações macroscópicas e explicando o Oscilador Harmônico Quântico Simples e sua energia discreta, de forma simplificada e conectada a situações do cotidiano.	<ul style="list-style-type: none"> Diferenciar vibrações macroscópicas de vibrações microscópicas, destacando as diferenças conceituais e práticas. Conceituar o oscilador harmônico quântico simples e a quantização de energia, adaptando a linguagem para facilitar o entendimento. Identificar exemplos cotidianos influenciados por fenômenos quânticos, como propriedades de moléculas em ressonância. 	Vibrações Quântica 1. Vibrações Microscópicas 1. Oscilador Harmônico Simples Quântico 2. A Energia do Oscilador Harmônico Simples Quântico	
	Apresentar aos alunos os diferentes tipos de ondas (longitudinais, transversais e mistas), sua energia associada e como ela é transmitida, além de introduzir o conceito de ondas eletromagnéticas e sua relação com campos quânticos, exemplificando com um experimento prático sobre ondas na água.	<ul style="list-style-type: none"> Identificar os tipos de ondas (longitudinais, transversais e mistas) e correlacioná-las a vibrações nos meios físicos. Determinar a energia associada às ondas e como ocorrem as transmissões de perturbações em diferentes meios materiais. Introduzir o conceito de ondas eletromagnéticas e sua relação com os campos elétricos e magnéticos na física moderna. Realizar um experimento prático sobre ondas na água para contextualizar os conceitos de ondas e energia. 	Ondas 1. Ondas Mecânicas 1. Ondas Longitudinais 2. Ondas Transversais 3. Ondas Mistas 2. Energia das Ondas 3. Ondas Eletromagnéticas 1. Campo Eletromagnético Quântico	

14

Encontro	Objetivo geral da aula	Objetivos específicos da aula	Conteúdos	Sessão
5	Apresentar aos alunos o conceito de vácuo quântico de maneira simplificada, explicando flutuações quânticas e como elas se diferenciam da ideia de vazio na física clássica, enquanto utilizam simuladores virtuais para ilustrar graficamente os conceitos.	<ul style="list-style-type: none"> Conceituar o vácuo quântico e as flutuações quânticas de maneira simplificada e ajustada ao nível dos alunos. Explicar como o vácuo quântico se diferencia do vácuo clássico em termos de propriedade e comportamento. Aplicar simuladores virtuais para demonstrar de maneira gráfica a ideia de flutuações quânticas no vácuo. 	Vácuo Quântico 1. Flutuações Quânticas no Vácuo 1. O Princípio da Incerteza de Heisenberg 2. O Princípio da Incerteza de Heisenberg e a Relação entre Energia e Tempo 2. Energia, Tempo e Flutuações Quânticas: O Papel do Princípio da Incerteza	Sessão de Experimentação 2
6	Explorar o Efeito Casimir como exemplo prático de flutuações do vácuo quântico, conectando-o aos conceitos de vibrações e ondas estudados anteriormente, e realizar experimentos análogos (ondas na água) para contextualizar suas implicações científicas e tecnológicas.	<ul style="list-style-type: none"> Explicar o Efeito Casimir de forma simplificada, mostrando a interação entre superfícies próximas devido às flutuações no vácuo quântico. Relacionar o Efeito Casimir aos conceitos previamente abordados de vibrações e ondas. Realizar um experimento prático com ondas na água para demonstrar, de forma análoga, a interação de superfícies próximas no Efeito Casimir. Discutir as aplicações práticas desse efeito em áreas contemporâneas da ciência e tecnologia. 	O Efeito Casimir	Sessão de Experimentação 3





Objetivo Geral:

Apresentar e discutir a Lei de Moore como um marco na evolução dos computadores e das tecnologias digitais, enfatizando a miniaturização dos transistores e o aumento da quantidade desses componentes nos chips ao longo do tempo e sua representação gráfica¹.

Objetivos Específicos:

1. Compreensão Conceitual:

Objetivo Específico 1.1: Identificar o enunciado e as implicações da Lei de Moore por meio de sua representação gráfica, estabelecendo a relação entre o crescimento exponencial do número de transistores e o avanço tecnológico.

Objetivo Específico 1.2: Discutir como a miniaturização dos transistores ao longo do tempo impulsiona o desempenho dos processadores e reduz custos, contribuindo para o desenvolvimento de novas tecnologias digitais.

2. Análise Crítica e Contextualização:

Objetivo Específico 2.1: Discutir como o avanço tecnológico, indicado pela Lei de Moore, contribuiu para o desenvolvimento de novas tecnologias digitais.

Objetivo Específico 2.2: Refletir sobre os desafios que emergem da redução das dimensões dos componentes eletrônicos².

¹Essa abordagem servirá para contextualizar e motivar o tema geral da sequência didática que, em um momento posterior, abordará o Efeito Casimir e as implicações das flutuações quânticas decorrentes dessa miniaturização.

²Esse objetivo específico estabelece as bases conceituais necessárias para, em etapas posteriores, problematizar os efeitos das flutuações quânticas, sem, neste momento, fazer referência direta ao Efeito Casimir.

3. Integração Interdisciplinar:

Objetivo Específico 3.1: Utilizar representações gráficas para interpretar dados e analisar o fenômeno, conectando conhecimentos de Ciências da Natureza e Matemática e estimulando o letramento digital dos alunos.

Referencial Normativo e Diretrizes Curriculares

O referencial que fundamenta este plano de aula baseia-se nas diretrizes da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, conforme estabelecido na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o Ensino Médio, a qual apresenta a seguinte competência específica:

Competência Específica 3: Analisar 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).

As habilidades a serem mobilizadas para complementar o desenvolvimento dessa competência são:

(EM13CNT301) Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica.

(EM13CNT302) Comunicar, para públicos variados, em diversos contextos, resultados de análises, pesquisas e/ou experimentos – interpretando gráficos, tabelas, símbolos, códigos, sistemas de classificação e equações, elaborando textos e utilizando diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC) –, de modo a promover debates em torno de temas científicos e/ou tecnológicos de relevância sociocultural.

(EM13CNT303) Interpretar textos de divulgação científica que tratem de temáticas das Ciências da Natureza, disponíveis em diferentes mídias, considerando a apresentação dos dados, a consistência dos argumentos e a coerência das conclusões, visando construir estratégias de seleção de fontes confiáveis de informações.

(EM13CNT308) Analisar o funcionamento de equipamentos elétricos e/ou eletrônicos, redes de informática e sistemas de automação para compreender as tecnologias contemporâneas e avaliar seus impactos.

Procedimentos Metodológicos e Estratégias de Ensino e Avaliação

Introdução

Tempo: 10 minutos

- Apresentar um breve panorama histórico da evolução dos computadores, ressaltando a importância da Lei de Moore e a miniaturização dos transistores.
- Exibir o gráfico da Lei de Moore que ilustra a duplicação do número de transistores ao longo do tempo, enfatizando a relação entre tempo e desempenho tecnológico.
- Esclarecer que, embora essa aula se concentre na Lei de Moore, em etapas futuras da sequência didática serão problematizadas as implicações das flutuações quânticas (como o Efeito Casimir), sem que isso seja abordado agora.

Exposição Dialogada

Tempo: 20 minutos

- Utilizar slides e vídeos para explicar a Lei de Moore, destacando seus principais pontos e o impacto da miniaturização dos transistores nos processadores e na evolução dos dispositivos digitais.
- Incentivar os alunos a observar e interpretar o gráfico, fazendo conexões com a habilidade (EM13CNT301) e discutindo como a análise gráfica pode contribuir para a compreensão do avanço tecnológico.
- Levantar questões que estimulem a reflexão: quais as vantagens da miniaturização? Quais desafios podem surgir com a redução das dimensões dos componentes eletrônicos?

Atividade

Tempo: 15 minutos

- Dividir a turma em pequenos grupos e distribuir cópias de um gráfico da Lei de Moore.
- Orientar os grupos a discutirem e responderem:
 - Quais são as variáveis representadas no gráfico?
 - Como se relacionam o tempo e o número de transistores?
 - Que tendências podem ser identificadas e quais possíveis desafios emergem desse fenômeno?
- Os grupos deverão justificar suas análises.

Síntese e Encerramento*Tempo: 5 minutos*

- Reunir as principais observações dos grupos e sintetizar os pontos-chave, destacando que a Lei de Moore propõe que o número de transistores em um chip dobraria aproximadamente a cada dois anos, com um aumento mínimo no custo, funcionando assim como um indicador do ritmo dos avanços tecnológicos. Ao mesmo tempo, a miniaturização dos transistores constitui um desafio para a ciência, na medida em que a redução das dimensões impõe limites que exigem novas soluções tecnológicas. Ressaltar que essa discussão estabelece as bases para uma futura problematização acerca das implicações científicas da Física Moderna, a serem aprofundadas em uma etapa subsequente da sequência didática.

SESSÃO DE EXPERIMENTAÇÃO 1

Vibrações e Osciladores: conceitos fundamentais e propagação de ondas

Objetivo Geral:

Apresentar, por meio de experimentos práticos, os conceitos fundamentais sobre vibrações e oscilações, destacando o período, a frequência e a propagação das ondas, com ênfase no desenvolvimento experimental de habilidades essenciais à análise qualitativa e quantitativa dos fenômenos ondulatórios clássicos.

Objetivos Específicos:

1. Compreensão Conceitual:

Objetivo Específico 1.1: Determinar, experimentalmente, o período e a frequência de um pêndulo simples, utilizando o conceito de MHS.

Objetivo Específico 1.2: Compreender o conceito de frequência sonora e associá-la ao experimento com o diapasão, identificando características qualitativas da onda sonora produzida.

2. Aplicação Prática e Análise Crítica:

Objetivo Específico 2.1: Relacionar o experimento prático do pêndulo com a compreensão teórica dos sistemas oscilatórios mecânicos, enfatizando o movimento periódico e a propagação das ondas mecânicas.

Objetivo Específico 2.2: Analisar qualitativamente como a vibração do diapasão, ao ser momentaneamente encostado em uma caixa de ressonância, influencia a propagação do som, analisando o aumento da intensidade sonora e sua relação com a frequência da vibração. Discutir as aplicações tecnológicas desse fenômeno, como a amplificação acústica em instrumentos musicais e o uso de vibrações mecânicas em equipamentos médicos, como o ultrassom.

3. Integração Interdisciplinar:

Objetivo Específico 3.1: Registrar dados experimentais em tabelas e gráficos, estimulando o desenvolvimento da interpretação gráfica e do raciocínio quantitativo, conectando conhecimentos das áreas de Ciências da Natureza e Matemática.

Referencial Normativo e Diretrizes Curriculares

O referencial que fundamenta este plano de aula baseia-se nas diretrizes da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, conforme estabelecido na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o Ensino Médio, a qual apresenta a seguinte competência específica de Ciências da Natureza e suas Tecnologias para o Ensino Médio:

Competência Específica 3: Analisar 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. 539).

Quanto às habilidades, podemos elencar:

(EM13CNT310) Investigar e analisar os efeitos de programas de infraestrutura e demais serviços básicos (saneamento, energia elétrica, transporte, telecomunicações, cobertura vacinal, atendimento primário à saúde e produção de alimentos, entre outros) e identificar necessidades locais e/ou regionais em relação a esses serviços, a fim de promover ações que contribuam para a melhoria na qualidade de vida e nas condições de saúde da população.

Nesta aula, os alunos realizarão dois experimentos complementares que introduzem conceitos fundamentais de oscilação e propagação de ondas. O primeiro experimento, com o pêndulo simples, permite compreender o período e a frequência de oscilações mecânicas em sistemas clássicos. O segundo, utilizando um diapasão e uma caixa de ressonância, explora a transmissão de vibrações mecânicas e a amplificação sonora. Esses conceitos serão fundamentais para estabelecer uma transição didática para o estudo posterior das vibrações quânticas.

Procedimentos Metodológicos e Estratégias de Ensino e Avaliação

Introdução Dialogada

Tempo: 10 minutos

- Introduzir os conceitos gerais de vibração e Movimento Harmônico Simples (MHS).

- Explicar o objetivo dos experimentos e destacar a importância da prática experimental para o aprendizado científico.
- Explicar brevemente a conexão entre oscilações clássicas (pêndulo, diapasão) e os fenômenos mais complexos, que serão tratados futuramente (flutuações quânticas), sem abordá-los diretamente nesta aula.

Roteiro: Pêndulo Simples

Objetivos

- Determinar experimentalmente o período médio (T) e a frequência ($f = 1/T$) do movimento oscilatório de um pêndulo simples;
- Registrar e interpretar os dados experimentais utilizando tabelas e gráficos.

Contextualização Conceitual Prévia

- O que caracteriza um pêndulo simples?
- O que definimos como período (T) e frequência (f) em um movimento oscilatório?
- Quais parâmetros influenciam diretamente o período das oscilações em um pêndulo simples?

Materiais necessários

- Sistema de pêndulo simples (massa suspensa por fio)
- Cronômetro
- Régua (30 cm)

Procedimento experimental

1. Ajuste cuidadosamente o comprimento do fio do pêndulo em 15cm, medindo-o com o auxílio da régua.
2. Desloque o pêndulo da posição de equilíbrio até formar um ângulo inicial de aproximadamente 10° em relação à vertical e, em seguida, solte-o cuidadosamente, sem fornecer impulso.
3. Com o auxílio de um cronômetro, registre o tempo total necessário para que o pêndulo execute exatamente cinco oscilações completas. Considere uma oscilação completa como o percurso total do pêndulo desde o ponto inicial até retornar à mesma posição inicial.
4. Realize quatro medições consecutivas desse tempo total (para as cinco oscilações), anotando os valores obtidos adequadamente na tabela fornecida abaixo.
5. Repita todo o procedimento descrito acima utilizando quatro comprimentos distintos do fio (15cm, 20cm, 25cm e 30cm). Organize suas anotações em ordem crescente (do menor para o maior comprimento).

Cálculos Necessários

O período médio (T) será calculado através da seguinte relação matemática:

$$T = \frac{\Delta t}{n} \quad 1.1$$

No qual T representa o período de oscilação do pêndulo, Δt corresponde ao tempo total gasto para a realização das cinco oscilações completas e n indica o número de oscilações realizadas, que neste caso, conforme instruído, é igual a cinco ($n=5$).

Após calcular o período (T), a frequência (f) é determinada pela seguinte relação:

$$f = \frac{1}{T} \quad 1.2$$

No qual f corresponde à frequência do movimento oscilatório do pêndulo, e T refere-se ao período previamente determinado por meio da equação (1.1).

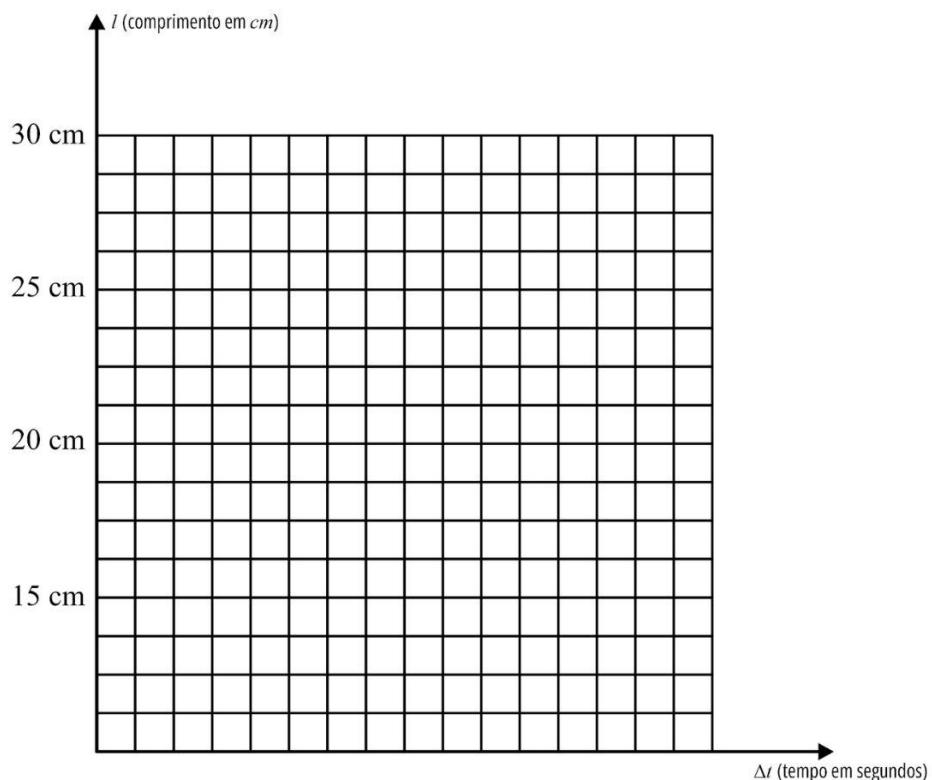
Complete a Tabela 1.1 com os valores obtidos experimentalmente.

Tabela 1.1 - Registro dos dados experimentais

Comprimento do (l) em cm	Tempo 1 (s)	Tempo 2 (s)	Tempo 3 (s)	Tempo 4 (s)	Média do tempo (s)	Período (T) (s)	Frequência (f) (Hz)

Questões para Análise e Discussão

1. Construa, a partir dos dados da Tabela 1.1, um gráfico relacionando o período (T) e o comprimento do pêndulo (l).



2. Com base na análise experimental realizada, descreva claramente qual é a relação observada entre o período e o comprimento do pêndulo.
3. Considerando os valores obtidos, discuta qualitativamente como a frequência do movimento oscilatório do pêndulo está relacionada ao período encontrado.
4. Que conclusão você pode tirar a respeito da influência do comprimento do fio sobre o período das oscilações?

Roteiro: Diapasão e Caixa de Ressonância

Objetivos

- Observar experimentalmente o fenômeno das vibrações mecânicas e analisar qualitativamente o conceito de frequência.
- Analisar como a frequência natural do diapasão influencia a intensidade das vibrações produzidas em uma caixa de ressonância.

Preparação

- O que são vibrações mecânicas?
- O que é frequência de vibração e como ela pode ser identificada em diferentes sistemas oscilatórios?
- O que ocorre quando um objeto em vibração é acoplado a outro corpo (como uma caixa de ressonância)?

Materiais Necessários

- Dois diapasones idênticos com caixas de ressonância;
- Um martelo próprio para diapasão (em madeira ou embrorrachado);
- Cronômetro (opcional, para análise qualitativa do tempo de duração das vibrações).

Procedimento Experimental

1. Com o auxílio do martelo próprio para o diapasão, golpeie-o suavemente, segurando-o firmemente pelo cabo.
2. Observe e ouça atentamente as vibrações produzidas pelo diapasão segurado livremente no ar. Registre qualitativamente o volume e intensidade sonora percebidos.
3. Agora, cuidadosamente, aproxime e encoste o cabo do diapasão na caixa de ressonância. Observe e registre detalhadamente o que ocorre com o som emitido (volume, duração e intensidade das vibrações).
4. Repita o procedimento três vezes, anotando cada observação para garantir consistência nos resultados.

Registro Qualitativo dos Dados (Tabela)

Situação experimental	Intensidade sonora observada (qualitativa)	Observações adicionais
Diapasão vibrando no ar		
Diapasão com caixa ressonante		

Análise Crítica e Interpretação dos Resultados

Com base nas observações realizadas e anotadas, responda:

1. Como você descreve qualitativamente a diferença das vibrações produzidas pelo diapasão isolado (no ar) e pelo diapasão acoplado à caixa de ressonância?
2. Qual é a importância da caixa de ressonância no aumento da intensidade sonora percebida?
3. Com base nas observações realizadas, qual relação pode ser estabelecida entre a frequência natural do diapasão e a intensidade das vibrações produzidas na caixa de ressonância?
4. Em que situações práticas cotidianas ou tecnológicas podemos encontrar um fenômeno semelhante ao observado neste experimento?

SESSÃO DE EXPERIMENTAÇÃO 2

O Princípio da Incerteza de Heisenberg: Analogias com um Plano Inclinado

Objetivo Geral:

Investigar, por meio de uma atividade experimental com uma bola rolando em um plano inclinado, os desafios inerentes à medição simultânea de grandezas (posição e tempo) e estabelecer uma analogia com o Princípio da Incerteza de Heisenberg, enfatizando que a incerteza na Mecânica Quântica é uma propriedade fundamental dos sistemas físicos, não decorrente de limitações instrumentais ou humanas.

Objetivos Específicos:

1. Compreensão Conceitual:

Objetivo Específico 1.1: Investigar experimentalmente a relação entre a precisão na determinação da posição e do instante de passagem da bola em um plano inclinado.

Objetivo Específico 1.2: Discutir, como a dificuldade em obter medições precisas em sistemas macroscópicos pode servir de analogia para compreender a incerteza intrínseca presente em sistemas quânticos.

2. Aplicação Prática e Análise Crítica:

Objetivo Específico 2.1: Realizar medições da posição em um instante determinado e, inversamente, do instante em uma posição determinada, observando a dispersão dos valores medidos.

Objetivo Específico 2.2: Estabelecer a analogia com a relação de incerteza ($\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$) destacando que, enquanto a imprecisão observada no experimento clássico advém de limitações operacionais (instrumentos e reação humana), a incerteza na escala quântica é inerente à natureza dos sistemas.

3. Integração Interdisciplinar:

Objetivo Específico 3.1: Registrar os dados experimentais de forma sistemática, permitindo a construção de tabelas e gráficos que possibilitem a análise quantitativa e qualitativa dos resultados.

Objetivo Específico 3.2: Promover uma reflexão crítica acerca das implicações epistemológicas e metodológicas da medição em Física, conectando conceitos da Física Clássica com fundamentos da Mecânica Quântica.

Referencial Normativo e Diretrizes Curriculares

Este plano de aula fundamenta-se nas diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o Ensino Médio, na área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Destaca-se a Competência Específica 2:

Competência Específica 2: Construir e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, e fundamentar decisões éticas e responsáveis (BRASIL, 2018, p. 539).

Quanto à habilidade, temos:

(EM13CNT205) Utilizar noções de probabilidade e incerteza para interpretar previsões sobre atividades experimentais, fenômenos naturais e processos tecnológicos, reconhecendo os limites explicativos das ciências.

Ressalta-se que, nesta aula, essa habilidade é abordada parcialmente, podendo ser aprofundada e complementada ao longo da sequência didática por outras estratégias pedagógicas. A abordagem destas habilidades será realizada considerando-se as especificidades socioculturais e os conhecimentos prévios dos estudantes, garantindo, assim, uma aprendizagem significativa, conceito amplamente discutido por David Ausubel (2003), que destaca a importância de relacionar os novos conteúdos aos conhecimentos prévios já internalizados pelos alunos.

Procedimentos Metodológicos e Estratégias de Ensino e Avaliação

Introdução Dialogada

Tempo: 10 minutos

- Inicie a aula relembrando os conceitos básicos de medição em Física e os desafios de se obter dados precisos, enfatizando a importância do rigor metodológico.

- Apresente o Princípio da Incerteza de Heisenberg, ressaltando que, na Mecânica Quântica, a incerteza não resulta de erros dos instrumentos ou da ação humana, mas é uma propriedade inerente à natureza.
- Explique que o experimento com a bola e o plano inclinado será utilizado para ilustrar, de forma análoga, as dificuldades na medição simultânea de duas grandezas e como essa dificuldade remete à limitação encontrada na medição do momento e da posição em sistemas quânticos.

Roteiro: O Princípio da Incerteza de Heisenberg: Analogias com um Plano Inclinado

Tempo: 15 minutos

Objetivos

- Determinar, de forma prática, a relação entre a medição de posição e de tempo em um movimento retilíneo sobre um plano inclinado.
- Evidenciar, por meio da análise da dispersão dos dados experimentais, a dificuldade de se obter medições precisas de duas grandezas conjugadas, fazendo uma analogia com a relação de incerteza ($\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$) presente na Mecânica Quântica.

Contextualização Conceitual Prévia

- Medição em Física: Discutir os desafios práticos na obtenção de dados precisos e como fatores como o tempo de reação e a precisão dos instrumentos podem influenciar os resultados.
- Princípio da Incerteza: Explicar que, enquanto na Física Clássica os erros podem ser atribuídos a limitações experimentais, na escala quântica a incerteza é uma característica fundamental dos sistemas, refletindo a natureza probabilística dos eventos em nível microscópico.
- Analogias e Limitações: Ressaltar que, embora o experimento seja realizado em um sistema macroscópico, a analogia com o Princípio de Heisenberg serve para ilustrar conceitualmente a impossibilidade de se determinar simultaneamente com precisão absoluta duas grandezas conjugadas.

Materiais necessários

- Plano inclinado;
- Bola (de material uniforme);
- Trena (para medições de distância);
- Cronômetro (pode ser utilizado um aplicativo de celular).

Procedimento Experimental

1. Preparação do Experimento:

- Instale o plano inclinado de modo que fique estável e permita o movimento controlado da bola.
- Utilize a trena para marcar os pontos de referência ao longo do plano.

2. Medição da Posição em um Instante Determinado:

- Um aluno inicia a medição do tempo (por meio do cronômetro) no exato instante em que a bola é solta da extremidade superior do plano inclinado.
- Simultaneamente, outro aluno, ao comando do que manipula o cronômetro, registra a posição da bola utilizando a trena (preencher a Tabela 2.1).
- Realize 4 medições para obter um conjunto de dados que permita avaliar a dispersão dos valores.

3. Medição do Instante em uma Posição Determinada:

- Defina o primeiro ponto fixo no plano (por exemplo, a 30 cm da extremidade superior).
- Registre os instantes exatos em que a bola passa por esse ponto, utilizando o cronômetro (preencher a Tabela 2.2).
- Repita a medição 4 vezes para possibilitar a análise estatística dos tempos medidos.

4. Registro dos dados

Tabela 2.1 - Medição da Posição em um Instante Determinado

Instante Δt	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Média do Δt

Tabela 2.2 - Medição da Posição em um Instante Determinado

Posição	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Média do Δt

5. Questões para Análise e Discussão

1. Quais variações você observou nas medições de posição e de tempo realizadas durante o experimento?
2. A partir dos dados obtidos, compare os fatores que influenciam a incerteza nas medições do experimento com aqueles que, na Mecânica Quântica, determinam a incerteza ($\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$).
3. Explique por que, no contexto quântico, a incerteza não pode ser atribuída apenas à imprecisão dos instrumentos utilizados.
4. Qual a importância de compreender que a incerteza, quando devidamente interpretada, revela propriedades fundamentais dos sistemas físicos?
5. Em que situações práticas você identifica que a compreensão das limitações das medições pode influenciar a elaboração de novas metodologias experimentais ou o desenvolvimento de tecnologias?



Objetivo Geral

Investigar experimentalmente, por meio de um modelo análogo com ondas de superfície em líquido, a geração de uma força de atração entre duas placas parcialmente submersas, promovendo a compreensão qualitativa do Efeito Casimir e de seu princípio subjacente: a restrição de modos ondulatórios em domínios confinados.

Objetivos Específicos

Compreensão Conceitual

Objetivo Específico 1.1: Identificar as modificações no padrão de ondas entre duas placas paralelas parcialmente submersas em um líquido sob vibração.

Objetivo Específico 1.2: Compreender, por meio de analogia, como a limitação de modos ondulatórios em regiões confinadas pode originar forças de interação, à semelhança do Efeito Casimir na escala quântica.

Aplicação Prática e Análise Crítica

Objetivo Específico 2.1: Observar o movimento das placas em resposta à vibração da superfície líquida e levantar hipóteses sobre a origem da força de atração observada.

Objetivo Específico 2.2: Discutir criticamente as diferenças e semelhanças entre o efeito observado no experimento e o fenômeno quântico original, ressaltando os limites e alcances do uso de analogias no ensino da Física Moderna.

Integração Interdisciplinar

Objetivo Específico 3.1: Relacionar aspectos da Física de Ondas com conceitos da Teoria Quântica de Campos, explorando a interdisciplinaridade entre Mecânica Clássica e Física Moderna.

Objetivo Específico 3.2: Refletir sobre as implicações epistemológicas do uso de modelos análogos no ensino de fenômenos não observáveis diretamente, valorizando a abstração como ferramenta pedagógica.

Referencial Normativo e Diretrizes Curriculares

Esta proposta didática fundamenta-se na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o Ensino Médio, especificamente na área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Destacam-se:

- Competência Específica 1: Compreender as ciências da natureza como construções humanas, culturais e históricas, e utilizá-las para explicar o funcionamento do mundo físico.
- Competência Específica 2: Utilizar linguagens próprias das ciências para interpretar fenômenos naturais e resolver situações-problema, considerando os contextos em que ocorrem.
- Habilidade (EM13CNT201): Relacionar modelos científicos a situações do cotidiano e a contextos tecnológicos e ambientais, identificando limites e possibilidades de sua aplicação.

Procedimentos Metodológicos e Estratégias de Ensino e Avaliação

Introdução Dialogada

Tempo: 10 minutos

- Relembre os alunos sobre a existência de forças de interação não gravitacionais e não eletrostáticas em escalas microscópicas, introduzindo o conceito do Efeito Casimir como uma consequência das flutuações do vácuo quântico.
- Apresente o conceito de análogo físico, destacando a importância dos modelos que, embora clássicos, compartilham estrutura formal semelhante à dos fenômenos quânticos.
- Contextualize o experimento a ser realizado com ondas de água, explicando que ele ilustra, qualitativamente, o princípio da restrição de modos que gera o efeito Casimir.

Roteiro Experimental: Análogo ao Efeito Casimir com Ondas de Água

Tempo: 20 minutos

Objetivos

- Observar, de forma visual e qualitativa, a atração entre duas placas submersas sujeitas a ondas de superfície.
- Compreender como a distribuição desigual das ondas entre as placas leva à formação de uma força de radiação.



Observação importante: Para a correta preparação do experimento, recomenda-se ao professor consultar previamente o Manual de Montagem do Modelo Didático, onde estão detalhadas as orientações para a construção da superfície vibratória e a suspensão das placas. Esse manual contém instruções passo a passo e cuidados essenciais para garantir a segurança e a eficácia da atividade experimental.

Procedimento Experimental

1. Preparação

- Encha o bêquer com água até submergir 2/3 das placas.
- Ajuste as placas com os fios paralelamente no centro do bêquer, com pequena separação entre elas.

2. Ativação da Vibração

- Acione a superfície vibratória com o motor em rotação estável. Comece com uma rotação mais lenta e aumente gradualmente até que as placas façam um movimento de aproximação.

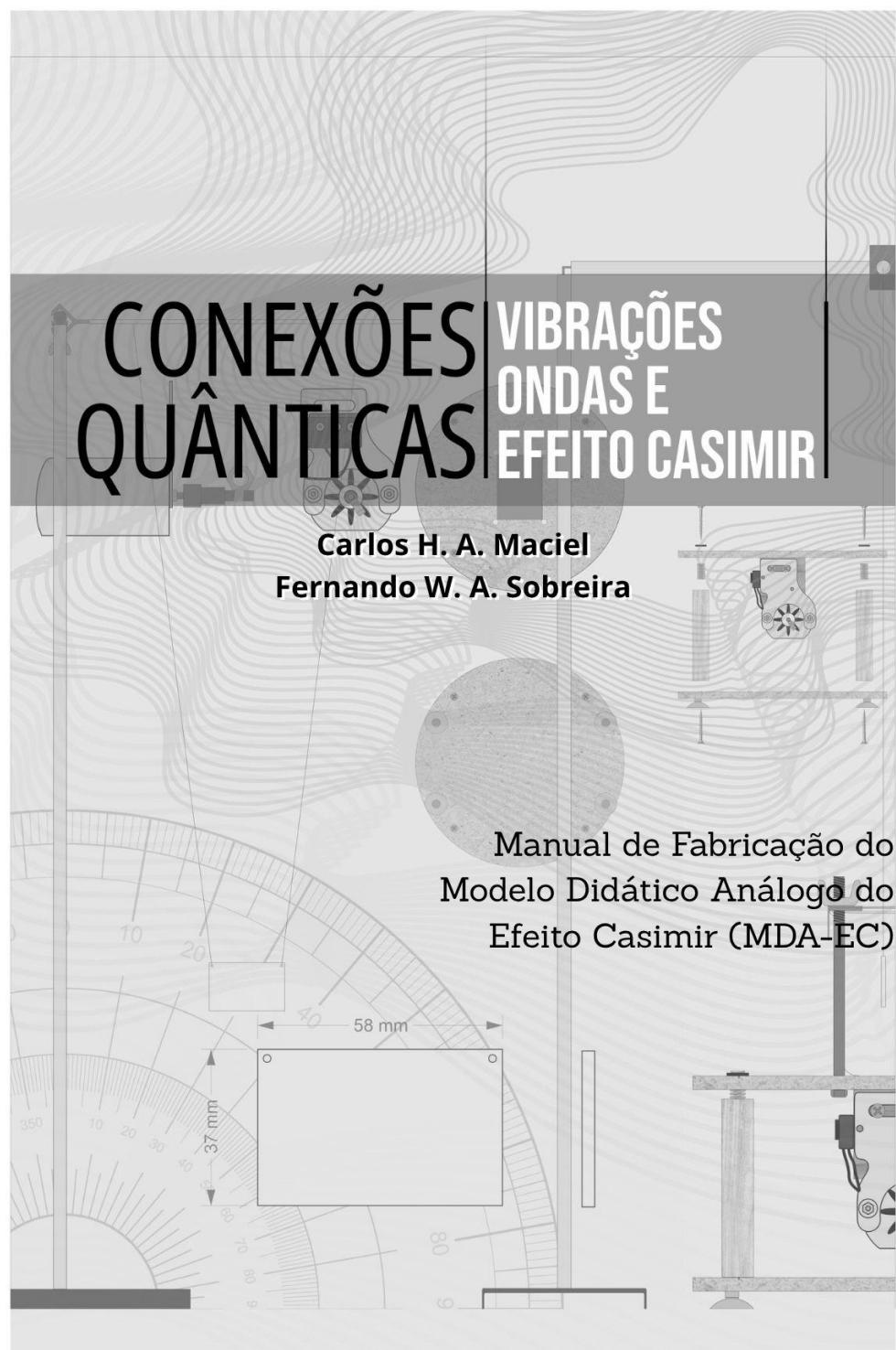
3. Observações Dirigidas

- Observe a formação das ondas e sua propagação pelo líquido.
- Compare a intensidade das ondas fora e entre as placas.
- Registre qualquer movimento de aproximação entre as placas.
- Repita a ativação para verificar reprodutibilidade.

Análise Crítica e Interpretação dos Resultados

Com base nas observações realizadas e anotadas, responda:

- 1.O que ocorre com a movimentação das placas quando o motor é ligado?
- 2.A oscilação das ondas na região entre as placas difere daquela observada na área externa?
- 3.Quais diferenças você observa na amplitude e na propagação das ondas na região entre as placas em comparação com as áreas externas?
- 4.De que forma a ativação da superfície vibratória altera o comportamento das ondas na água?
- 5.Como você descreveria a movimentação das placas antes e após as vibrações?



CONEXÕES QUÂNTICAS

VIBRAÇÕES ONDAS E EFEITO CASIMIR

Carlos H. A. Maciel
AUTOR, ILUSTRÇÃO E DIAGRAMAÇÃO

Fernando W. A. Sobreira
ORIENTADOR



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ



Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

Para você, professora ou professor. Para você, estudante curioso.

Olá!

*É com entusiasmo e sincero espírito de descoberta que apresento este Manual de Montagem do **Modelo Didático do Análogo de Ondas do Efeito Casimir**. Mais do que um simples guia técnico, este material foi cuidadosamente elaborado para ser um convite à exploração, à criatividade e ao encantamento com os mistérios do mundo físico, em especial, com aqueles que surgem do vácuo, onde aparentemente não há nada, mas onde a Física Quântica nos mostra que há muito a se revelar.*

Este manual propõe, passo a passo, a construção de um modelo experimental que simula, com o auxílio de um bequer com água e obstáculos que funcionam como "placas", o comportamento análogo ao Efeito Casimir, uma interação fascinante entre superfícies condutoras no vácuo, prevista em 1948 por Hendrik Casimir. Embora sua origem esteja no campo da eletrodinâmica quântica, aqui ele ganha forma em um ambiente acessível, sensível à observação e, acima de tudo, envolvente para o processo de ensino-aprendizagem.

Quero que este experimento seja mais do que uma montagem técnica: desejo que ele se transforme em uma experiência de aprendizagem colaborativa. Um momento em que os estudantes possam questionar, observar, inferir e, sobretudo, se maravilhar. Afinal, é no brilho dos olhos diante de uma ideia compreendida, ou de uma dúvida instigante, que reside a verdadeira ciência.

No decorrer desse manual, você encontrará tudo que precisa: desde a lista dos materiais até sugestões de como explorar pedagogicamente o experimento em sala. Contamos com a sua curiosidade, dedicação e imaginação para transformar este modelo em uma ponte entre o visível e o invisível, entre o clássico e o quântico.

*Vamos construir juntos esse caminho?
A Física agradece. E o universo, talvez, também.*

Com estima científica,

*Carlos Maciel
Ensinar, montar, descobrir.*

Objetivos pedagógicos

O presente modelo didático experimental visa proporcionar aos estudantes da Educação Básica uma compreensão do fenômeno conhecido como Efeito Casimir, utilizando uma abordagem analógica que se baseia na observação do comportamento de ondas mecânicas em um líquido agitado. A proposta pedagógica busca integrar conceitos fundamentais da Física Clássica, como ondas, energia de propagação, interferência e confinamento, com princípios da Física Moderna e Contemporânea, especialmente aqueles oriundos da Teoria Quântica de Campos (TQC), como flutuações do vácuo e o Princípio da Incerteza de Heisenberg.

Ao analisar a interação entre duas placas parcialmente submersas em um líquido e submetidas à excitação de ondas superficiais, os alunos são levados a perceber que a energia das ondas entre as placas é significativamente menor do que em sua vizinhança fora delas. Essa observação permite estabelecer uma analogia direta com o Efeito Casimir, no qual duas superfícies condutoras eletricamente neutras se atraem devido à diferença de pressão gerada pelas flutuações quânticas do vácuo. Por meio desse processo de modelagem, os alunos são incentivados a construir explicações científicas coerentes, mobilizando conhecimentos conceituais e procedimentais, além de habilidades investigativas e argumentativas.

O experimento também contribui para o desenvolvimento de diversas habilidades previstas na Base Nacional Comum Curricular (BNCC), em particular as habilidades (EM13CNT103), que orientam o estudante a elaborar modelos e analogias para explicar fenômenos da Física Moderna e Contemporânea, e (EM13CNT104), que aborda a compreensão das interações fundamentais da natureza. Destacam-se ainda as habilidades (EM13CNT201), que propõem a investigação de sistemas oscilatórios e ondulatórios por meio da construção e análise de modelos mecânicos, e (EM13CNT301), que recomenda a aplicação dos princípios da Física e da Matemática na interpretação de fenômenos complexos.

Além disso, o experimento permite que os alunos desenvolvam competências relacionadas à prática científica e à reflexão crítica, promovendo a construção de hipóteses, a experimentação, a observação sistemática, o registro de dados e a formulação de explicações fundamentadas, conforme a habilidade (EM13CNT102). As práticas pedagógicas sugeridas favorecem o trabalho colaborativo e o protagonismo estudantil, alinhando-se às competências gerais da Educação Básica, especialmente a competência número 2, que enfatiza a investigação e a resolução criativa de problemas, e a competência número 6, que valoriza a diversidade de saberes e experiências como base para a construção de projetos de vida autônomos e conscientes.

Em síntese, o modelo didático experimental do análogo de ondas do Efeito Casimir se configura como uma proposta eficaz para o ensino de Física na Educação básica, não apenas por possibilitar a visualização de um conceito na vanguarda da ciência, mas, sobretudo, por articular teoria e prática, desenvolver o pensamento científico e promover uma aprendizagem significativa e contextualizada, contribuindo para a formação integral dos estudantes.

Segurança e cuidados durante a construção do Modelo Didático Experimental

Durante a construção do **Modelo Didático Experimental do Análogo de Ondas do Efeito Casimir**, é imprescindível a observância rigorosa as normas segurança, a fim de mitigar riscos de acidentes pessoais e preservar a integridade física do operador e de terceiros.

Antes do início das atividades, deve-se preparar o ambiente de trabalho, garantindo que seja bem iluminado, ventilado e livre de obstáculos que possam causar tropeços ou dificultar os movimentos. As ferramentas elétricas devem ser verificadas quanto à integridade dos cabos, plugs e lâminas, bem como à presença de dispositivos de segurança, como protetores de lâmina na serra e gatilhos com trava.

Recomenda-se, ainda, a utilização obrigatória dos seguintes EPIs (Equipamentos de Proteção Individual):

- **Óculos de proteção:** para resguardar os olhos contra partículas projetadas durante cortes e perfurações.
- **Protetores auriculares:** especialmente durante a operação da serra elétrica, em função do elevado nível de ruído.
- **Luvas de proteção:** preferencialmente em material resistente a cortes e perfurações, para proteger as mãos contra lâminas e rebarbas, devendo-se, contudo, evitar o uso de luvas ao manusear a serra elétrica, a fim de não comprometer a firmeza e a precisão do movimento.
- **Máscara contra poeira:** para reduzir a inalação de partículas finas geradas pelo corte ou lixamento da madeira ou outros materiais.
- **Calçado fechado e antiderrapante:** para proteger os pés de quedas de objetos e aumentar a estabilidade no solo.

É fundamental que todas as operações com ferramentas elétricas sejam realizadas com plena atenção e foco, mantendo as mãos afastadas das áreas de corte ou perfuração, jamais forçando as lâminas ou brocas além de sua capacidade operacional, e desligando-as da tomada sempre que não estiverem em uso. A cola instantânea, por sua vez, deve ser manuseada com cuidado, evitando o contato direto com a pele e com os olhos, devendo-se mantê-la fora do alcance de crianças e afastada de fontes de calor.

Por fim, recomenda-se a leitura prévia dos manuais de cada ferramenta, a verificação da estabilidade das peças durante as operações e a disposição de um extintor de incêndio próximo, sobretudo em ambientes com risco de faíscas ou calor excessivo.

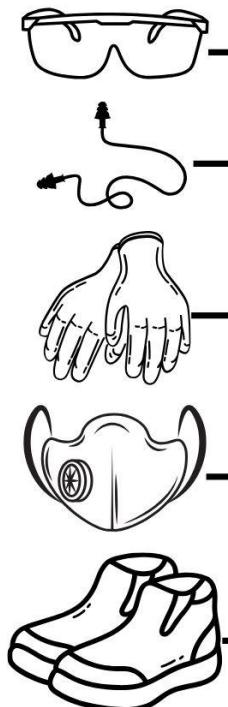
O cumprimento dessas orientações contribuirá para a realização segura e eficiente da montagem do modelo, prevenindo incidentes e promovendo um ambiente de trabalho saudável e responsável.

Segurança e cuidados durante a construção do Modelo Didático Experimental



Durante a construção do **Modelo Didático Experimental do Análogo de Ondas do Efeito Casimir**, é imprescindível a observância rigorosa as normas segurança, a fim de mitigar riscos de acidentes pessoais e preservar a integridade física do operador e de terceiros.

Antes do início das atividades, deve-se preparar o ambiente de trabalho, garantindo que seja bem iluminado, ventilado e livre de obstáculos que possam causar tropeços ou dificultar os movimentos. As ferramentas elétricas devem ser verificadas quanto à integridade dos cabos, plugs e lâminas, bem como à presença de dispositivos de segurança, como protetores de lâmina na serra e gatilhos com trava.



Recomenda-se, ainda, a utilização obrigatória dos seguintes EPIs (Equipamentos de Proteção Individual):

- **Óculos de proteção:** para resguardar os olhos contra partículas projetadas durante cortes e perfurações.

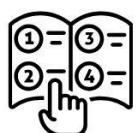
- **Protetores auriculares:** especialmente durante a operação da serra elétrica, em função do elevado nível de ruído.

- **Luvas de proteção:** preferencialmente em material resistente a cortes e perfurações, para proteger as mãos contra lâminas e rebarbas, devendo-se, contudo, evitar o uso de luvas ao manusear a serra elétrica, a fim de não comprometer a firmeza e a precisão do movimento.

- **Máscara contra poeira:** para reduzir a inalação de partículas finas geradas pelo corte ou lixamento da madeira ou outros materiais.

- **Calçado fechado e antiderrapante:** para proteger os pés de quedas de objetos e aumentar a estabilidade no solo.

É fundamental que todas as operações com ferramentas elétricas sejam realizadas com plena atenção e foco, mantendo as mãos afastadas das áreas de corte ou perfuração, jamais forçando as lâminas ou brocas além de sua capacidade operacional, e desligando-as da tomada sempre que não estiverem em uso. A cola instantânea, por sua vez, deve ser manuseada com cuidado, evitando o contato direto com a pele e com os olhos, devendo-se mantê-la fora do alcance de crianças e afastada de fontes de calor.



Por fim, recomenda-se a leitura prévia dos manuais de cada ferramenta, a verificação da estabilidade das peças durante as operações e a disposição de um extintor de incêndio próximo, sobretudo em ambientes com risco de faíscas ou calor excessivo.

O cumprimento dessas orientações contribuirá para a realização segura e eficiente da montagem do modelo, prevenindo incidentes e promovendo um ambiente de trabalho saudável e responsável.



Lista dos materiais necessários

ITEM	MATERIAL	QUANTIDADE	IMAGEM
1	MDF de 10mm (mínimo 300x300mm)	1	
2	Cabo de vassoura de madeira 1200x23mm	1	
3	Motor para máquina de costura doméstica completo (verificar a voltagem de acordo com a região)	1	
4	Parafuso sextavado iso 4014 M8x160 - rosca parcial 25mm aço carbono	4	
5	Mola de compressão Altura: 22,2mm Diâmetro externo: 16,1mm Diâmetro interno: 12,1mm Diâmetro do arame:0,018mm	4	
6	Ventosa 30mm PVC com furo, cabeça longa (15x10mm) com furo 5mm	4	
7	Porca Borboleta Tipo U – M8 – Aço Carbono Zincado – para fixação em chapa	4	
8	Vedante para Torneira e Registro 16mm	4	
9	Parafuso Chipboard cabeça chata Phillips 5x50mm bicromatizado	10	

ITEM	MATERIAL	QUANTIDADE	IMAGEM
10	Cantoneira de Alumínio 25 mm X 25 mm X 1 mm com 13,5 mm de comprimento	2	
11	Folha de EVA 3mm	1	
12	Lâmina PVC 3mm	1	
13	Porca sesxtavada M8x1,25 - Aço carbono i ISO 4032 - A/F 13mm - acabamento zinçado.	1	
14	Mandril para Serra Copo com Encaixe Hexagonal	1	
15	Ripa de Pinus 60x60x90mm	1	
16	Suporte universal de laboratório 700mm	2	

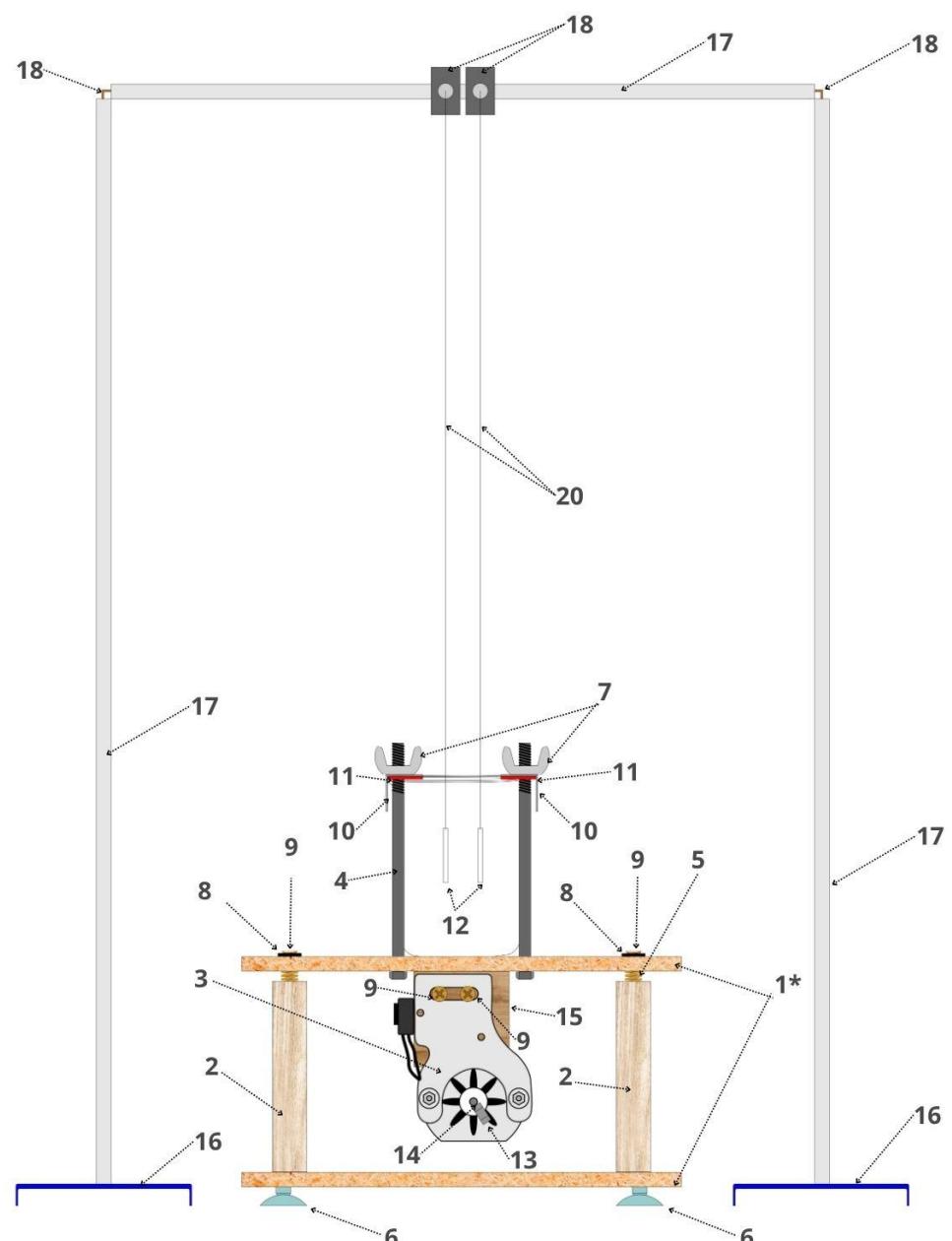
ITEM	MATERIAL	QUANTIDADE	IMAGEM
17	Tubo Redondo de Alumínio – Liga 6063, Cor Prata, 16 mm de Diâmetro Externo, 15 mm de Diâmetro Interno, 300 mm de Comprimento	1	
18	Cantoneira Em L 31x31x15mm	2	
19	Anel de ferro com mufa de alumínio 70mm	2	
20	Linha encerada para costura manual	1	
21	Broca 3 Pontas com 8mm para Madeira	1	
22	Broca 3 Pontas com 3mm para Madeira	1	
23	Broca 3 Pontas com 16mm para Madeira	1	
24	Bequer 500ml	1	

ITEM	MATERIAL	QUANTIDADE	IMAGEM
25	Arame de corte INOX 0,5mm	1 metro	
26	Cola adesiva instantânea	1	

Lista de ferramentas

ITEM	MATERIAL	QUANTIDADE	IMAGEM
F.1	Serra Tico Tico	1	
F.2	Furadeira elétrica	1	
F.3	Chave Phillips nº 2 (PH 2)	1	
F.4	Alicate ponta meia-cana com corte 200mm	1	
F.5	Tesoura	1	
F.5	Fita métrica	1	

Diagrama geral do Modelo Experimental do Análogo de Ondas do Efeito Casimir



*As numerações correspondem as da lista de materiais.

Procedimento de montagem

Antes de iniciar a montagem, é fundamental garantir que todos os materiais listados estejam disponíveis e organizados. A montagem deve ser realizada sobre uma superfície estável, nivelada e próxima a uma fonte de energia para o uso das ferramentas elétricas.

Atente rigorosamente para o uso adequado das ferramentas previamente especificadas:



- Uma serra tico-tico (F.1);
- Uma chave Phillips nº 2 (PH2) (F.2) ou, caso utilize uma parafusadeira elétrica ou furadeira com controle de torque, assegure-se de empregar um bit Phillips PH2;
- Alicate ponta meia-cana com corte (F.3)
- Uma tesoura (F.4);
- Uma fita métrica (F.5).

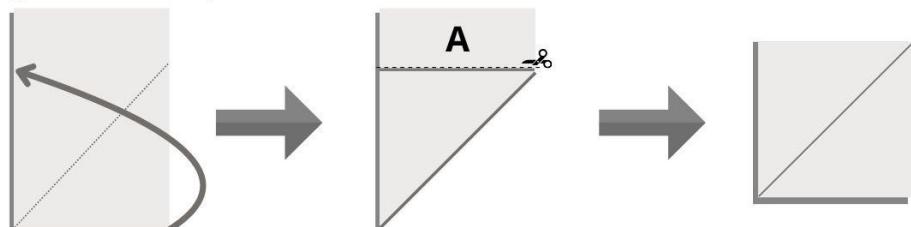
Passo a passo da construção

Confecção do gabarito de perfuração da plataforma de vibração

Para a confecção do gabarito, utilize uma folha de papel A4. Dobre-a na diagonal a partir de uma das extremidades e recorte a parte A, conforme ilustrado na Figura 1.

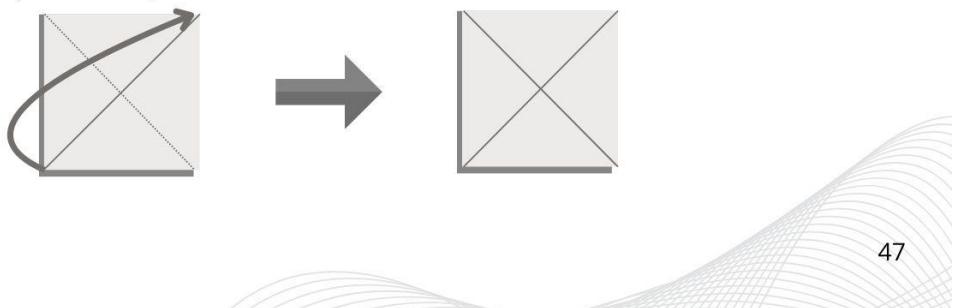


Figura 1 - Recorte do quadrado.



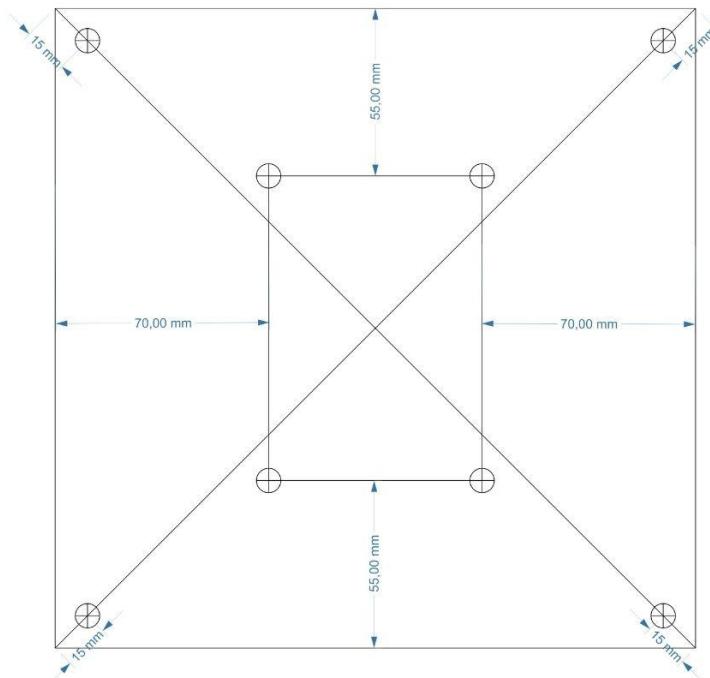
Agora, dobre na direção oposta à última dobra realizada, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Marcação de "x" no quadrado.



Proceda agora com as marcações de perfuração no papel (\oplus), conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Marcações das perfurações quadrado de papel.



Marcação e perfuração dos círculos de MDF

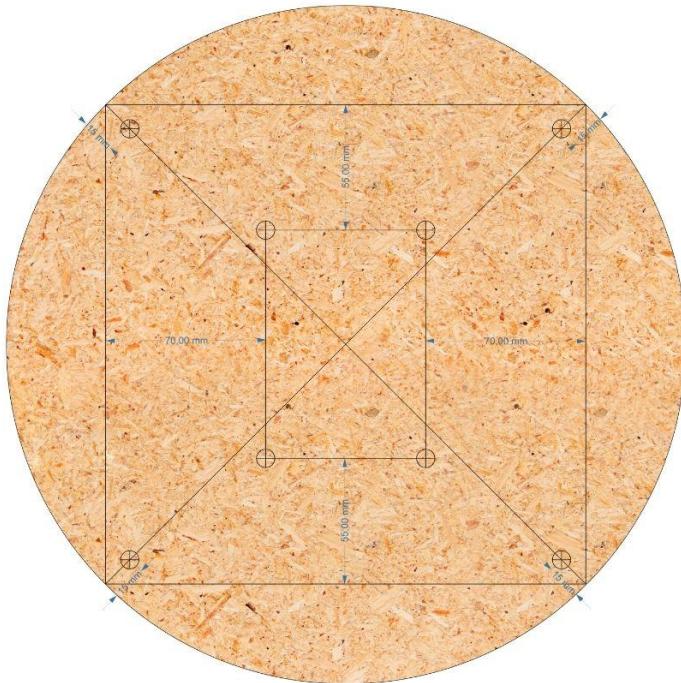
Quando as marcações estiverem concluídas, inicie o corte de dois círculos, cada um com um diâmetro de 30 cm, utilizando placas de MDF de 3 mm (item 1) e uma serra tico tico (F.1) (figura 4).

Figura 4 - Círculos de MDF.



Posicione o quadrado de papel, que contém as marcações dos furos, sobre um dos círculos.

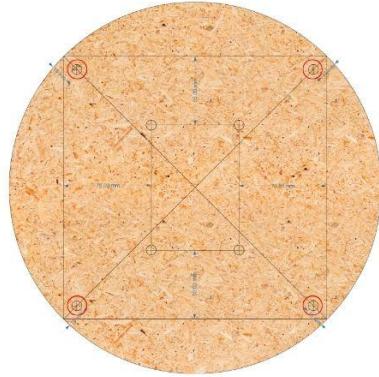
Figura 5 - Marcação do gabarito de perfuração sobre o círculo de MDF.



Com uma ferramenta de perfuração, a chave Phillips (F.2) pode ser utilizada, faça todas as marcas no círculo de MDF indicadas no gabarito, seguindo as marcações de furos indicadas no papel quadrado (\oplus) (Figura 5).

No outro círculo de MDF, marque apenas os furos externos, que estão destacados com um círculo vermelho na imagem a seguir:

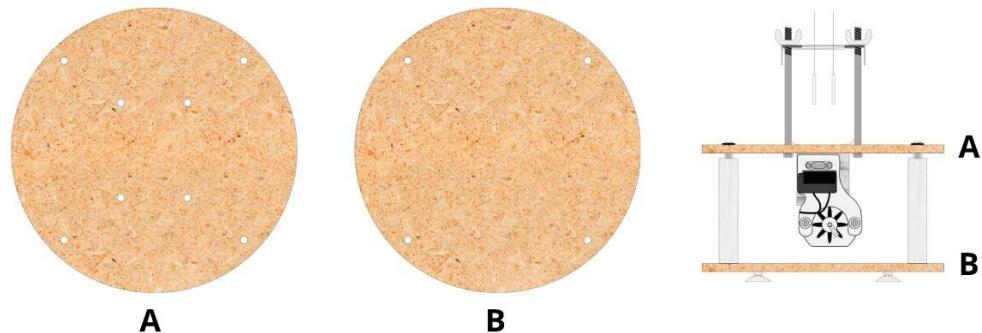
Figura 6 - Marcações da perfurações no segundo círculo de MDF.



Com a marcação para as perfurações, utilize uma furadeira (F.2) para realizar os furos nos círculos de MDF, empregando a broca de três pontas com diâmetro de 3 mm (item 22) destinada à madeira. Assim, você obterá os dois círculos perfurados (Figura 7).

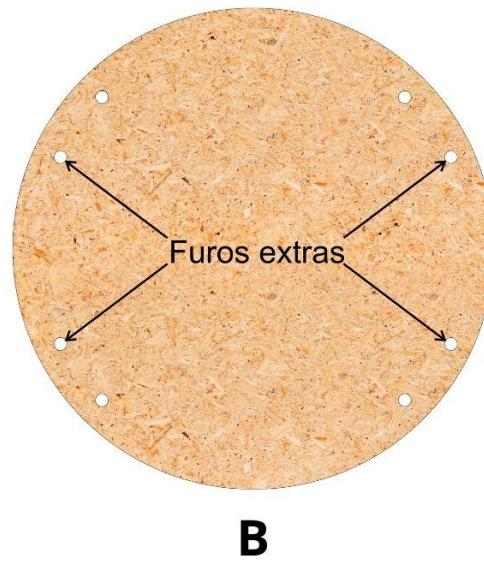
Para facilitar a orientação no processo de construção, designaremos os círculos de MDF da seguinte forma: Círculo **A** para o círculo superior e Círculo **B** para o círculo inferior da plataforma vibratória (Figura 7).

Figura 7 - Círculos perfurados e nomeados para as insrtuções da construaão.



No círculo de MDF **B**, faça mais 4 (quatro) furos extras, pois ele será a base e nesses furos extras serõ fixados as ventosas de 30mm (Figura 8).

Figura 8 - Furos extras no Círculo B



Colunas da plataforma vibradora

Corte o cabo da vassoura em quatro partes iguais, cada uma com 13 cm de comprimento.

Utilizando uma broca de 16 mm, faça um furo com profundidade de 5 mm (Figura 9).

Esses furos, que são mais adequadamente descritos como "cavas", terão a função de fixar as molas. Durante a montagem, as bases das molas ficarão devidamente encaixadas nessas cavas.

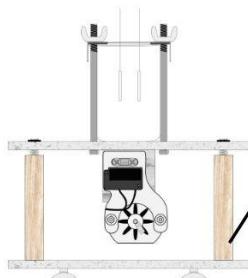


Figura 9 - Perfuração da "cavas" para as molas.



Com as "cavas" devidamente preparadas, procederemos à perfuração dos furos para a passagem dos parafusos, utilizando uma broca de 8 mm (Figura 10).

As "cavas" e os furos que guiarão os parafusos deverão ser realizadas em todas as quatro peças com comprimento de 13 cm (Figura 11). Assim, garantimos a uniformidade e a estabilidade necessárias para a montagem correta da plataforma vibradora.

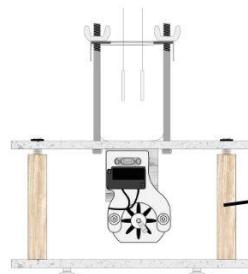


Figura 10 - Perfuração para os parafusos das colunas.



Certifique-se de que as medidas e perfurações sejam precisas, utilizando ferramentas adequadas e seguindo as instruções. Isso garante um encaixe correto de molas e parafusos, permitindo o funcionamento eficaz do sistema. Após a perfuração, prossiga para a montagem dos componentes da estrutura completa.

Figura 11 - Colunas perfuradas.



Suporte do bequer

Utilize as duas catoneiras de alumínio (item 10) e, cole sob cada uma delas uma tira de EVA (item 11) de 24x135mm (figura 12) usando cola instatânea (Figura 13).

Figura 12 - Tamanho das tiras de EVA para o revestimento das cantoneira de alumínio.

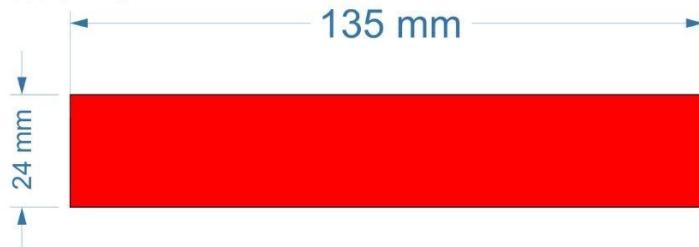
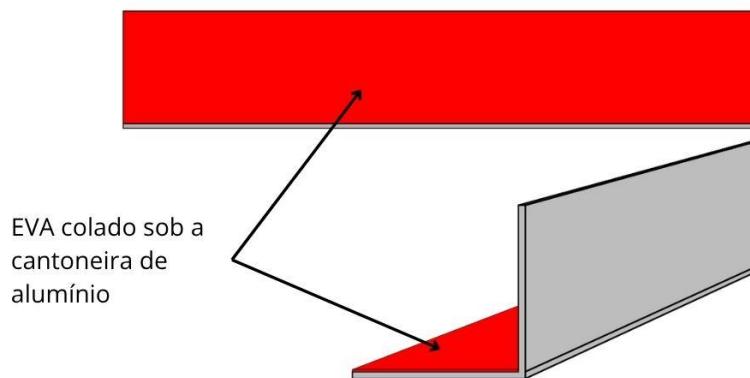
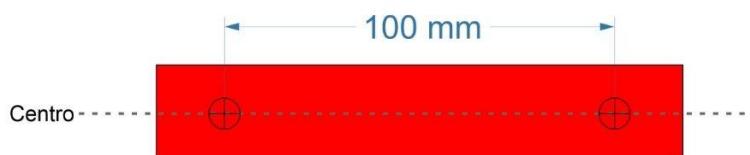


Figura 13 - Fixação das tiras de EVA nas cantoneiras de alumínio.



Com uma broca de 8 mm (item 21), faça dois furos em cada uma das cantoneiras, separados por uma distância de 100 mm (Figura 14).

Figura 14 - Diagrama dos furos na catoneira de alumínio.



Recorte um retângulo de EVA (item 11) de 93x65mm (Figura 15).

Figura 15 - Diagrama do recorte do retângulo de EVA.



Reserve-o, pois, após a fixação da ripa de pinus no círculo de MDF A, ele será posicionado sobre os parafusos.

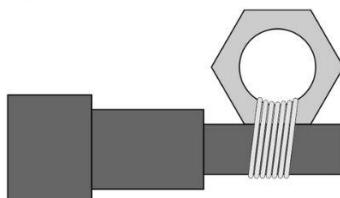


A fase de adesão das tiras de EVA nas cantoneiras de alumínio e no círculo A de MDF é fundamental e não deve ser negligenciada. O EVA atuará como uma proteção para o bequer, prevenindo danos durante sua fixação na plataforma. É essencial aplicar uma quantidade uniforme de cola adesiva instantânea (item 26) nas superfícies de contato, pressionando firmemente o EVA contra o alumínio e o MDF para assegurar uma fixação robusta. Permita que a secagem ocorra completamente antes de avançar para a próxima etapa do projeto. Esta precaução contribuirá para prolongar a vida útil do bequer e a eficiência do equipamento, garantindo estabilidade e segurança durante o uso.

Motor de vibração

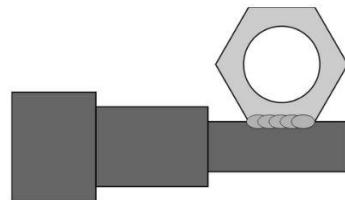
Fixe a porca (item 13) ao mandril para serra copo (item 14) utilizando o fio de corte de 5 mm (item 25), com o auxílio do alicate de ponta meia-cana. Passe o fio por dentro da porca e ao redor da extremidade do mandril.

Figura 16 - Amarração da porca sobre o mandril utilizando um arama de corte.



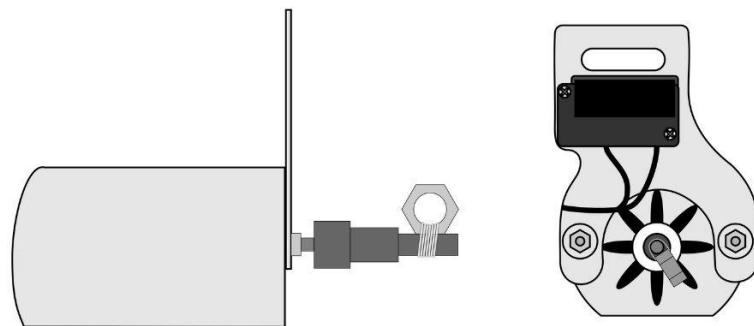
Certifique-se de que o fio esteja adequadamente tensionado, assegurando que a porca permaneça firmemente fixada ao mandril. Uma alternativa é soldar a porca diretamente no mandril, conforme ilustrado na figura a seguir (Figura 17):

Figura 17 - Alternativa de fixação da porca no mandril através do uso de solda.



Fixe o mandril com a porca no eixo do motor (item 3) (Figura 18):

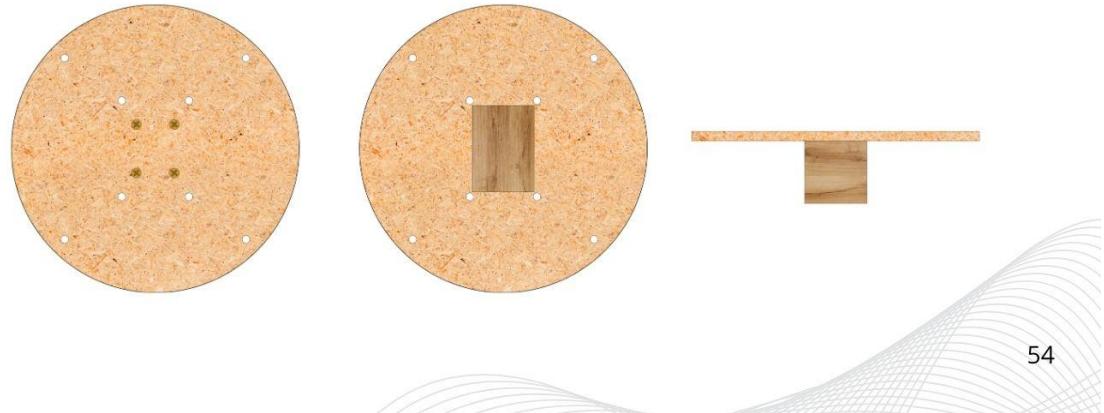
Figura 18 - Fixação do mandril no eixo do motor.



Montagem da plataforma vibratória

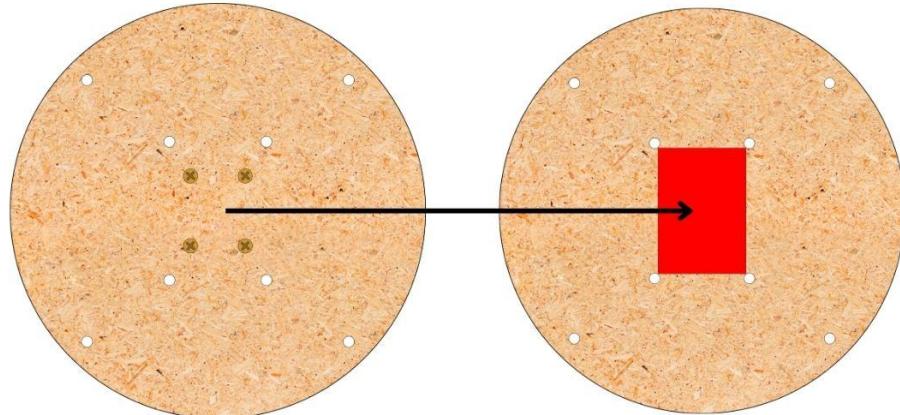
Fixe a ripa de pinus (item 15) no círculo de MDF A, no lado oposto ao qual o retângulo de EVA foi colado em etapas anteriores, utilizando quatro parafusos chipboard.

Figura 19 - Diagrama de fixação da ripa de pinus no círculo de MDF A.



Agora, aplique o retângulo de EVA sobre os parafusos (Figura 20). Como mencionado anteriormente, o EVA servirá para proteger o bequer contra danos durante a fixação e o uso do modelo didático.

Figura 20 - Aplicação do retângulo de EVA sobre a face superio circulo de MDF A.



Em seguida fixe o motor com 2(dois) parafusos chipboard na **face quadrada do paralelepípedo da ripa de pinus** (Figura 21).

Figura 21 - Fixação do motor na ripa de pinus



Remova a tomada da frente do motor e fixe na parte lateral da ripa de pinus para evitar que a porca quando, quando estiver em funcionamento, choque-se com o cabo de força.

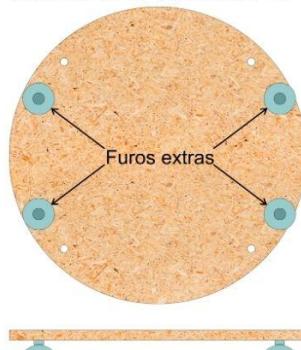
Utilize os memos parafusos e a chave Phillips para fixar a tomada na ripa. Basta a propria pressão da chave para perfurar com os proprios parafusos (Figura 22).

Figura 22 - Fixação lateral da tomada do motor.



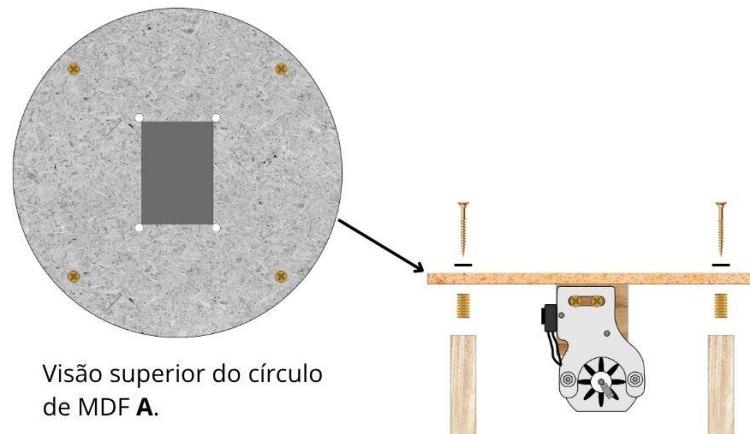
Fixe as quatro ventosas (item 4) nos furos adicionais do círculo de MDF B utilizando cola instantânea (Figura 23).

Figura 23 - Fixação das ventosas no círculo de MDF B.

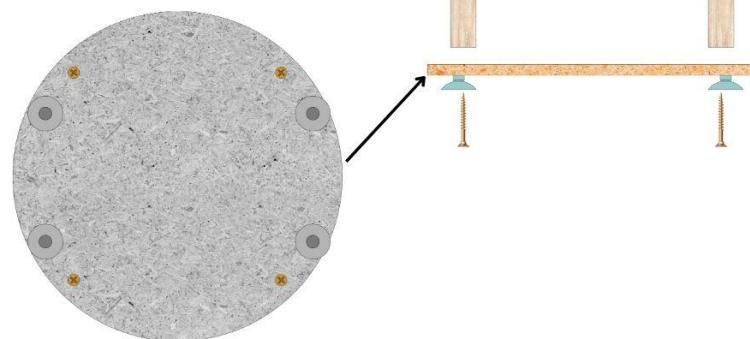


Em seguida, fixe as colunas do suporte vibratório conforme ilustrado na figura 24:

Figura 24: Fixação das colunas do suporte nos círculos de MDF A e B.



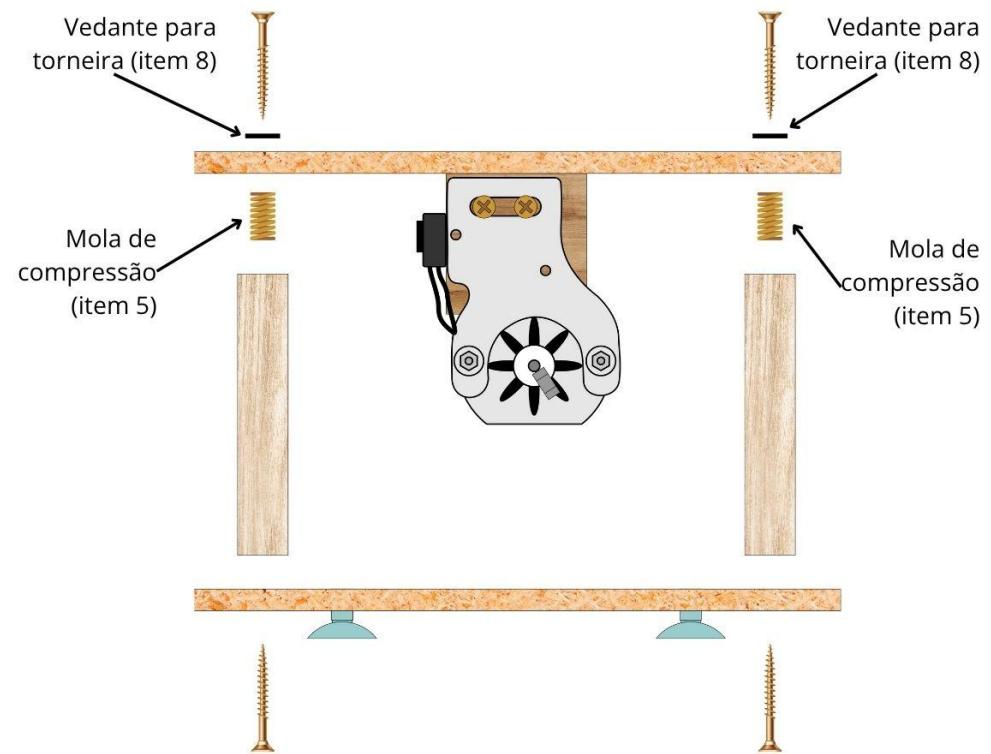
Visão superior do círculo de MDF A.



Visão superior do círculo de MDF B.

Ao montar a plataforma vibratória, é fundamental seguir a ordem dos itens conforme ilustrado na Figura 25. Ao apertar os parafusos, deve-se garantir que as espiras das molas mantenham um espaçamento de pelo menos 1,5 mm. Isso permitirá que as molas desempenhem adequadamente sua função de amortecimento da vibração, reduzindo o atrito dos parafusos sobre o círculo de MDF A, que já conta com os vedantes (item 8) com o mesmo objetivo.

Figura 25 - Digrama de montagem da plataforma vibratória.



Fixação do bequer sob a plataforma vibratória

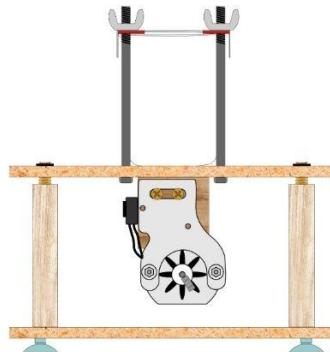
Ultrapasse os quatro (4) parafusos sextavados (item 4), de baixo para cima, através dos furos centrais do círculo de MDF A (Figura 26).

Figura 26 - Passagem dos parafusos sextavados no círculo de MDF A.



Em seguida, coloque o bequer no centro do círculo superior, sobre o retângulo de EVA. Posicione as duas cantoneiras de alumínio de modo que as partes que contêm as tiras de EVA fiquem apoiadas na borda do béquer. Após essa etapa, fixe o béquer à plataforma vibratória rosqueando as porcas borboleta (item 7) nos parafusos sextavados.

Figura 27 - Posicionamento e fixação do bequer sobre a plataforma vibratória.



Não exerça pressão excessiva ao apertar as porcas borboleta, pois isso pode causar danos ou até mesmo a quebra do béquer. Aperte apenas o necessário para assegurar que o béquer permaneça firmemente fixo à plataforma.

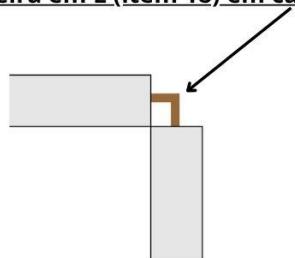
Construção do suporte das placas

Corte o tubo de alumínio (item 17) em três seções conforme as especificações a seguir:

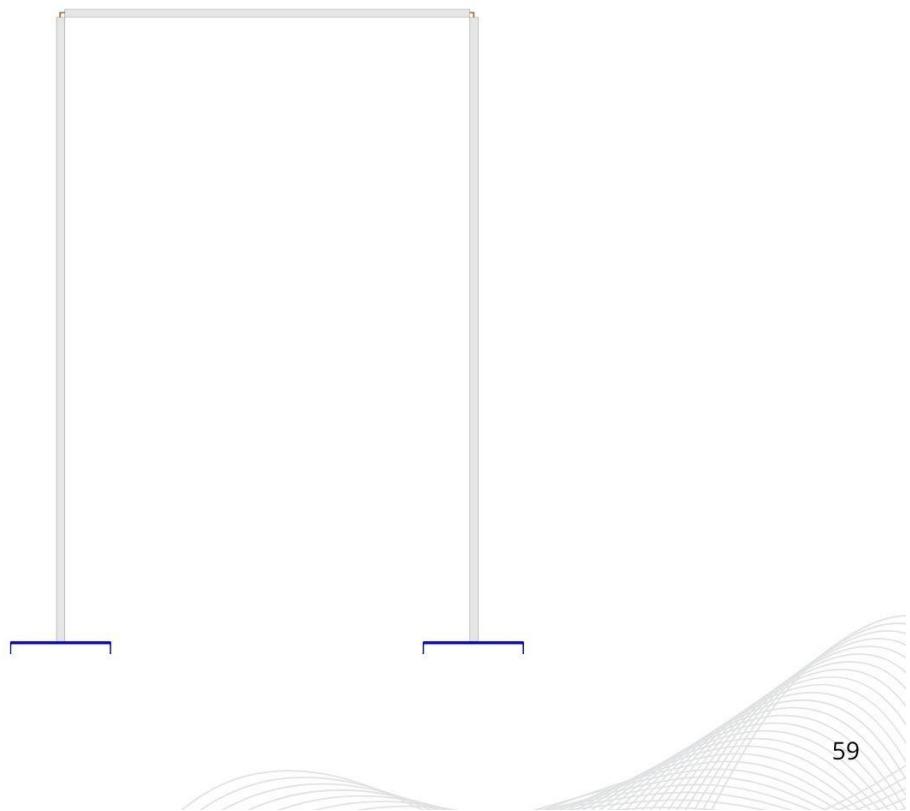
- Duas partes com comprimento de 74 cm.
- Uma parte com comprimento de 48 cm.

Em seguida, encaixe cada segmento de 74 cm no suporte universal de laboratório (item 16), de modo que a barra do suporte passe pelo interior do tubo de alumínio.

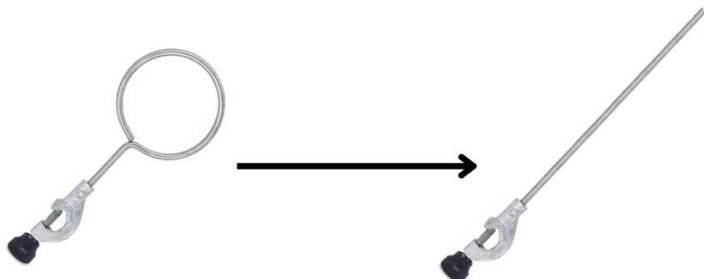
Nas extremidades superiores dos tubos posicionados no suporte, instale a cantoneira em L (item 18) em cada um deles.



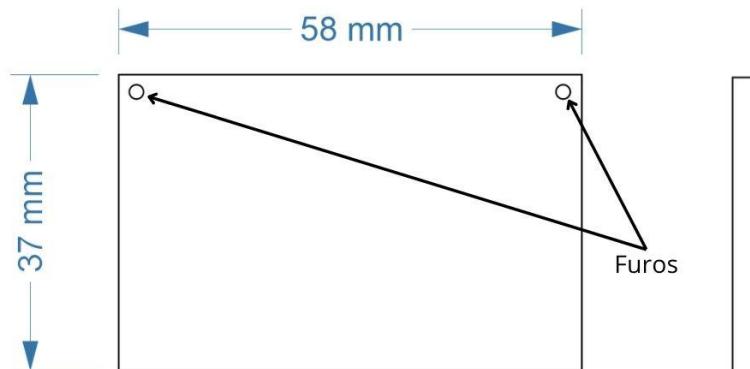
O suporte montado deve ser configurado de acordo com a imagem a seguir, apresentando-se na forma de uma “trave”.



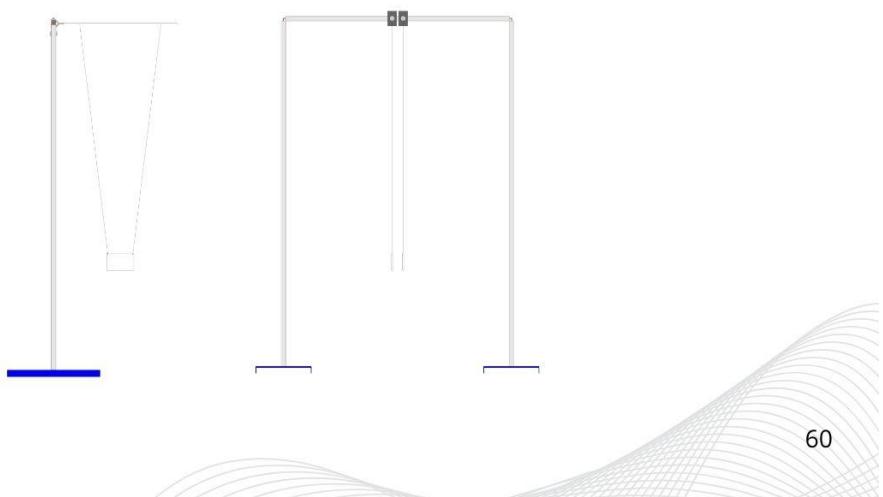
Uma modificação nos anéis de ferro com mufa (item 19) deverá ser realizada. Os anéis precisam ser desfeitos de maneira a mantê-los esticados.



Recorte a lâmina de PVC de 3 mm (item 12) em duas placas, cada uma medindo 37 x 58 mm. Em cada placa, realize dois furos, um em cada canto superior.



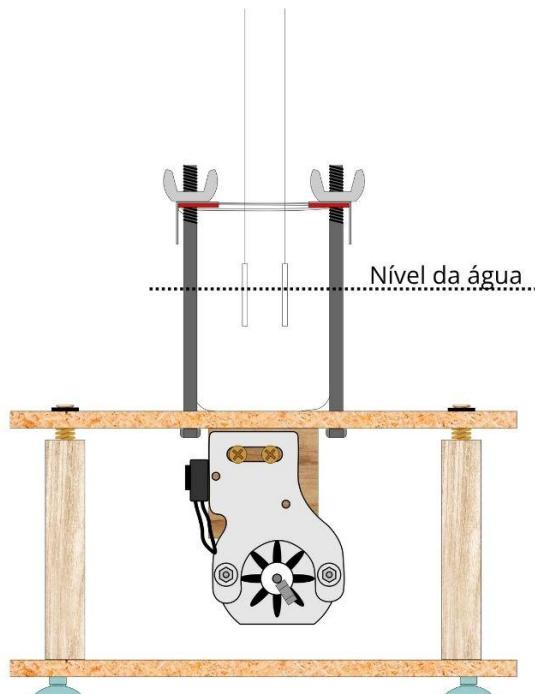
Passe duas linhas de corda encerada (item 21) pelos furos de cada placa, com aproximadamente 60 cm de comprimento, e amarre nas barras modificadas dos anéis de ferro com mufa.



Preparação para utilização

Ajuste a posição das placas dentro do bêquer para que fiquem centralizadas ao serem vistas de cima. As placas podem inicialmente estar bastante próximas, a uma distância de aproximadamente 2 cm.

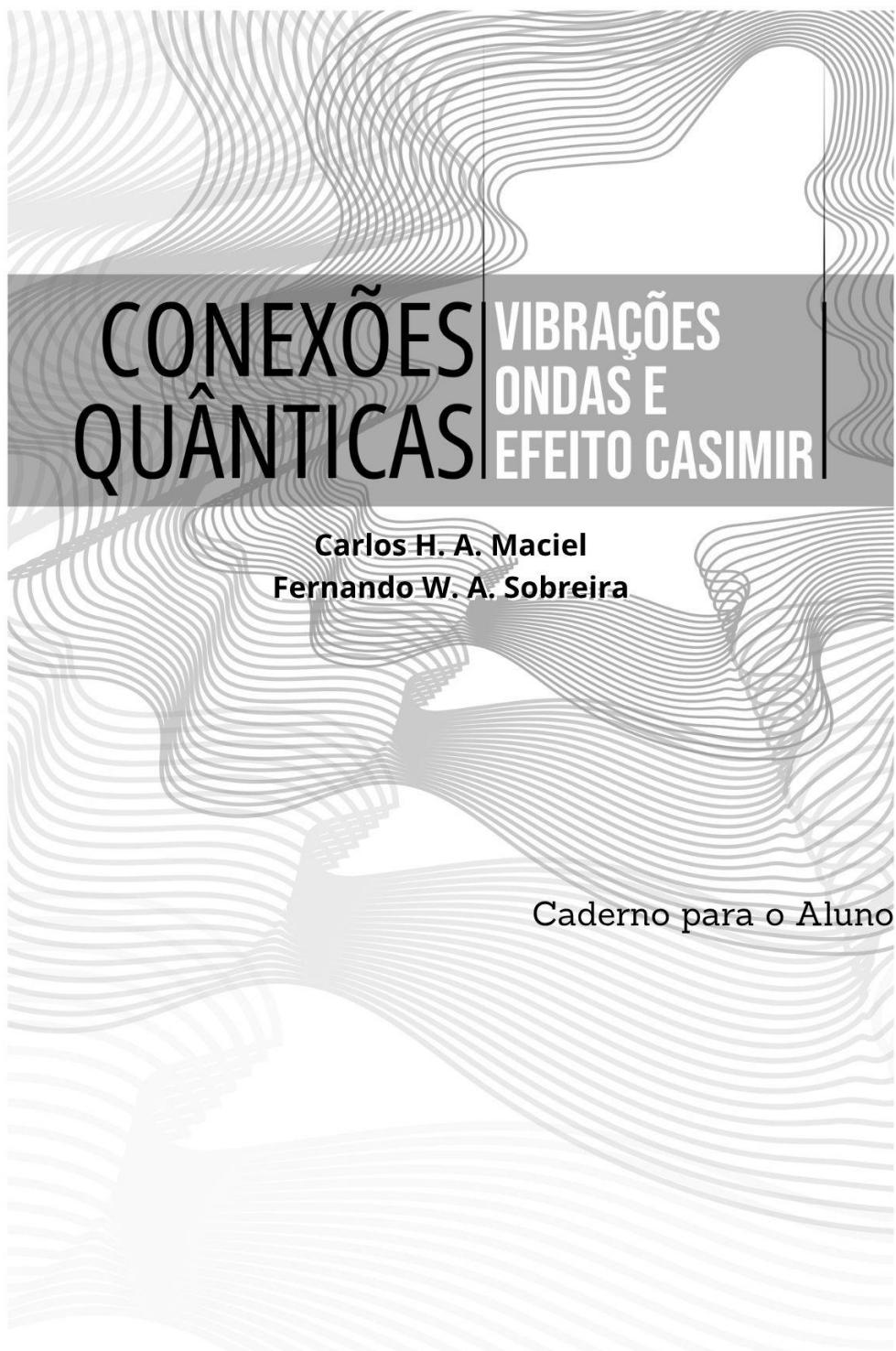
Em seguida, preencha o bêquer com água até cobrir um terço das placas.



Conecte o motor e ative-o. Realize testes para verificar se a distância é adequada, permitindo que as placas se aproximem uma da outra devido às ondas na água geradas pela vibração da plataforma.



Modelo Didático Análogo do Efeito Casimir (MDA-EC)



CONEXÕES QUÂNTICAS

VIBRAÇÕES ONDAS E EFEITO CASIMIR

Carlos H. A. Maciel
AUTOR, ILUSTRÇÃO E DIAGRAMAÇÃO

Fernando W. A. Sobreira
ORIENTADOR



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ



Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

Para você, aluno e aluna

Olá!

Seja muito bem-vindo(a) a esta jornada de descobertas que nos levará ao coração da Mecânica Quântica, o ramo da Física Moderna e Contemporânea que descreve o universo em suas menores escalas e que, ao mesmo tempo, fornece tecnologias essenciais do nosso cotidiano, dos lasers aos chips de computador.

Nas páginas que se seguem, você encontrará um roteiro cuidadosamente organizado em quatro grandes eixos: Oscilações, Ondas e Campos, Flutuações Quânticas do Vácuo e O Efeito Casimir. Esse encadeamento foi pensado para que cada novo conceito se apoie no anterior, tal como degraus que facilitam a ascensão a um ponto de vista mais amplo sobre a Natureza.

Por que começar pelas vibrações?

Ainda que a palavra “quântico” sugira algo distante, o estudo inicia no terreno familiar das vibrações, o balanço de um pêndulo, a corda de um violão, o diapasão que afina um instrumento. Esses exemplos pertencem ao mundo macroscópico, mas já encerram os mesmos princípios matemáticos que governam o interior dos átomos. Ao comparar o Oscilador Harmônico Simples Clássico com seu análogo quântico, você perceberá como a Física cria pontes entre escalas tão distintas.

Do mundo visível às flutuações do vácuo

Depois de dominar ondas eletromagnéticas e mecânicas, avançaremos rumo a um cenário surpreendente: o vácuo quântico. Ele não é sinônimo de “nada”, mas um palco onde partículas virtuais surgem e desaparecem incessantemente. A materialização desse fenômeno é o Efeito Casimir, atração misteriosa entre duas placas condutoras que se explica pela diferença de pressão dessas flutuações dentro e fora do pequeno intervalo que as separa.

O que esperamos de você

Curiosidade ativa – Questione, buque relações e confronte suas hipóteses com a experiência.

Rigor conceitual – A formalidade do vocabulário científico será nossa aliada. Aprenda a usar cada termo com precisão.

Criatividade e autonomia – As atividades propostas estimulam a construção do conhecimento pelas suas próprias mãos, seja na sala de aula, seja em casa.

Como usar este caderno

Leitura orientada: cada capítulo traz quadros de revisão, exemplos resolvidos e perguntas-guia.

QR Codes e referências digitais: ampliam seus horizontes com vídeos, simulações e artigos de divulgação.

Diálogos interdisciplinares: conecte a Física a temas de Química, Matemática, Filosofia e História da Ciência, conforme sugerido nos boxes de reflexão.

Um convite à aventura intelectual

Estudar Mecânica Quântica equivale a aprender um novo idioma da Natureza. Ele parece estranho à primeira vista, mas logo revela uma coerência matemática elegante e uma capacidade incomparável de prever fenômenos. Ao dominar esse idioma, você compreenderá não apenas o comportamento dos elétrons, mas também a emergência de tecnologias de ponta, da ressonância magnética aos computadores quânticos em desenvolvimento.

Que esta leitura lhe traga encantamento, espírito crítico e a certeza de que a Ciência é uma construção humana, aberta à participação de todos. Contamos com seu entusiasmo para que, juntos, possamos transformar conhecimento em liberdade de pensar e agir.
Receba meu abraço fraterno e acadêmico,

*Vamos construir juntos esse caminho?
A Física agradece. E o universo, talvez, também.*

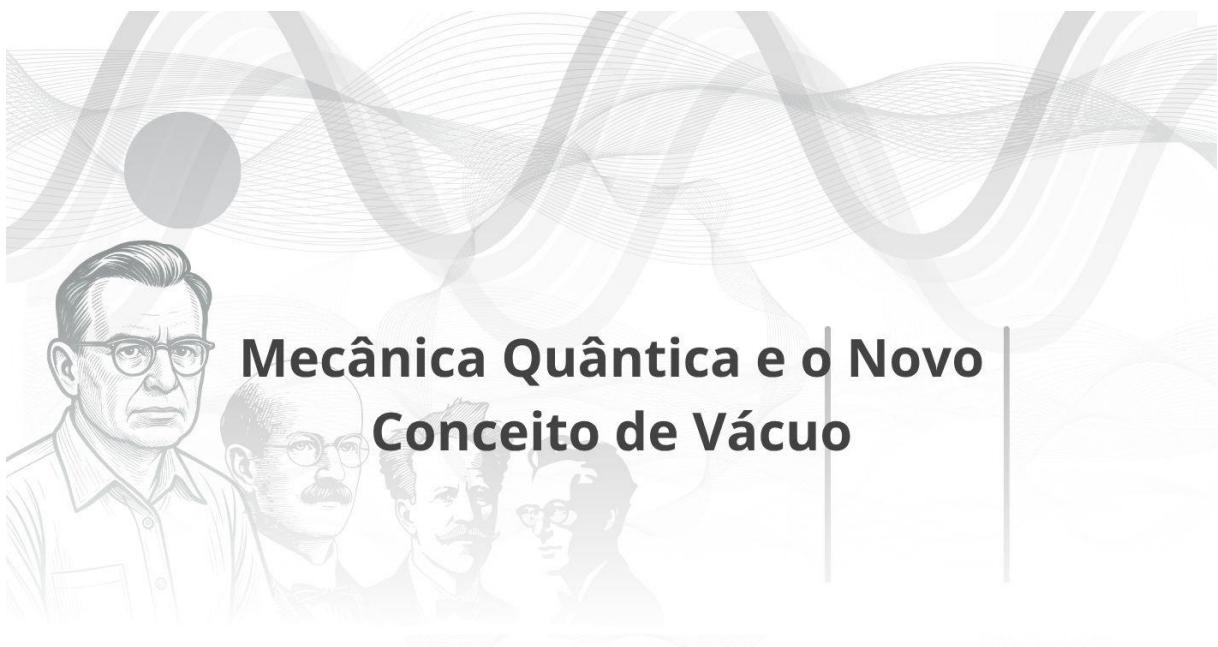
Com estima científica,

*Carlos Maciel
Criar, aprender, descobrir.*

SUMÁRIO

MECÂNICA QUÂNTICA E O NOVO CONCEITO DE VÁCUO.....	69
A pedra fundamental da Mecânica Quântica.....	69
Einstein e o efeito fotoelétrico: a confirmação do quantum de energia.....	70
O fóton e a dualidade da natureza.....	70
Do quantum de energia ao vácuo dinâmico.....	71
 CAPÍTULO 1 - OSCILAÇÕES.....	72
1.1 Oscilações Macroscópicas.....	72
<i>Movimento Harmônico Simples (MHS).....</i>	74
<i>Aplicações e Relevância das Vibrações.....</i>	79
<i>Energia do Movimento Harmônico Simples.....</i>	80
1.2 Vibrações Microscópicas.....	82
<i>Oscilador Harmônico Simples Quântico (OHSQ).....</i>	86
<i>A Energia do Oscilador Harmônico Simples Quântico.....</i>	86
<i>Representação Gráfica da Energia do OHS Quântico.....</i>	88
 CAPÍTULO 2 - ONDAS E CAMPOS.....	92
2.1 Ondas Eletromagnéticas.....	93
<i>Campo Eletromagnético Clássico.....</i>	94
<i>Campo Eletromagnético Quântico.....</i>	96
2.2 Ondas Mecânicas.....	96
<i>Ondas transversais.....</i>	98
<i>Ondas longitudinais.....</i>	99
<i>Ondas mistas.....</i>	100
2.3 Energia das ondas.....	101
 CAPÍTULO 3 - FLUTUAÇÕES QUÂNTICAS DO VÁCUO.....	106
3.1 O Princípio da Incerteza de Heisenberg.....	107
<i>Incerteza na Natureza.....</i>	108
<i>A Relação entre Energia e Tempo.....</i>	110
3.2 Flutuações Quânticas no Vácuo.....	111
<i>Flutuações do Vácuo e Suas Consequências.....</i>	113
<i>O Vácuo não é inerte.....</i>	113

CAPÍTULO 4 - O EFEITO CASIMIR	118
4.1 Fundamentação Teórica do Efeito Casimir	120
<i>Revisitando o Vácuo Quântico e as Flutuações.....</i>	120
<i>Origem e Formulação do Efeito Casimir</i>	120
4.2 O Efeito Casimir na Eletrodinâmica Quântica.....	123
<i>Aspectos Teóricos</i>	123
<i>Implicações Físicas e Experimentais</i>	123
4.3 Análogos do Efeito Casimir	124
<i>O Conceito de Análogo Físico.....</i>	124
<i>Efeito Casimir e Ondas Mecânicas</i>	125
<i>Força de Radiação e o Princípio do Efeito Casimir.....</i>	126
<i>Comparação entre o Efeito Casimir Tradicional e seu Análogo em Ondas de Superfície.....</i>	126
<i>Implicações dos Análogos do Efeito Casimir.....</i>	127
4.4 O Análogo do Efeito Casimir em Ondas de Água: Observação e Hipóteses	128
<i>Procedimento Experimental</i>	128
<i>Discussão e Reflexão Inicial</i>	129
4.5 Reflexão e Conexões com a Física Moderna.....	129
<i>Discussão das Observações</i>	129
<i>Limitações e Desafios do Experimento.....</i>	130
<i>Aplicações do Efeito Casimir na Ciência e Tecnologia.....</i>	130
<i>Conclusão e Perspectivas Finais.....</i>	131



Mecânica Quântica e o Novo Conceito de Vácuo

A Mecânica Quântica é um dos mais significativos marcos científicos do século XX, responsável por explicar comportamentos da matéria e da luz que a Física Clássica não conseguia justificar. Trata-se de um conjunto de princípios que descrevem o funcionamento do mundo em escala atômica como elétrons, fótons, prótons e demais constituintes fundamentais da natureza, segundo regras que escapam à nossa intuição cotidiana. Enquanto a Física Clássica permite, por exemplo, prever com exatidão a posição de um automóvel ao longo do tempo conhecendo sua velocidade e aceleração, a Mecânica Quântica introduz um cenário probabilístico, em que as grandezas físicas assumem valores discretos e o comportamento das partículas é descrito por funções de onda.

A pedra fundamental da Mecânica Quântica

No final do século XIX, um dos grandes impasses da Física era compreender como os corpos aquecidos emitiam radiação eletromagnética. As previsões baseadas na teoria clássica conduziam a resultados sem sentido, como a chamada “catástrofe do ultravioleta”, em que a energia irradiada tenderia ao infinito em altas frequências.

Figura 1 - A equação de onda de Schrödinger em um quadro-negro

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi$$

Fonte: Risking Mystery and Creativity in Science - Scientific Figure on ResearchGate.

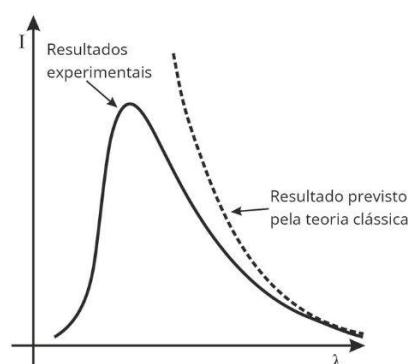


Figura 2 - Gráfico da intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda conforme previsto pela teoria eletromagnética de Maxwell, fundamentada no modelo ondulatório.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em 1900, o físico alemão Max Planck propôs uma hipótese revolucionária: a energia não seria emitida de maneira contínua, mas sim em pacotes mínimos e indivisíveis, os chamados **quanta**.

Planck, ciente da ousadia de sua proposta, declarou que “a experiência provará se esta hipótese acontece na natureza”. Ele introduziu a constante que leva seu nome, h , um número extremamente pequeno que define o valor mínimo de energia associado a cada quantum. A equação que sintetiza sua proposta é:

$$E = hf$$

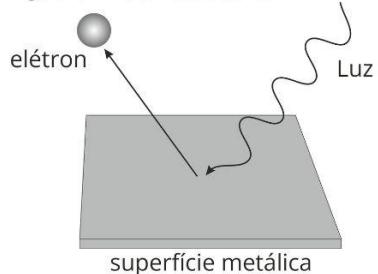
em que E é a energia do quantum e f , a frequência da radiação. Embora essa quantização não seja perceptível em escalas cotidianas, ela se torna essencial no mundo atômico. Com a publicação do seu artigo em 1900, intitulado *Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro contínuo*, Planck lançou as bases de uma nova Física.

Einstein e o efeito fotoelétrico: a confirmação do quantum de energia

Cinco anos depois, Albert Einstein aprofundou a ideia de Planck ao investigar o efeito fotoelétrico, um fenômeno no qual a incidência de luz sobre uma superfície metálica provoca a emissão de elétrons (Figura 3). Experimentos conduzidos por Philipp Lenard demonstraram que a energia dos elétrons ejetados não variava com a intensidade da luz, contrariando as expectativas da teoria clássica.

Einstein propôs que a luz era composta por partículas de energia, os quanta de Planck, e que cada uma delas possuía energia proporcional à frequência da radiação: $E=hf$. O aumento da intensidade luminosa implicava, portanto, apenas um aumento no número de quanta, e não em sua energia individual. Essa interpretação explicou os dados experimentais e foi reconhecida com o Prêmio Nobel de Física concedido a Einstein em 1921, consolidando a ideia de que a luz também possui um aspecto corpuscular.

Figura 3 - Efeito fotoelétrico



Fonte: Elaborado pelo autor.

O fóton e a dualidade da natureza

Em 1926, o químico Gilbert Lewis propôs o nome **fóton** para esse quantum de luz, descrevendo-o como um “mensageiro” das interações radiativas. A partir daí, solidificou-se o conceito da **dualidade onda-partícula**, segundo o qual luz e matéria podem se comportar ora como partículas, ora como ondas, dependendo da situação. Esse princípio, embora contraintuitivo, tornou-se um dos pilares da Mecânica Quântica.

Do quantum de energia ao vácuo dinâmico

O conceito de quantização da energia não transformou apenas a nossa compreensão sobre a luz, ele modificou a própria noção de vácuo. No contexto quântico, mesmo quando não há matéria nem radiação visível, persiste uma energia mínima chamada **energia de ponto zero**. Esse estado fundamental não é inerte nem passivo, nele ocorrem constantemente **flutuações quânticas**, uma consequência direta do **Princípio da Incerteza de Heisenberg**, que estabelece limites intransponíveis para a precisão com que se pode conhecer simultaneamente certas grandezas físicas.

Décadas mais tarde, o físico Hendrik Casimir mostrou que essas flutuações produzem efeitos observáveis. Ele demonstrou que, ao se posicionarem duas placas metálicas muito próximas uma da outra, surgiria entre elas uma força de atração gerada pela diferença na densidade de modos vibracionais do campo eletromagnético do vácuo. Esse fenômeno, hoje chamado **Efeito Casimir**, foi posteriormente confirmado experimentalmente por M. J. Sparnaay, revelando que o vácuo quântico está longe de ser um espaço vazio, tratando-se, na verdade, de um campo dinâmico, permanentemente ativo.

Fundamentos que serão explorados ao longo deste caderno

Antes de explorarmos com mais profundidade o Efeito Casimir e suas implicações, é importante ressaltar que este caderno apresentará, de maneira gradual e contextualizada, os principais fundamentos que sustentam a Física Quântica. Entre eles, destacam-se: a quantização da energia, observável em sistemas como o oscilador harmônico quântico; a energia de ponto zero, que evidencia a atividade quântica mesmo em estados aparentemente estáticos; o Princípio da Incerteza de Heisenberg, que torna as flutuações inevitáveis; e a Teoria Quântica de Campos, segundo a qual partículas são compreendidas como excitações de campos fundamentais que permanecem ativos mesmo no estado de vácuo. Além disso, o caderno aborda conceitos essenciais da Física Clássica que oferecem base para a compreensão dos fenômenos quânticos, como oscilações, ondas e campos. Todos esses conteúdos serão desenvolvidos nos capítulos seguintes, culminando na análise do Efeito Casimir, fenômeno central deste material e chave para entendermos como a Mecânica Quântica se manifesta até mesmo onde nada aparentemente existe.



Capítulo 1

Oscilações

O mundo vibra em todas as escalas, do estrondo do trovão ao movimento de moléculas e átomos. No nível macroscópico, podemos observar oscilações (ou vibrações) em sistemas como pêndulos e cordas vibrantes. No nível microscópico, essas vibrações seguem princípios distintos, que são regidos pela Mecânica Quântica. Para compreender essa transição, iniciaremos explorando um modelo clássico de vibração, o **Movimento Harmônico Simples**.

As **vibrações** podem ser definidas como movimentos oscilatórios de um corpo ou sistema em torno de uma **posição de equilíbrio** (ou estado de equilíbrio). Ao longo de nossa jornada, exploraremos como o conceito de vibração, tão familiar à nossa realidade, se conecta a fenômenos fundamentais descritos pela Mecânica Quântica.

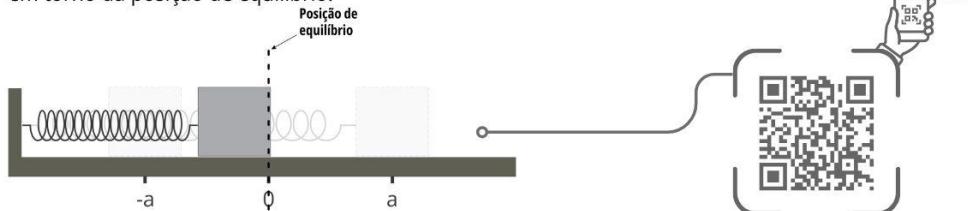
Tecnicamente, o mundo **macroscópico** segue as leis da **Física Clássica**, como a Mecânica Newtoniana, e o **microscópico** é regido pela **Mecânica Quântica**.

A **posição de equilíbrio**, no contexto das vibrações, é o ponto central em relação ao qual o corpo ou sistema oscila.

1.1 Oscilações Macroscópicas

No universo que conseguimos observar cotidianamente, as vibrações estão presentes em inúmeros sistemas físicos, manifestando-se desde objetos em repouso sujeitos a pequenas perturbações até estruturas que produzem sons e padrões oscilatórios bem definidos. Esses sistemas podem ser analisados a partir de modelos clássicos que descrevem suas propriedades fundamentais. Veja nos seguintes exemplos:

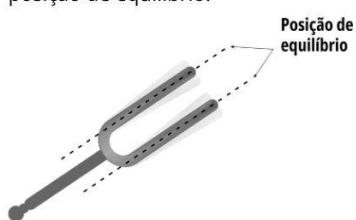
Figura 1.1 - Sistema massa-mola horizontal oscilando em torno da posição de equilíbrio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um bloco preso a uma mola (sistema massa-mola) (figura 1.1) é um exemplo clássico de movimento oscilatório, no qual um bloco preso a uma mola se move para frente e para trás em torno de uma posição de equilíbrio (nesse caso, a posição 0). Quando o bloco é deslocado (comprimindo a mola ou a distendendo), a mola exerce uma força restauradora que o traz de volta, criando assim um movimento repetitivo. Na seção Movimentos **Harmônico Simples (MHS)** veremos as características do sistema massa-mola com maiores detalhes.

Figura 1.2 - Diapasão com suas hastes oscilando em torno da posição de equilíbrio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O **diapasão** (figura 1.2) é um instrumento simples e preciso que, ao ser golpeado, vibra em uma frequência específica, emitindo uma nota sonora pura e constante. Essas vibrações produzem ondas sonoras que se propagam pelo ar, criando o som que ouvimos. A frequência do som emitido depende das características físicas do diapasão, como o tamanho e o material de que é feito, mas, uma vez fabricado, ele sempre vibra na mesma frequência, tornando-se uma referência confiável para afinação de instrumentos e estudos acústicos.

Figura 1.3 - Corda de violão oscilando em torno da posição de equilíbrio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As **cordas de instrumentos musicais** (figura 1.3), como as do violão, vibram quando são tocadas, criando ondas sonoras que se propagam pelo ar e produzem o som que ouvimos. A altura do som (se mais grave ou agudo) depende de fatores como o comprimento, a espessura e a tensão da corda.

¹Acesse a simulação em: https://youtu.be/M7S4rzN7N_4?si=0jwERD2NitREsqcf

²Acesse a simulação em: <https://youtu.be/n3LWMA5lWEI?si=ruE3z-YR0HQDfxCQ>

Esses exemplos ilustram como as vibrações são fundamentais para entender desde a música até dispositivos tecnológicos sofisticados. Mas como prever o comportamento dessas oscilações? Se puxarmos levemente uma mola e a soltarmos, ou balançarmos um pêndulo, percebemos que o movimento segue um padrão repetitivo. Esse tipo de oscilação pode ser descrito matematicamente pelo **Movimento Harmônico Simples (MHS)**, um modelo essencial para estudar vibrações em diversos sistemas físicos.

Movimento Harmônico Simples (MHS)

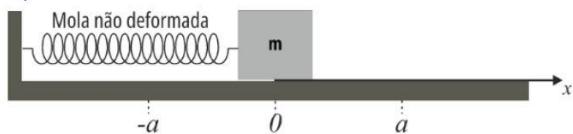
O MHS descreve oscilações periódicas ao redor de uma posição de equilíbrio, caracterizadas pela presença de uma força restauradora que atua no sentido de restabelecer o equilíbrio do sistema. Esse modelo fundamenta a descrição de vibrações em diversas escalas, desde pêndulos até moléculas. Em sua forma ideal, essa é uma oscilação periódica, ou seja, repete-se em intervalos de tempo regulares. Por essa razão, ele é amplamente utilizado na descrição de vibrações simples. Um exemplo clássico de MHS é o movimento do sistema massa-mola horizontal, típico Oscilador Harmônico Simples Clássico (OHS Clássico).

Para entender as características presentes num sistema como esse, considere um bloco de massa m , em repouso sobre um plano horizontal idealmente liso (sem atrito), conectado a uma mola, conforme ilustrado na figura 1.4. Nesse caso, podemos tratar a mola como ideal, ou seja, possui massa desprezível e é caracterizada pela constante elástica k .

Um movimento periódico é aquele em que a posição, a velocidade e a aceleração do corpo se repetem em intervalos regulares de tempo, como ocorre na órbita elíptica de um planeta ao redor do Sol.



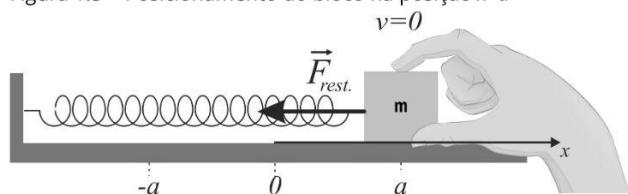
Figura 1.4 - Sistema massa-mola horizontal na posição de equilíbrio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considere um eixo x associado ao plano horizontal, cuja origem coincide com a posição de equilíbrio do sistema (posição 0, quando a mola não está deformada) e é orientado na mesma direção do eixo da mola. Agora, deslocamos o bloco da posição de equilíbrio, movendo-o para a direita até a posição $x=a$, conforme ilustrado na Figura 1.5.

Figura 1.5 - Posicionamento do bloco na posição $x=a$



Fonte: Elaborado pelo autor.

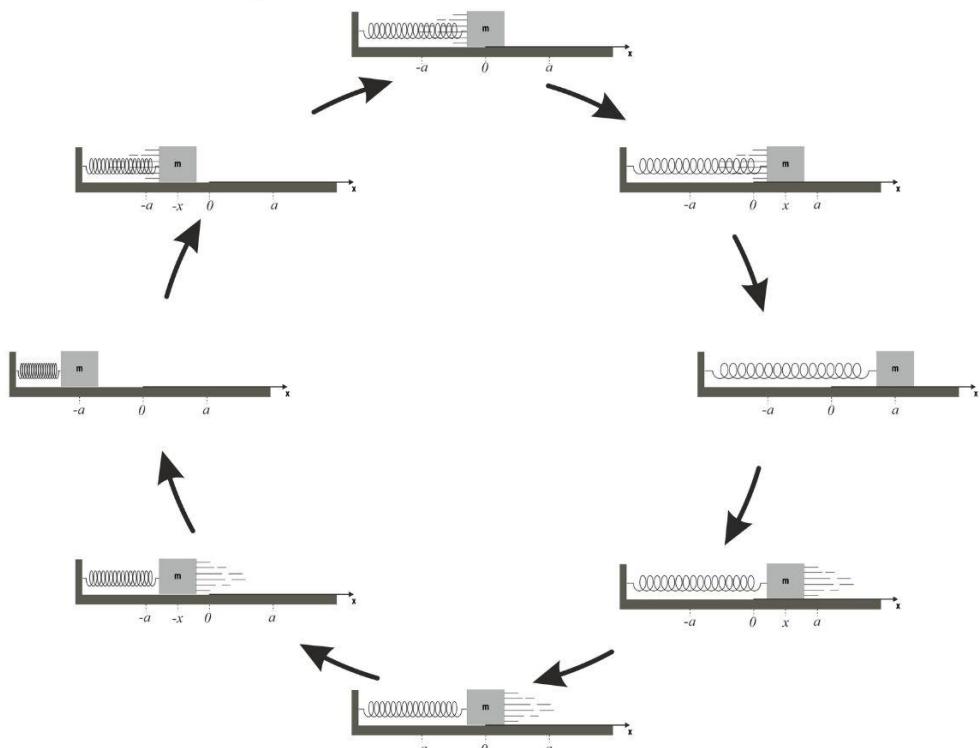
Quando o bloco é deslocado de sua posição de equilíbrio, a mola exerce uma força restauradora F_x , determinada pela Lei de Hooke:

$$F_x = -kx \quad (1.1)$$

no qual k é a constante elástica da mola, que caracteriza sua rigidez. O sinal negativo indica que a força sempre atua no sentido oposto ao deslocamento, buscando restaurar a posição de equilíbrio.

Se soltarmos o bloco da posição a , o sistema executará um movimento oscilatório e periódico, com a amplitude variando entre $x=a$ e $x=-a$, caracterizando um sistema conservativo, conforme ilustrado na Figura 1.6.

Figura 1.6 - Ciclo de oscilação do sistema massa mola (sistema conservativo).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante esse movimento, o bloco passa repetidamente pelas mesmas posições ao longo do tempo, caracterizando um ciclo periódico. O tempo necessário para completar um ciclo completo é denominado período T do movimento e é dado pela equação:

$$T = \frac{\Delta t}{n} \quad (1.2)$$

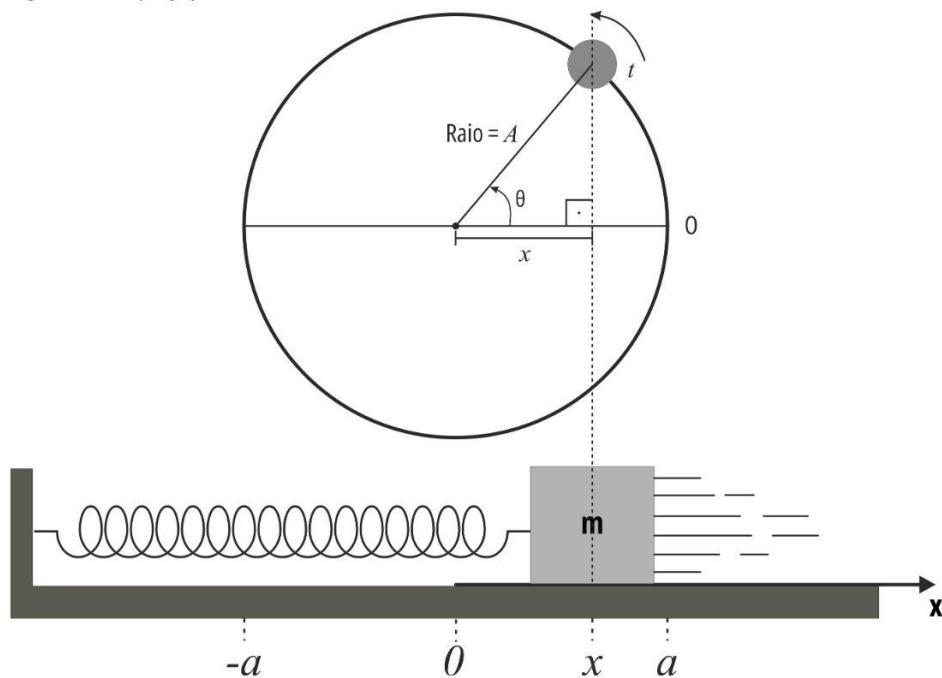
No Sistema Internacional de Unidades (SI), o período é medido em segundos (s). O inverso do período define a frequência (f) do movimento oscilatório, que representa o número de ciclos por unidade de tempo. Sua unidade no SI é o hertz (Hz):

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.3)$$

Se observarmos um pêndulo oscilando ou uma mola sendo esticada (distendida) e, após a sua liberação, retornando à sua posição original, perceberemos que esses sistemas oscilam de maneira previsível. Além disso, nota-se que uma mola mais rígida (k maior) oscila mais rapidamente, enquanto uma mola menos rígida (k menor) oscila mais devagar, demonstrando a influência da constante elástica k conforme previsto pela Lei de Hooke.

O movimento oscilatório do sistema massa-mola pode ser analisado em analogia com o Movimento Circular Uniforme (MCU). A projeção desse movimento sobre o eixo x resulta no Movimento Harmônico Simples (MHS), como ilustrado na Figura 1.7.

Figura 1.7 - A projeção do MCU sobre o eixo x , descrevendo o MHS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A coordenada x , medida a partir do ponto médio da trajetória, é denominada de **elongação**. No centro do movimento, a elongação é **nula** ($x=0$). A grandeza A , que corresponde ao raio da circunferência no modelo de associação com o MCU, é chamada de **amplitude do MHS** e representa o maior deslocamento que o sistema pode atingir em relação à posição de equilíbrio (quando $x=-a$ ou $x=a$).

Agora, definimos ω como a velocidade angular da partícula no MCU e θ como a fase do movimento. A função horária da fase angular é escrita como:

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega t \quad (1.4)$$

no qual θ_0 é a fase inicial no instante que $t=0$.

Utilizando a relação trigonométrica do triângulo retângulo associado ao MCU, a elongação pode ser escrita como:

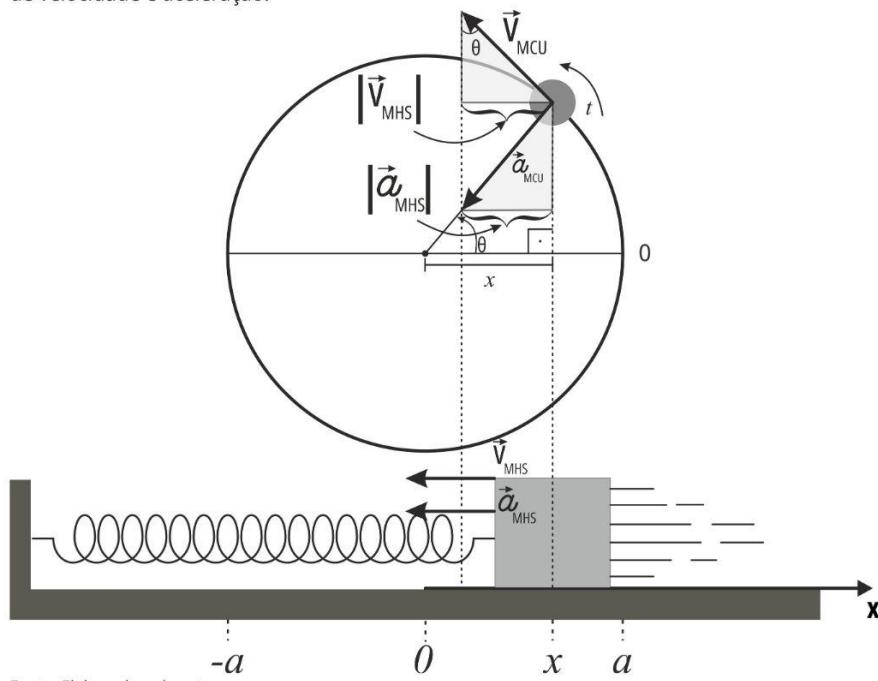
$$x = A \cos \theta \quad (1.5)$$

Substituindo a equação (1.4) na equação (1.5), obtemos a função horária da posição no MHS:

$$x(t) = A \cos(\theta_0 + \omega t) \quad (1.6)$$

A velocidade instantânea do bloco pode ser determinada a partir da projeção do vetor velocidade do MCU, conforme ilustrado na Figura 1.8.

Figura 1.8 - Relação entre o MHS e o MCU, destacando a correspondência entre os vetores de velocidade e aceleração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela decomposição vetorial do MCU, obtemos:

$$v_{MHS} = v_{MCU} \operatorname{sen} \theta \quad (1.7)$$

Sabemos que a velocidade linear no MCU é dada por $v_{MCU} = \omega A$, e substituindo essa relação na equação (1.7), juntamente com (1.4), obtemos:

$$v_{MHS} = \omega A \operatorname{sen}(\theta_0 + \omega t) \quad (1.8)$$

Como o movimento ocorre no sentido oposto ao do eixo x (movimento retrógrado), a função horária da velocidade escalar instantânea é dada por:

$$v_x(t) = -\omega A \operatorname{sen}(\theta_0 + \omega t) \quad (1.9)$$

Para a aceleração, o mesmo procedimento é realizado considerando a projeção do vetor aceleração do MCU, resultando na função horária:

$$a_x(t) = -\omega^2 A \cos(\theta_0 + \omega t) \quad (1.10)$$

Substituindo $A \cos(\theta_0 + \omega t)$ por x , conforme a equação (1.6), obtemos:

$$a_x = -\omega^2 x \quad (1.11)$$

Reescrevendo a Lei de Hooke (1.1), podemos expressá-la como:

$$ma_x = -kx \quad (1.12)$$

ou, reorganizando os termos:

$$a_x = -\frac{k}{m}x \quad (1.13)$$

Comparando com a equação (1.11), identificamos:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.14)$$

Agora, considerando um ciclo completo ($\Delta\theta=2\pi$), e sabendo que o tempo para completar esse ciclo é o período T , temos:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1.15)$$

Igualando as equações (1.14) e (1.15), obtemos a expressão do período do MHS:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1.16)$$

Analogamente, a frequência do movimento é:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.17)$$



O estudo do Movimento Harmônico Simples não se limita a sistemas mecânicos como pêndulos massas acopladas em molas. Ele desempenha um papel fundamental em diversos fenômenos naturais e tecnológicos, desde a propagação de ondas sonoras até o funcionamento de circuitos elétricos oscilantes. A seguir, exploraremos algumas aplicações práticas das vibrações e sua importância em diferentes campos da ciência e engenharia.

Aplicações e Relevância das Vibrações

As vibrações não são apenas um fenômeno físico fascinante, mas um conceito essencial na tecnologia moderna. Sem elas, muitos dos dispositivos que usamos diariamente simplesmente não funcionariam. Veja algumas de suas aplicações essenciais:



Sensores eletrônicos e tecnologia móvel: Os acelerômetros e giroscópios em celulares, tablets e videogames funcionam com base em oscilações microscópicas, permitindo detectar movimento e orientação.



Engenharia e segurança estrutural: O estudo das vibrações em pontes e edifícios é essencial para evitar colapsos. O famoso caso da **Ponte de Tacoma Narrows** mostrou como a ressonância pode ser catastrófica quando não levada em consideração no projeto (figura 1.9).



Medicina e diagnóstico por imagem: Exames como ultrassonografia utilizam ondas mecânicas de alta frequência para visualizar órgãos internos sem procedimentos invasivos.



Comunicações e eletrônica: Osciladores eletrônicos são fundamentais para a transmissão de rádio, TV e telefonia, sincronizando sinais e garantindo a estabilidade das transmissões.

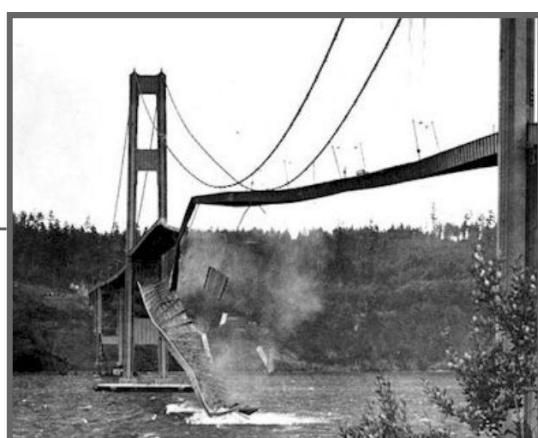


Figura 1.9 - Seção intermediária da ponte colidindo com as águas do Tacoma Narrows, 7 de novembro de 1940.

Fonte: Foto de Bashford e Thompson. PH Coll. 290.36 Bibliotecas da Universidade de Washington. Coleções Especiais, Arquivos da Universidade.



Energia do Movimento Harmônico Simples

O oscilador harmônico massa-mola não se limita a um simples movimento de vai e vem, mas é um modelo fundamental para a compreensão da transformação de energia em sistemas físicos. Durante a oscilação, a energia total do sistema não é criada nem destruída, mas se converte alternadamente entre duas formas principais: **Energia Potencial Elástica** e **Energia Cinética**.

Figura 1.10 -Distribuição da Energia Potencial e Cinética no Movimento Harmônico de um Bloco Preso a uma Mola (Sistema massa-mola).

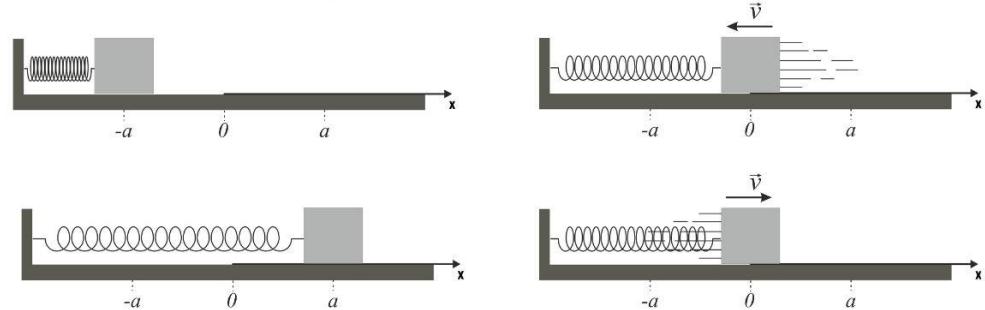


Figura 1.10a - **Energia Potencial Elástica:** atinge seu máximo quando a mola está mais comprimida ($x=-a$) ou mais esticada ($x=a$), armazenando a capacidade de realizar trabalho.

Figura 1.10b - **Energia Cinética:** alcança seu pico na posição de equilíbrio ($x=0$), na qual a velocidade do bloco é máxima.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa troca contínua entre energia potencial e cinética ocorre de maneira periódica e simétrica, mantendo a energia mecânica total constante, em conformidade com o princípio da conservação da energia mecânica. Esse comportamento não apenas destaca a elegância matemática do sistema, mas também exemplifica como a natureza mantém um equilíbrio dinâmico em fenômenos oscilatórios.

Quando o bloco é deslocado até a posição $x=a$, e mantido em repouso, a única energia presente no sistema é a energia potencial elástica, dada por:

$$E_p = \frac{1}{2} K a^2 \quad (1.18)$$

Como o bloco está em repouso, a sua energia cinética é zero. Assim, a energia mecânica total do sistema é:

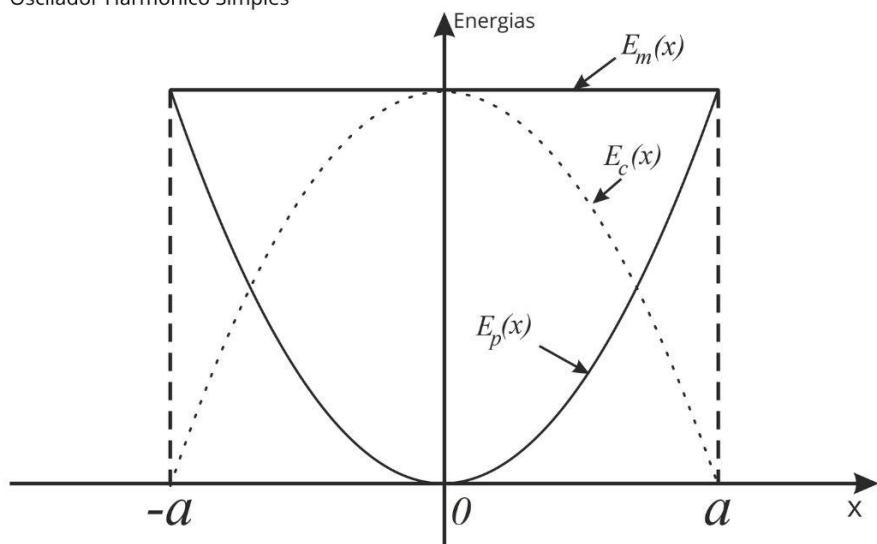
$$E_m = E_p + E_c = \frac{1}{2} k a^2 + 0 \quad (1.19)$$

portanto, concluímos que:

$$E_m = \frac{1}{2}ka^2 \quad (1.20)$$

Graficamente as energias do oscilador massa-mola horizontal podem ser representadas no Gráfico 1.1:

Gráfico 1.1 - Gráfico da distribuição das Energias Cinética, Potencial e Mecânica no Oscilador Harmônico Simples



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o movimento do bloco entre as posições $x=-a$ e $x=0$, a energia potencial elástica armazenada na mola se converte em energia cinética, aumentando a velocidade do bloco. Ao atravessar a posição de equilíbrio ($x=0$), a energia cinética é máxima e a potencial é mínima. No deslocamento de $x=0$ até $x=a$, ocorre o processo inverso, a energia cinética se converte novamente em energia potencial elástica. Esse ciclo de conversão de energia se repete continuamente, resultando em um movimento oscilatório periódico.

A energia mecânica total do oscilador massa-mola horizontal é sempre positiva e depende dos parâmetros do sistema dados pela Equação 1.20.

Se o sistema estiver em repouso na posição de equilíbrio, sem deformação da mola (Figura 1.4), a energia mecânica total é zero. Entretanto, caso haja uma deformação inicial da mola, o sistema armazenará energia potencial elástica, que será convertida em energia cinética ao longo do movimento oscilatório.

A análise da energia no Movimento Harmônico Simples não se restringe a sistemas macroscópicos como o oscilador massa-mola. Os mesmos princípios de conversão entre energia cinética e energia potencial se aplicam a fenômenos microscópicos, como as oscilações de átomos e moléculas.

Nas escalas atômicas, átomos e moléculas vibram sob a ação de forças restauradoras que determinam seu comportamento oscilatório. Diferentemente do mundo macroscópico, essas vibrações são descritas pela Mecânica Quântica, segundo a qual a energia vibracional só pode assumir valores discretos e quantizados. Esses modos de vibração desempenham um papel fundamental nas propriedades térmicas e estruturais da matéria, influenciando, por exemplo, a capacidade de condução de calor e o comportamento de sólidos no contexto da matéria condensada.

1.2 Vibrações Microscópicas

Observamos que, em sistemas macroscópicos, o Movimento Harmônico Simples é um modelo fundamental que descreve uma ampla variedade de fenômenos oscilatórios, desde a vibração de um sistema massa-mola até oscilações em estruturas maiores. Nesses sistemas, a energia se alterna continuamente entre suas formas cinética e potencial, podendo assumir qualquer valor dentro de um intervalo contínuo.

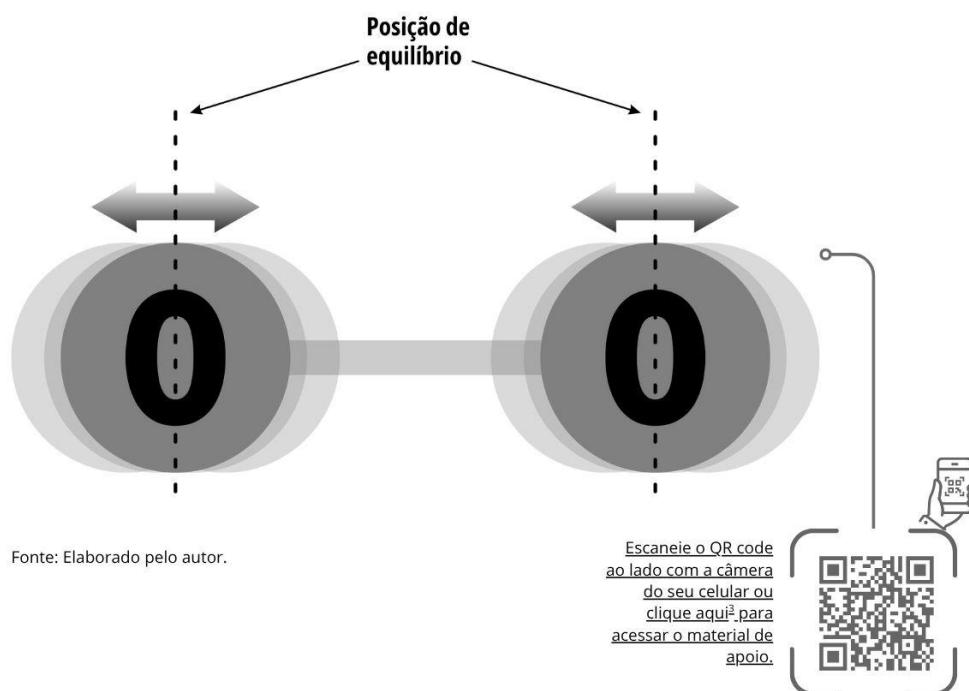
No entanto, ao nos concentrarmos nos fenômenos que ocorrem em escalas microscópicas, onde moléculas e átomos vibram em dimensões imperceptíveis aos nossos sentidos, percebemos uma ruptura no paradigma da Física Clássica.

Na fronteira da Física Quântica, surge uma diferença fundamental: a energia do sistema não pode mais variar de forma contínua, mas sim em valores discretos, ou seja, é quantizada. Isso significa que um átomo ou uma molécula vibrante não pode possuir qualquer valor de energia, mas apenas aqueles que correspondem a múltiplos inteiros de um quantum mínimo de energia. Essa restrição pode ser comparada a uma escada, onde um sistema só pode ocupar degraus específicos, sem estados intermediários.

Essa transição da Física Clássica para a Quântica não é apenas uma abstração teórica, mas um princípio fundamental que rege o comportamento da matéria em escalas microscópicas. Esse conceito explica fenômenos essenciais, como a absorção e emissão de luz por átomos, o funcionamento de lasers e até os modos vibracionais de moléculas em espectroscopia infravermelha.

Se ampliarmos nossa visão para escalas ainda menores, além dos limites do que o olho humano pode captar, veremos que as vibrações continuam presentes, mas sob novas características. Em sistemas microscópicos, moléculas e átomos vibram em torno de suas posições de equilíbrio, regidos por princípios quânticos que diferem profundamente do comportamento clássico observado em sistemas macroscópicos. Por exemplo, em uma molécula diatômica, como o oxigênio molecular (O_2) (Figura 1.11), os átomos vibram em torno de uma distância média de equilíbrio, devido às forças de atração e repulsão que governam suas interações. Essas oscilações correspondem a modos vibracionais da molécula e são fundamentais para a absorção e emissão de energia em espectros de vibração.

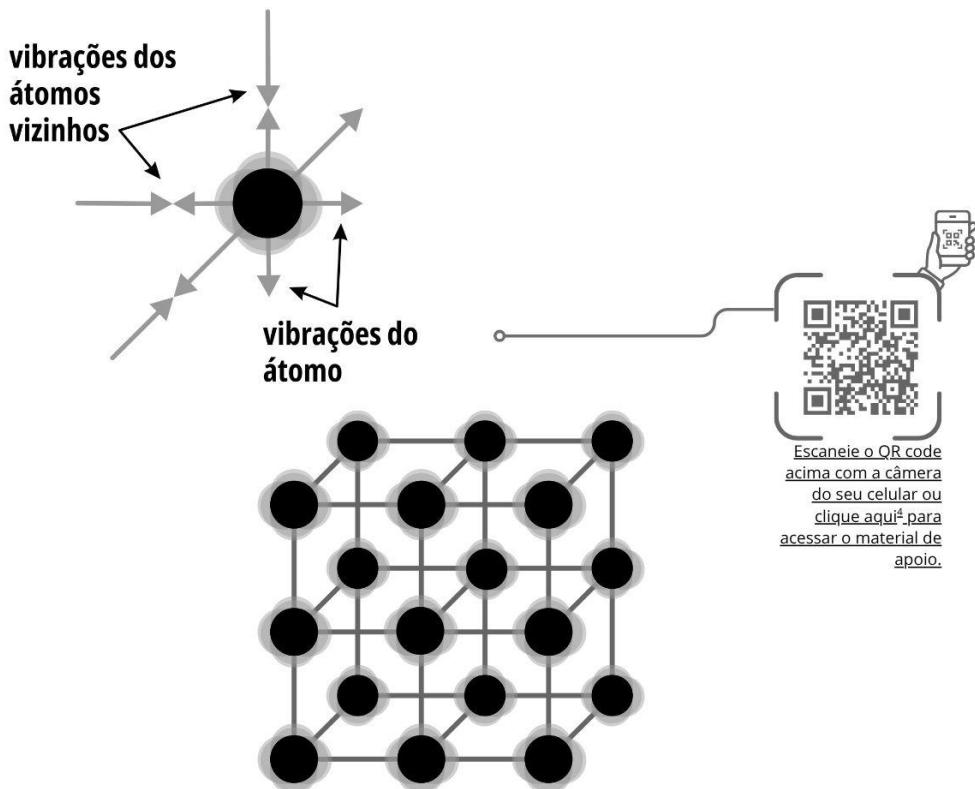
Figura 1.11 - Molécula de oxigênio (diagrama de oscilação).



Em sólidos cristalinos (Figura 1.12), como os metais, os átomos que compõem a rede cristalina não estão estáticos, mas oscilam continuamente em torno de suas posições de equilíbrio. Essas oscilações coletivas são denominadas fôtons, que representam quantizações das vibrações da rede. Assim como os fôtons correspondem aos quanta de energia da luz, os fôtons podem ser interpretados como pacotes discretos de energia vibracional que se propagam pela estrutura cristalina, desempenhando um papel essencial no transporte de calor e na influência das propriedades térmicas e elétricas do material.

³Acesse a simulação em: <https://youtu.be/SPVUvE9emeE?si=4ymSd-sXq3tUSL56>

Figura 1.12 - Sólido cristalino (diagrama de oscilação).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas vibrações em níveis moleculares e atômicos são fundamentais para a compreensão da estrutura da matéria e influenciam propriedades como calor específico, condutividade térmica e elasticidade. No entanto, ao explorarmos escalas ainda menores, no domínio da Mecânica Quântica, essas vibrações passam a seguir regras que não se manifestam no regime clássico. É nesse contexto que surge o conceito de quantização da energia.

A **estrutura da matéria** é a organização dos átomos, moléculas ou íons no espaço, definindo as propriedades dos materiais, como densidade e condutividade, e influenciando suas aplicações práticas.

Um **quantum** é a menor unidade indivisível de uma grandeza física que pode ser quantizada. Representa um valor discreto associado a propriedades fundamentais dos sistemas naturais, como energia, carga elétrica e momento angular. Em um sistema físico, as interações e trocas dessas grandezas ocorrem exclusivamente em múltiplos inteiros desse valor mínimo, conhecido como quantum. Exemplos incluem os fôtons, que são os quanta (plural de quantum) da energia eletromagnética, e os elétrons, que carregam quanta de carga elétrica elementar.

³Acesse a simulação em: https://youtu.be/xLN3Z_BFPnI

Além dos Quanta

**9. Ueber das Gesetz
der Energieverteilung im Normalspectrum;
von Max Planck.**

(In anderer Form mitgeteilt in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft,
Sitzung vom 19. October und vom 14. December 1900, Verhandlungen
2. p. 202 und p. 237. 1900.)



No artigo "Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum" (1901), Max Planck desenvolveu uma teoria inovadora para explicar a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro. O problema central abordado no estudo era a discrepância entre as previsões teóricas clássicas e os dados experimentais referentes à radiação térmica, especialmente a falha da física clássica em descrever corretamente o espectro na região de altas frequências (o que ficou conhecido como catástrofe do ultravioleta).

Para resolver essa questão, Planck propôs um novo modelo baseado na hipótese de que a energia não é emitida ou absorvida de forma contínua, como sugeria a física clássica, mas sim em unidades discretas ou quanta de energia. Ele postulou que a energia de um oscilador atômico é proporcional à frequência da radiação emitida, dada pela expressão:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)hf$$

A introdução desse conceito revolucionário permitiu que Planck derivasse uma nova fórmula para a distribuição espectral da radiação do corpo negro, que se ajustava perfeitamente aos dados experimentais. Além disso, ele determinou o valor de h empiricamente, estabelecendo uma das constantes fundamentais da física moderna.

O artigo de Planck é um marco na história da ciência, pois lançou as bases para o desenvolvimento da mecânica quântica, ao demonstrar que os processos físicos em escala microscópica não seguem necessariamente as leis da física clássica, mas sim princípios fundamentados na quantização da energia.

⁵ Acesse o artigo completo em: <https://doi.org/10.1002/andp.19013090310>

Oscilador Harmônico Simples Quântico (OHSQ)

O Oscilador Harmônico Simples Quântico (OHSQ) é um modelo fundamental da Mecânica Quântica que descreve o comportamento de uma partícula submetida a um potencial harmônico, análogo ao sistema massa-mola estudado anteriormente. No entanto, diferentemente do OHS clássico, onde a energia pode variar continuamente, no regime quântico, ela assume apenas valores discretos, conhecidos como níveis de energia quantizados.

A Energia do Oscilador Harmônico Simples Quântico

No domínio quântico, a oscilação de partículas em um potencial harmônico segue regras específicas: a energia total não pode assumir qualquer valor, mas apenas níveis bem definidos. Enquanto no modelo clássico a energia varia continuamente dentro de um intervalo permitido, no OHS quântico, ela é quantizada, ou seja, restrita a valores específicos, determinados pela equação:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega \quad (1.21)$$

no qual E_n é a energia do nível n (com $n=1, 2, 3, \dots$), \hbar é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$) e ω é a frequência angular da radiação do sistema. Assim, a energia do OHS quântico para diferentes níveis é dada por:

$$E_1 = 1,5\hbar\omega \text{ para 1 quantum}$$

$$E_2 = 2,5\hbar\omega \text{ para 2 quantum}$$

$$E_3 = 3,5\hbar\omega \text{ para 3 quantum}$$

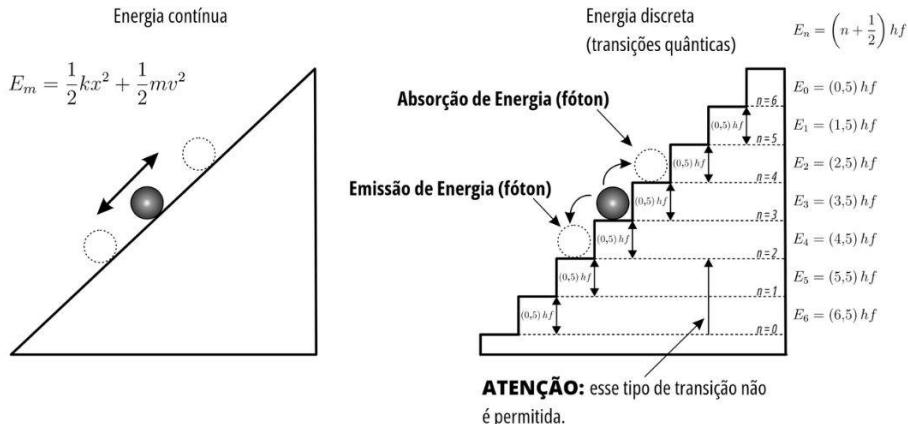
...

Na Física Clássica, um oscilador pode assumir qualquer valor de energia, como se deslizasse suavemente sobre uma rampa inclinada (Figura 1.13a). No entanto, no regime quântico, essa liberdade desaparece, e a energia só pode assumir valores discretos.

A partícula pode mudar de nível energético ao absorver ou emitir um fóton, mas nem todas as transições são permitidas. Apenas transições entre níveis consecutivos ($\Delta n=1$) ocorrem espontaneamente, enquanto saltos maiores, como de $n=0$ para $n=2$, são proibidos (Figura 1.13b).

Essa quantização da energia reflete a natureza discreta das transições quânticas em sistemas microscópicos e estabelece regras rigorosas para a interação da matéria com a radiação. A Figura 1.13 ilustra esse conceito, comparando a liberdade contínua do oscilador clássico com a estrutura quantizada do oscilador harmônico quântico.

Figura 1.13 - Comparação entre o Oscilador Harmônico Simples Clássico e Quântico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 1.13a - O diagrama representa um sistema clássico onde a energia é contínua. A bola pode se mover suavemente ao longo de um plano inclinado, com sua energia mecânica dada pela soma da energia potencial elástica e da energia cinética. Podendo assumir qualquer valor de energia dentro do intervalo permitido

Figura 1.13b - O diagrama escalonado representa a quantização da energia em sistemas quânticos, como um oscilador harmônico quântico. Aqui, a energia só pode assumir valores discretos. A bola pode mudar entre níveis de energia, ou seja, só pode mudar de nível ao absorver/emitar energia.

Mesmo quando $n=0$, o oscilador mantém uma energia mínima, definida por:

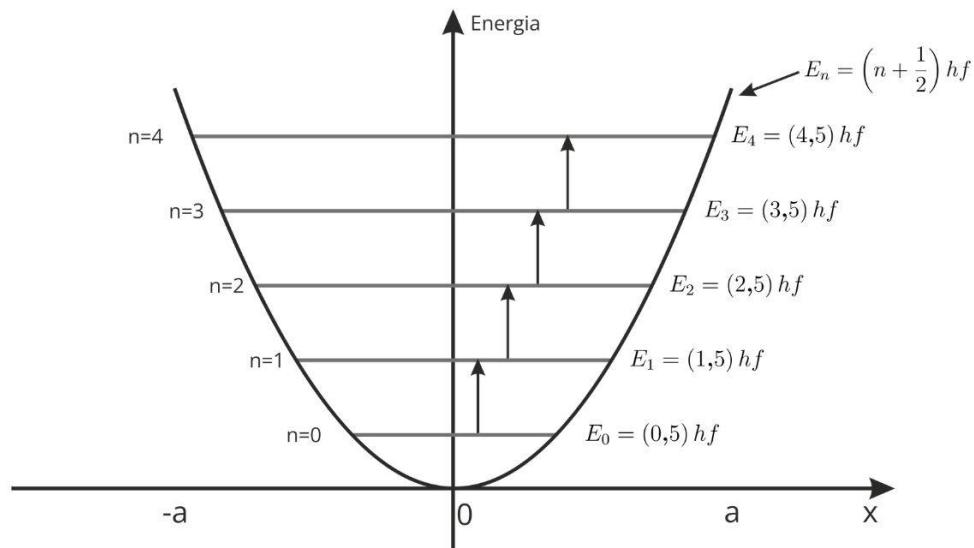
$$E_0 = \frac{1}{2} \hbar\omega \quad (1.22)$$

Essa energia de ponto zero evidencia que o sistema jamais se encontra em repouso absoluto. Essa característica decorre do Princípio da Incerteza de Heisenberg, que impede a total imobilidade da partícula e garante a existência de flutuações quânticas, mesmo na ausência de qualquer excitação externa. Voltaremos a esse conceito em detalhes no Capítulo 3.

Representação Gráfica da Energia do OHS Quântico

A representação gráfica dos níveis de energia do OHS quântico pode ser visualizada na Gráfico 1.2.

Figura 1.2 - Energia do OHS quântico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

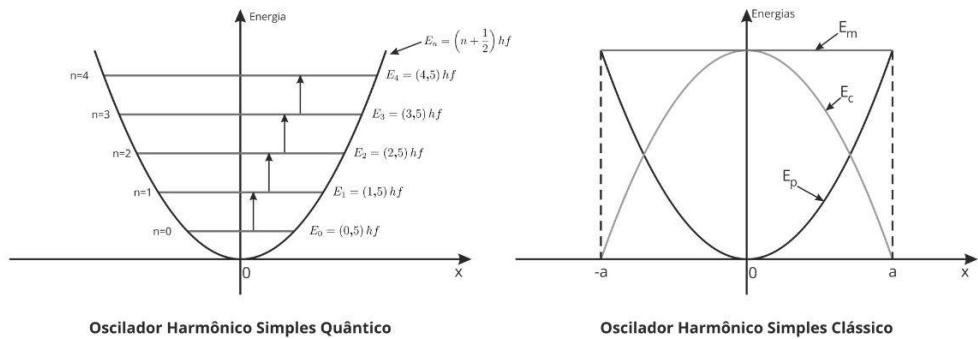
Além disso, a Figura 1.14 compara diretamente os modelos clássico e quântico do oscilador harmônico simples.

No modelo clássico (direita), a partícula oscila continuamente entre os pontos de retorno $-A$ e A , onde sua energia total (E_m) é a soma da energia cinética e da energia potencial. A trajetória da partícula é representada pela parábola da energia potencial, dentro da qual sua posição pode variar de maneira contínua.

No modelo quântico (esquerda), a energia do oscilador não pode assumir valores arbitrários, mas sim valores discretos dados pela equação (1.21). Esses níveis quantizados são representados por linhas horizontais, indicando que a partícula pode ocupar apenas esses estados discretos. As transições entre esses níveis ocorrem por absorção ou emissão de fôtons, um fenômeno essencial para a mecânica quântica e para processos como a espectroscopia molecular e o funcionamento de lasers.



Figura 1.14 - Comparação entre o Oscilador Harmônico Simples Clássico e Quântico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A compreensão do Oscilador Harmônico Simples Quântico (OHSQ) nos fornece uma base essencial para o estudo de fenômenos mais complexos na Física. No entanto, as oscilações e quantizações discutidas até aqui não estão restritas a sistemas individuais. No Capítulo 2, exploraremos como as oscilações individuais se conectam para formar ondas mecânicas e eletromagnéticas, conceitos esses que nos permitirão entender a natureza ondulatória dos fenômenos quânticos.

Exercícios Propostos

- O sistema massa-mola, conforme abordado no capítulo, exemplifica o Movimento Harmônico Simples (MHS). Nesse sistema, um bloco de massa m preso a uma mola com constante elástica k oscila em torno de uma posição de equilíbrio. A relação que determina o período T dessa oscilação é dada por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Essa fórmula indica que o período é diretamente proporcional à raiz quadrada da massa e inversamente proporcional à raiz quadrada da constante elástica. Assim, para uma mesma mola, aumentar a massa resulta em um período maior, enquanto aumentar a rigidez da mola (valor de k) diminui o período.

Considerando um sistema massa-mola descrito pelo texto-base, onde a massa do bloco é de 0,5 kg e a constante elástica da mola é 200 N/m, qual é o período de oscilação do sistema?

- A) 0,14 s
- B) 0,31 s
- C) 0,70 s
- D) 1,57 s
- E) 3,14 s

2. No sistema massa-mola, a energia potencial elástica máxima armazenada quando o sistema atinge sua amplitude de oscilação é dada pela fórmula:

$$E_p = \frac{1}{2}ka^2$$

onde k é a constante elástica da mola e a é a amplitude da oscilação. Essa energia representa a capacidade de realizar trabalho e é máxima nos pontos de repouso do sistema, quando a velocidade do bloco é nula.

Considere um sistema massa-mola em que a constante elástica é de 150 N/m e a amplitude da oscilação é 0,2m. Qual é a energia potencial elástica máxima armazenada no sistema?

- A) 3J
- B) 2J
- C) 0,5J
- D) 1,5J
- E) 6J

3. No regime quântico, um oscilador harmônico simples possui energia quantizada, dada pela fórmula:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega$$

- $n = 0, 1, 2, \dots$ é o número quântico (nível);
- \hbar é a constante de Planck reduzida ($\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} Js$);
- ω é a frequência angular, relacionada à frequência f por $\omega = 2\pi f$.

Dessa forma, mesmo no estado fundamental ($n=0$), o sistema possui uma energia mínima, denominada energia de ponto zero, dada por:

$$E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$$

Considere um oscilador harmônico simples quântico cuja frequência $f=5,0 \times 10^{14}$ Hz. Qual é a energia de ponto zero desse oscilador?

- A) $3,31 \times 10^{-19} J$
- B) $1,66 \times 10^{-20} J$
- C) $1,66 \times 10^{-19} J$
- D) $3,31 \times 10^{-20} J$
- E) $1,66 \times 10^{-21} J$



4. No oscilador harmônico quântico, os níveis de energia são expressos por

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)hf$$

onde $n = 0, 1, 2$, e h é a constante de Planck. A diferença de energia entre dois níveis adjacentes é dada por

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)hf$$

Essa relação mostra que o incremento de energia entre níveis é constante e igual a hf , independentemente do nível considerado.

Considere um oscilador harmônico quântico cuja frequência é $f=4,0\times10^{14}\text{Hz}$ Com base no texto-base, qual é a diferença de energia entre os níveis $n=1$ e $n=2$?

- A) $1,33\times10^{-19}\text{J}$
- B) $1,33\times10^{-20}\text{J}$
- C) $3,32\times10^{-19}\text{J}$
- D) $2,65\times10^{-19}\text{J}$
- E) $2,65\times10^{-20}\text{J}$



Capítulo 2 Ondas e Campos

Desde a luz do Sol até os sons que ouvimos, as ondas estão presentes e em constante interação com o mundo. Elas podem se propagar pelo ar, pela água, pelo espaço e até mesmo por materiais sólidos, transportando energia e informação. O estudo das ondas é essencial para compreender desde fenômenos naturais até avanços tecnológicos, como telecomunicações, exames médicos e novas descobertas na Física.

As ondas podem ser classificadas em **mecânicas** e **eletromagnéticas**. Enquanto as ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagar, as ondas eletromagnéticas podem viajar até mesmo pelo vácuo. No entanto, a descoberta da dualidade onda-partícula na Mecânica Quântica nos mostrou que partículas subatômicas, como elétrons e prótons, também exibem comportamento ondulatório, levando ao conceito de **ondas de matéria**, descrito pelo físico teórico Louis de Broglie.

Neste capítulo, exploraremos as **ondas eletromagnéticas**, desde a formulação clássica até a abordagem quântica, além das **ondas mecânicas e seus diferentes tipos**. Por fim, analisaremos como a energia é transportada pelas ondas e suas aplicações em diversas áreas da ciência e da tecnologia.

Ao longo deste capítulo, exploramos como diferentes tipos de ondas se propagam e interagem com o ambiente, transportando energia e informação. No entanto, quando analisamos fenômenos em escalas subatômicas, as leis da Física Clássica já não são suficientes para descrever a realidade. No próximo capítulo, investigaremos como a Mecânica Quântica desafia nossa intuição, mostrando que até mesmo o vácuo, que antes era considerado um espaço completamente vazio, é repleto de fenômenos inesperados.

2.1 Ondas Eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são responsáveis por muitos fenômenos essenciais do nosso dia a dia, desde a luz que enxergamos até as tecnologias que utilizamos para nos conectar como o rádio, Wi-Fi e redes móveis. Sem essas ondas, não teríamos transmissões de TV, comunicação via satélite nem exames médicos como o raio X.

As ondas eletromagnéticas são perturbações que se propagam no espaço a partir do resultado das variações do campo elétrico e do campo magnético, essa variação de ambos os campos dá origem ao outro campo respectivos gerando uma perturbação autossustentável. A Figura 2.1 mostra a propagação da onda eletromagnética formada pelos campos elétrico e magnético perpendiculares entre si. A propagação da onda também é perpendicular aos campos que a formam.

A velocidade de propagação no vácuo das ondas eletromagnéticas é de 300.000 km/s. Essa velocidade depende das propriedades elétricas e magnéticas do meio. A velocidade dessa onda pode ser obtida através da equação:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.1)$$

No qual ϵ e μ são as constantes de permissividade elétrica e permeabilidade magnética, respectivamente.

No vácuo, a velocidade da onda eletromagnética é dada pela equação:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \quad (2.2)$$

No qual ϵ_0 e μ_0 são as constantes de permissividade elétrica no vácuo e permeabilidade magnética no vácuo, respectivamente. Repare que quando tratamos da velocidade da onda eletromagnética no vácuo ou da luz no vácuo, a representamos pela letra c , que deriva-se da palavra do latim *celeritas* ou ligeireza.

As ondas eletromagnéticas transportam energia através da oscilação conjunta dos campos elétrico e magnético, propagando-se inclusive no vácuo. Diferentemente das ondas mecânicas, que precisam de um meio material para se deslocar, as ondas eletromagnéticas podem viajar pelo espaço sem necessidade de um meio físico, permitindo, por exemplo, que a luz do Sol chegue à Terra. Elas são formadas quando uma carga elétrica em movimento oscilatório, gerando variações no campo elétrico que, por sua vez, induzem variações no campo magnético, criando uma relação de dependência mútua entre os dois campos.



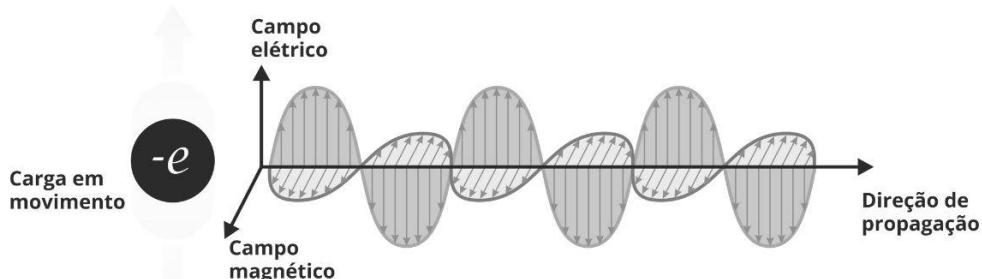
Essas ondas não necessitam de um meio material para se deslocar, pois sua propagação é sustentada pela interação entre os campos. As ondas eletromagnéticas abrangem uma ampla faixa de frequências e comprimentos de onda que compõem o espectro eletromagnético, o qual inclui ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama, cada uma com características e aplicações distintas.

Campo Eletromagnético Clássico

O **campo eletromagnético** é uma região do espaço onde cargas elétricas em movimento exercem influência umas sobre as outras. Esse campo é descrito pela teoria clássica do eletromagnetismo, formulada por **James Clerk Maxwell**, que mostrou que mudanças em campos elétrico e magnético podem se propagar pelo espaço na forma de **ondas eletromagnéticas**.

Essas ondas são geradas sempre que **cargas elétricas aceleram ou oscilam** (Figura 2.1). Um exemplo comum são as **ondas de rádio**, utilizadas em **transmissões AM e FM**. Em uma antena transmissora, cargas elétricas oscilam em alta frequência, gerando ondas eletromagnéticas que se propagam e podem ser captadas por antenas receptoras. A frequência dessas ondas é a mesma frequência com que as cargas oscilam na antena transmissora.

Figura 2.1 - Campo eletromagnético gerado devido a oscilação de um elétron.

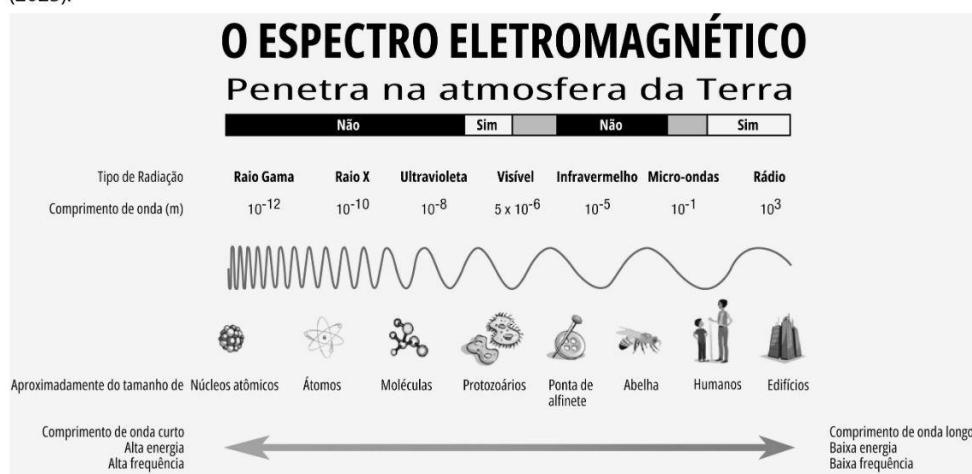


Fonte: Elaborado pelo autor.

As **ondas eletromagnéticas** não precisam de um meio material para se propagar, ao contrário das **ondas sonoras**, que necessitam do ar ou de outro meio. Isso permite que a radiação eletromagnética viaje pelo vácuo, como ocorre com a **luz do Sol que chega até a Terra**.

Além das ondas de rádio, há outros tipos de ondas eletromagnéticas, organizadas no chamado espectro eletromagnético (Figura 2.2). Ondas com menor frequência e maior comprimento de onda, como as ondas de rádio e micro-ondas, são usadas em comunicações e tecnologia. Já ondas com maior frequência e menor comprimento de onda, como os raios X e raios gama, possuem maior energia e são utilizadas em exames médicos e tratamentos.

Figura 2.2 - Espectro eletromagnético e sua interação com a atmosfera terrestre, adaptado de NASA (2025).



Fonte: NASA (Imagem adaptada para o português).

Os **raios X**, por exemplo, podem ser produzidos quando **elétrons em alta velocidade colidem com um alvo metálico**. Esse fenômeno gera um tipo de radiação chamada **bremssstrahlung**, ou “radiação de freamento”, pois a energia dos elétrons é dissipada ao serem desacelerados rapidamente. Além disso, os raios X também podem ser gerados quando **elétrons dentro dos átomos mudam de nível de energia**, liberando quantidades específicas de energia na forma de luz invisível para os olhos humanos.

Outro exemplo importante de radiação eletromagnética é a **radiação síncrotron**, que ocorre quando partículas carregadas, como elétrons e pósitrons, são aceleradas em trajetórias circulares dentro de campos magnéticos muito intensos. Esse movimento acelerado faz com que elas emitam ondas eletromagnéticas de alta energia. Nos laboratórios, essa radiação é utilizada para análise de materiais, exames médicos e estudos avançados em Física e Química.

Por fim, há também a **radiação térmica**, que ocorre quando um objeto aquece e emite ondas eletromagnéticas. Esse é o caso da **radiação de corpo negro**, que descreve a luz e o calor emitidos por objetos quentes, como o ferro incandescente, quando aquecido a altas temperaturas emitindo um brilho avermelhado ou alaranjado devido à excitação térmica de seus átomos ou a superfície do Sol.

O estudo do campo eletromagnético clássico nos permite compreender fenômenos essenciais do nosso cotidiano. No entanto, ao analisarmos a luz em escalas muito pequenas, percebemos que ela não se comporta apenas como uma onda contínua, mas também como partículas discretas de energia chamadas fótons. Essa descoberta levou à formulação do campo eletromagnético quântico, um dos pilares da Mecânica Quântica.

Campo Eletromagnético Quântico

No modelo quântico do eletromagnetismo, a luz e outras ondas eletromagnéticas não são contínuas, mas compostas por pequenos pacotes discretos de energia chamados fótons. Assim como no Oscilador Harmônico Simples Quântico (OHS quântico), no qual a energia aparece em valores bem definidos, uma onda eletromagnética também pode ser descrita como um conjunto de fótons, cada um transportando uma quantidade específica de energia, determinada pela equação:

$$E_{ny} = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega \quad (2.3)$$

Onde n_y é o número de fótons e E_{ny} é a energia total associada à onda eletromagnética.

De forma análoga ao que ocorre no OHS quântico, a remoção de fótons da onda eletromagnética resulta na diminuição de sua energia. Quando todos os fótons são removidos, a onda deixa de existir, restando apenas a energia de ponto zero do campo eletromagnético, equivalente a $0,5\hbar f$, como no Capítulo 1 sobre o OHS quântico.

2.2 Ondas Mecânicas

O conceito de onda está amplamente presente em nosso cotidiano, como no movimento das águas de um lago após o impacto de uma pedra, no som produzido por uma corda de violão vibrando ou nos sinais que possibilitam o funcionamento de dispositivos de comunicação como o rádio. No entanto, as ondas vão além desses fenômenos citados, elas constituem um dos pilares fundamentais da Física clássica e contemporânea, permeando desde a mecânica clássica que estuda o movimento dos corpos e as forças que atuam sobre ele até a mecânica quântica, onde desempenham um papel essencial na descrição do comportamento da e sua energia em escala microscópica.



As ondas podem ser classificadas em três categorias principais: **mecânicas**, **eletromagnéticas** e de **matéria**. As **ondas mecânicas**, como o som e as ondas na água, precisam de um meio material para se propagar, pois dependem da interação entre as partículas do meio. Já as **ondas eletromagnéticas**, como a luz e as ondas de rádio, podem viajar no vácuo, pois são sustentadas pela interação entre campos elétrico e magnético, como vimos na seção *Campo Eletromagnético Clássico*.

Além dessas, existe um terceiro tipo, as **ondas de matéria**, um conceito que surge na Mecânica Quântica. Diferente das ondas mecânicas e eletromagnéticas, que transportam energia, as ondas de matéria descrevem o comportamento ondulatório de partículas microscópicas, como elétrons e prótons. Esse fenômeno, conhecido como **dualidade onda-partícula**, é fundamental para o entendimento do mundo quântico. Embora esse tipo de onda não seja abordado detalhadamente neste capítulo, ele desempenha um papel essencial em áreas como a Física Moderna e a tecnologia dos microscópios eletrônicos. Se quiser saber mais, vale pesquisar sobre a experiência da dupla fenda e a equação de Schrödinger.

Uma onda mecânica pode ser definida como uma perturbação que se propaga através de um meio material, denominado meio de propagação. Esse tipo de onda ocorre exclusivamente em meios materiais,

Uma onda mecânica pode ser definida como uma perturbação que se propaga através de um meio material, denominado meio de propagação. Esse tipo de onda ocorre exclusivamente em meios materiais, uma vez que sua propagação depende da interação entre as partículas que constituem o meio. Por consequência, ondas mecânicas não se propagam no vácuo. Durante a propagação, as partículas do meio sofrem deslocamentos cuja natureza varia conforme o tipo de onda. Esse processo de transmissão de energia ocorre devido a duas propriedades fundamentais do meio: a **inércia**, que determina a resistência das partículas a mudanças em seu estado de movimento, e a **elasticidade**, que permite a restauração das posições originais das partículas após a passagem da onda.

O **meio de propagação** é o material ou ambiente, como sólido, líquido ou gasoso. Ele é formado por partículas que transmitem energia através de interações, sendo essencial para que esse tipo de onda se desloque, já que ela não pode ocorrer no vácuo.

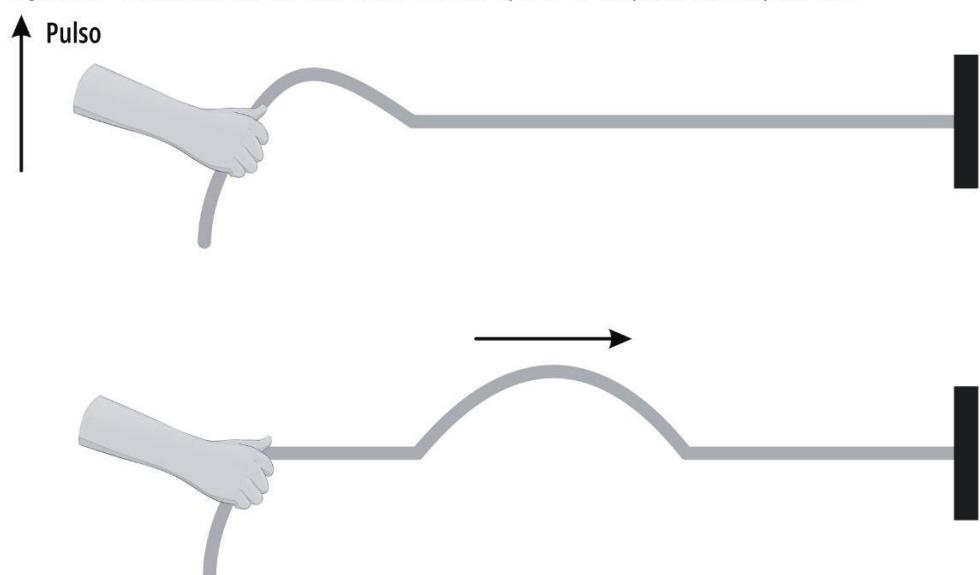
Um **meio elástico** é aquele que pode se deformar ao sofrer uma força e retornar à sua forma original, permitindo a propagação de ondas mecânicas.

Assim como ocorre com qualquer tipo de onda, incluindo as ondas eletromagnéticas, que serão abordadas posteriormente, as ondas mecânicas não transportam matéria ao longo de sua propagação. O que é transferido, de fato, é a energia e a quantidade de movimento, que se propagam por meio da interação entre as partículas do meio material. Esse mecanismo garante a transmissão da perturbação sem que haja deslocamento permanente do meio.



De todas as ondas mecânicas possíveis, talvez as mais simples sejam aquelas transmitidas de uma corda esticada. A Figura 2-3 ilustra esse fenômeno, na qual uma onda em uma corda a partir da geração de um pulso na direção vertical para cima. Esse pulso inicial cria uma perturbação que se desloca ao longo da corda, caracterizando uma onda mecânica transversal. Durante a propagação, as partículas do meio (a corda) oscilam perpendicularmente à direção de deslocamento da onda, evidenciando a natureza transversal do movimento ondulatório.

Figura 2.3 - Onda formada em uma corda esticada a partir de um pulso vertical para cima.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No exemplo apresentado, a perturbação na corda gera uma onda mecânica do tipo transversal, pois as partículas do meio oscilam perpendicularmente à direção de propagação da onda. Esse tipo de comportamento é característico de diversas ondas mecânicas, incluindo as ondas em superfícies líquidas. No entanto, nem todas as ondas mecânicas possuem essa característica. A seguir, serão abordados os dois principais tipos de ondas mecânicas: as ondas transversais, como a observada na corda, e as ondas longitudinais, nas quais a vibração das partículas ocorre na mesma direção da propagação da onda.

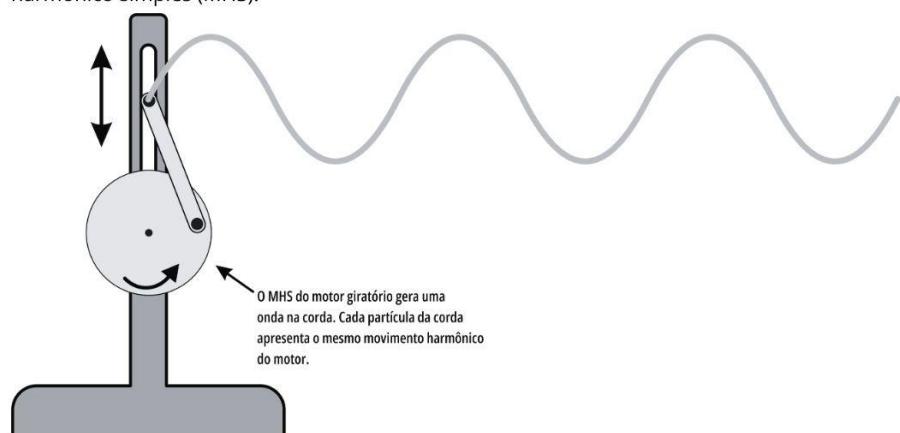
Ondas transversais

Ondas transversais são aquelas em que a oscilação das partículas ocorre perpendicularmente à direção de propagação da onda. Essa característica distingue esse tipo de onda dentro das ondas mecânicas e tem implicações diretas na forma como a energia e o momento são transferidos pelo meio.



Um exemplo de onda transversal pode ser observado em uma corda submetida a uma oscilação periódica em uma de suas extremidades. A figura 2-4 ilustra um experimento no qual um motor giratório gera uma onda transversal em uma corda. O movimento harmônico simples (MHS) do motor induz oscilações na extremidade da corda, resultando na propagação de uma onda senoidal ao longo de seu comprimento. Cada ponto da corda executa um movimento periódico perpendicular à direção de propagação da onda, evidenciando a transmissão de energia sem transporte de matéria, característica fundamental das ondas mecânicas transversais.

Figura 2.4 - Geração de uma onda transversal em uma corda por um motor em movimento harmônico simples (MHS).



Fonte: Elaborado pelo autor.

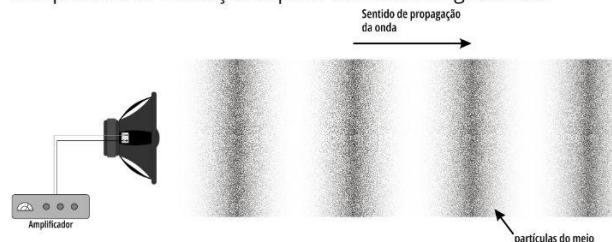
Podemos destacar algumas características inerentes às ondas na figura 2-4, entre elas as cristas e os vales, que dizem respeito ao formato da onda. As cristas correspondem aos pontos de máxima elevação, enquanto os vales são os pontos de máxima depressão. Além disso, observa-se uma grandeza fundamental associada a essas características: o comprimento de onda (λ), definido como a distância entre duas cristas consecutivas ou entre dois ventres consecutivos. O comprimento de onda pode ser interpretado como a medida de uma oscilação completa.

Ondas longitudinais

Ondas longitudinais são aquelas em que a oscilação das partículas do meio ocorre na mesma direção da propagação da onda. Esse tipo de onda é característico de fenômenos como o som, onde as variações de pressão se deslocam através do ar ou de outro meio material.

A Figura 2-5 ilustra o exemplo de um alto-falante conectado a um amplificador que gera uma onda sonora, que se propaga por meio de compressões das partículas do ar. Essa configuração mostra como a energia e o momento são transferidos sem transporte efetivo da matéria, sendo um exemplo clássico de onda mecânica longitudinal.

Figura 2.5 - Propagação de uma onda sonora, ilustrando compressões e rarefações típicas de ondas longitudinais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante de destacar que, assim como as ondas transversais, as ondas longitudinais, apresentam características próprias, como os pontos de compressão e rarefação da onda. A distância entre duas compressões ou entre duas rarefações consecutivas também é denominado de comprimento de onda.

Ondas mistas

As partículas na superfície de líquidos, ao serem perturbadas, descrevem trajetórias elípticas, combinando movimentos transversais e longitudinais. Conforme a profundidade aumenta, a amplitude dessas oscilações diminui, tornando-se desprezível em camadas mais profundas. Esse comportamento é característico de ondas mistas, onde as partículas do meio oscilam simultaneamente nas direções perpendicular e paralela à propagação da onda.

A Figura 2.6 mostra um barquinho de papel na superfície de uma lagoa. Com a passagem da onda gerada por uma perturbação na água, o barquinho descreve um movimento elíptico (as setas indicam a direção e sentido do movimento do barquinho de papel com a passagem da onda), pois essas ondas são constituídas simultaneamente por componentes transversais e longitudinais.

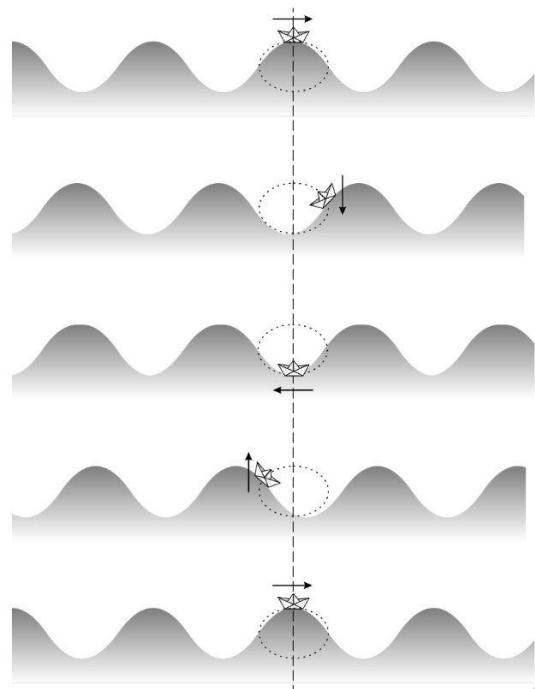


Figura 2.6 - Movimento elíptico de um barquinho de papel devido à passagem de uma onda na superfície da água.

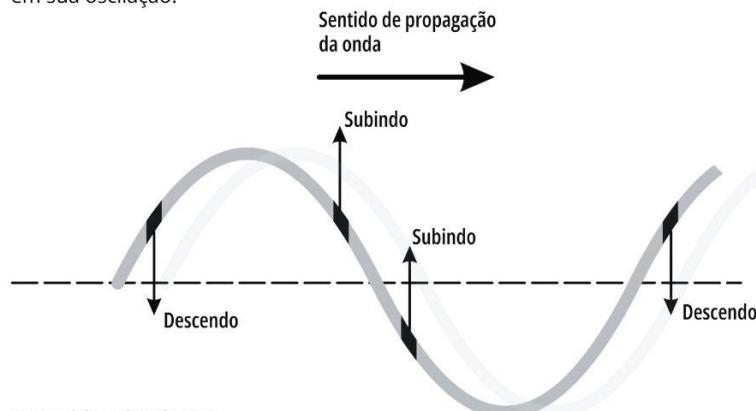
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Energia das ondas

A energia transportada por uma onda depende de suas propriedades, como a amplitude e a frequência. Em ondas mecânicas, como as do mar ou do som, a energia está principalmente associada à amplitude da onda. Já em ondas eletromagnéticas, a energia depende diretamente da frequência da onda. Quanto maior a frequência, maior a energia transportada por cada fóton. Esse princípio explica por que os raios X e os raios gama, que possuem frequências muito altas, são tão energéticos e podem atravessar tecidos humanos.

Mas como a energia é transferida ao longo de uma onda? Para responder a essa pergunta, retomemos o exemplo de uma onda transversal em uma corda, observe a Figura 2-7.

Figura 2.7 - Representação de uma onda periódica, destacando o sentido de propagação e as regiões onde a partícula do meio está subindo ou descendo em sua oscilação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando você sacode uma extremidade de uma corda, o movimento inicial gera uma vibração que é passada de uma parte da corda para a outra. Essa propagação acontece porque cada porção do material, ao oscilar, influencia a porção vizinha, “transferindo” energia de uma extremidade para outra. Durante esse processo, as partículas da corda não se deslocam junto com a onda, mas oscilam para cima e para baixo em torno de sua posição de equilíbrio, enquanto a energia avança. Essa energia, que é mecânica, apresenta-se sob a forma de energia cinética e parte sob a forma de energia potencial elástica.

Esse mesmo princípio pode ser observado em outros tipos de ondas, como as sonoras, nas quais as compressões e expansões do ar transferem energia através de mudanças de pressão, e em ondas na água, onde as moléculas oscilam verticalmente enquanto a onda se propaga horizontalmente.

Assim, podemos entender que as ondas transferem energia de uma região para outra sem transportar matéria, o que as torna um mecanismo essencial em diversos fenômenos naturais e tecnológicos.

Ao longo deste capítulo, exploramos como diferentes tipos de ondas se propagam e interagem com o ambiente, transportando energia e informação. No entanto, quando analisamos fenômenos em escalas subatômicas, as leis da Física Clássica já não são suficientes para descrever a realidade. No próximo capítulo, investigaremos como a Mecânica Quântica desafia nossa intuição, mostrando que até mesmo o vácuo, que antes era considerado um espaço completamente vazio, é repleto de fenômenos inesperados.

Exercícios Propostos

- O campo eletromagnético clássico é descrito pelas equações de Maxwell, que demonstram a interdependência dos campos elétrico e magnético. Segundo esse modelo, uma variação no campo elétrico induz uma variação no campo magnético, e vice-versa, permitindo a propagação de ondas eletromagnéticas mesmo no vácuo, onde elas se movem à velocidade da luz, aproximadamente $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$. Essa propriedade destaca a natureza não-dependente de meio material das ondas eletromagnéticas, diferindo das ondas mecânicas.

Assinale a alternativa que melhor descreve uma característica do campo eletromagnético clássico, conforme o texto-base.

- A) ...ele necessita de um meio material para a propagação de suas oscilações.
- B) ...suas oscilações ocorrem de forma independente, sem que um campo influencie o outro.
- C) ...as variações nos campos elétrico e magnético são interdependentes, permitindo a propagação de ondas eletromagnéticas no vácuo à velocidade da luz.
- D) ...a velocidade de propagação das ondas depende exclusivamente das propriedades do meio em que se encontram.
- E) ...o campo eletromagnético clássico não transporta energia, apenas informação.

- No modelo quântico do eletromagnetismo, a luz é entendida como composta por partículas discretas denominadas fótons, cuja energia é definida pela relação $E=hf$, onde h é a constante de Planck e f é a frequência da onda. Essa abordagem evidencia que a energia do campo eletromagnético é quantizada, ou seja, pode assumir apenas valores múltiplos inteiros do valor hf , ao contrário do modelo clássico que trata a energia como uma grandeza contínua.
No modelo quântico do eletromagnetismo, a energia do campo é quantizada porque
 - A) ...cada fóton possui energia determinada por $E=hf$, fazendo com que a emissão e absorção ocorram em quantidades discretas.
 - B) ...a energia do campo é contínua e varia de acordo com o meio em que se propaga.

- C) ...a luz é composta por ondas contínuas que não se dividem em unidades mínimas.
- D) ...os fótons podem assumir qualquer valor de energia, sem restrições quanto à quantização.
- E) ...o campo quântico ignora a emissão e absorção de fótons na propagação da luz.
- 3.** Em ondas transversais, as partículas do meio se movem em uma direção que é perpendicular à direção de propagação da onda. Esse comportamento pode ser observado, por exemplo, em uma corda vibrante: ao gerar um pulso na extremidade da corda, a onda se propaga horizontalmente, enquanto cada partícula da corda oscila verticalmente.
De acordo com o texto-base, qual é a direção do movimento das partículas em uma onda transversal?
- A) Elas se movem na mesma direção da propagação da onda.
- B) Elas se movem de forma oblíqua em relação à direção da propagação.
- C) Elas se movem perpendicularmente à direção da propagação.
- D) Elas se movem de forma aleatória, sem relação com a direção da propagação.
- E) Elas se movem circularmente em torno da posição de equilíbrio.
- 4.** Em ondas longitudinais, as partículas do meio vibram na mesma direção em que a onda se propaga. Esse movimento gera regiões alternadas de compressão (onde as partículas se aproximam) e de rarefação (onde elas se separam). Esse comportamento é o que permite a transmissão do som, já que as variações na pressão do ar resultam na percepção sonora.
Com base no texto-base, qual das alternativas descreve corretamente como as partículas se movem em uma onda sonora (onda longitudinal)?
- A) Elas oscilam perpendicularmente à direção de propagação, formando cristas e vales.
- B) Elas vibram paralelamente à direção de propagação, gerando regiões de compressão e rarefação.
- C) Elas permanecem estáticas enquanto a energia se propaga por meio de variações de pressão.
- D) Elas se movem aleatoriamente, sem apresentar um padrão de compressões e rarefações.
- E) Elas descrevem movimentos circulares que não alteram a densidade do meio.



5. Em ondas mistas, as partículas do meio descrevem trajetórias elípticas que combinam movimentos transversais (perpendiculares à direção de propagação) e longitudinais (paralelos à direção de propagação). Observa-se, por exemplo, na superfície de um líquido, que tais trajetórias evidenciam uma componente longitudinal que diminui com o aumento da profundidade, fazendo com que, em regiões mais profundas, o movimento das partículas se torne predominantemente transversal.

Um pesquisador realiza um experimento para analisar o comportamento das partículas em ondas mistas na superfície e em regiões mais profundas de um reservatório. Com base no texto-base, qual das hipóteses a seguir melhor explica a mudança observada nas trajetórias das partículas com o aumento da profundidade?

- A) O aumento da pressão em profundidade intensifica a componente longitudinal, mantendo as trajetórias elípticas.
- B) Em profundidades maiores, o efeito gravitacional anula completamente o movimento longitudinal, fazendo com que as partículas se movam somente horizontalmente.
- C) A densidade do líquido aumenta em profundidade, o que amplifica tanto os movimentos transversal quanto longitudinal, mantendo a elipse inalterada.
- D) A dissipação da energia longitudinal com o aumento da profundidade reduz a componente paralela à propagação, fazendo com que as trajetórias se tornem predominantemente transversais (verticais).
- E) Em regiões mais profundas, o aumento da pressão promove oscilações aleatórias que desorganizam as trajetórias, eliminando o padrão elíptico

6. Em ondas mecânicas, a energia transportada é a soma das energias cinética e potencial e, geralmente, é proporcional ao quadrado da amplitude da onda. Assim, se a amplitude de uma onda é duplicada, a energia transportada aumenta em quatro vezes. Por outro lado, em ondas eletromagnéticas, cada fóton possui energia determinada pela equação

$$E = hf$$

onde h é a constante de Planck e f é a frequência da onda. Isso implica que, ao dobrar a frequência, a energia de cada fóton é duplicada.

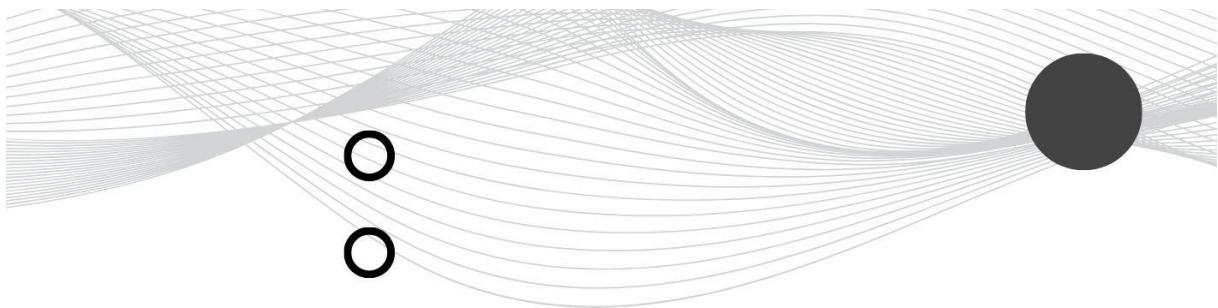
Considere dois experimentos:

- No Experimento A, uma onda mecânica apresenta uma amplitude A .
- No Experimento B, uma onda eletromagnética é constituída por fôtons de frequência f .



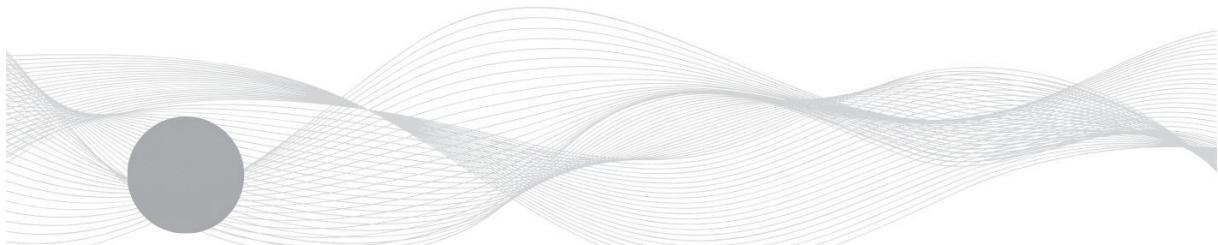
ESe, no Experimento A, a amplitude da onda for duplicada e, no Experimento B, a frequênciados fótons for dobrada, qual alternativa corretamente descreve o fator pelo qual a energia transportada na onda mecânica aumenta e o fator pelo qual a energia de cada fóton aumenta, respectivamente?

- A) A energia mecânica aumenta 2 vezes; a energia de cada fóton aumenta 2 vezes.
- B) A energia mecânica aumenta 4 vezes; a energia de cada fóton aumenta 2 vezes.
- C) A energia mecânica aumenta 2 vezes; a energia de cada fóton aumenta 4 vezes.
- D) A energia mecânica aumenta 4 vezes; a energia de cada fóton aumenta 4 vezes.
- E) A energia mecânica aumenta 8 vezes; a energia de cada fóton aumenta 2 vezes.



Capítulo 3

Flutuações Quânticas do Vácuo



O que é o vácuo? Será que o “nada” realmente existe? A ideia de um espaço completamente vazio foi, por muito tempo, aceita como um conceito fundamental da Física Clássica. No entanto, descobertas do século XX mostraram que o vácuo quântico não é um ambiente inerte, mas sim um campo dinâmico onde ocorrem fenômenos que desafiam nossa intuição. Neste capítulo, exploraremos como o Princípio da Incerteza de Heisenberg e as flutuações quânticas revelam que mesmo o “nada” está repleto de atividade microscópica.

Se você pudesse retirar toda a matéria de uma região do espaço, removendo cada átomo, cada partícula de poeira, até mesmo o ar, o que restaria? Possivelmente a primeira resposta seria “nada”, um espaço completamente vazio. Mas será que isso é realmente verdade? Por exemplo, quando sugamos líquido por um canudo, criamos uma região de baixa pressão e chamamos isso de vácuo. Mas, mesmo nesse ambiente, partículas invisíveis e campos quânticos podem estar ativos.

Por muito tempo, filósofos e cientistas acreditaram que o vácuo era exatamente isso, uma ausência total de matéria e energia. Esse conceito clássico de vácuo foi útil para a Física Clássica e ainda é empregado em diversas áreas da engenharia e tecnologia, como em experimentos que precisam de câmaras de vácuo para evitar interferências do ar.

Contudo, no início do século XX, cientistas como Werner Heisenberg e Paul Dirac revelaram que essa ideia estava errada. No mundo quântico, o vácuo não é um espaço completamente vazio, mas um campo dinâmico onde pares de partículas e antipartículas podem surgir espontaneamente por curtos períodos de tempo. Essa atividade incessante é uma consequência direta do Princípio da Incerteza de Heisenberg, que impede que a energia de um sistema seja perfeitamente determina-

da em um instante específico.

Por muito tempo, filósofos e cientistas acreditaram que o vácuo era exatamente isso, uma ausência total de matéria e energia. Esse conceito clássico de vácuo foi útil para a Física Clássica e ainda é empregado em diversas áreas da engenharia e tecnologia, como em experimentos que precisam de câmaras de vácuo para evitar interferências do ar.

Contudo, no início do século XX, cientistas como Werner Heisenberg e Paul Dirac revelaram que essa ideia estava errada. No mundo quântico, o vácuo não é um espaço completamente vazio, mas um campo dinâmico onde pares de partículas e antipartículas podem surgir espontaneamente por curtos períodos de tempo. Essa atividade incessante é uma consequência direta do Princípio da Incerteza de Heisenberg, que impede que a energia de um sistema seja perfeitamente determinada em um instante específico.

Esse novo conceito ficou conhecido como vácuo quântico, um estado onde ocorrem fenômenos intrigantes, como a criação e destruição de partículas por períodos incrivelmente curtos de tempo.

Neste capítulo, vamos explorar como a Física Quântica revolucionou nossa compreensão do vácuo, mostrando que ele não é tão vazio quanto imaginávamos.

3.1 O Princípio da Incerteza de Heisenberg

Imagine que você está tentando tirar uma foto de um carro em alta velocidade. Se a câmera tiver um tempo de exposição muito curto, a imagem sairá nítida (Figura 1a), mas você não terá ideia da velocidade do carro. Se, por outro lado, o tempo de exposição for longo (Figura 1b), a foto ficará borrosa, mas permitirá estimar a velocidade. Quanto mais precisamente você souber uma dessas informações, menos saberá sobre a outra.



Figura 3.1a - Foto de carros capturada por uma câmera com tempo de exposição curto.

Fonte: Designed by Freepik¹.

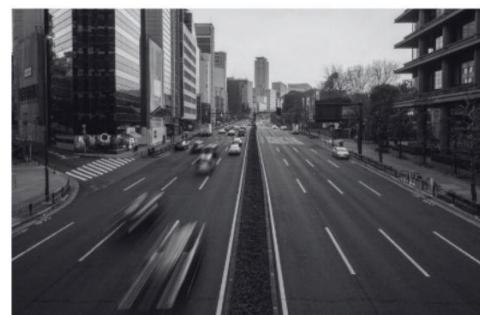


Figura 3.1b - Foto de carro capturada por uma câmera com tempo de exposição longo.
Fonte: Designed by Freepik¹.

¹ Fonte: www.freepik.com.

É como tentar saber a posição exata e a velocidade de uma bola durante um jogo de futebol, se você se concentrar em enxergar com exatidão onde a bola está em cada momento, torna-se mais difícil estimar sua velocidade média.

Essa ideia, conhecida como **Princípio da Incerteza** ou da Indeterminação, está no centro da Mecânica Quântica e foi formulada pelo físico Werner Heisenberg em 1927. Ele descobriu que, no mundo das partículas subatômicas, **não é possível medir simultaneamente com precisão infinita duas grandezas conjugadas, como posição e momento (quantidade de movimento)**. Isso significa que **a própria natureza impõe um limite fundamental à precisão de nossas medições**.

Matematicamente, o Princípio da Incerteza é expresso por:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (3.1)$$

No qual, Δx representa a incerteza da posição, Δp é a incerteza no momento (quantidade de movimento) e \hbar (lê-se h barra) é a constante de Planck reduzida ($\hbar=h/2=1,05 \times 10^{-34} \text{ Js}$).

A equação 3.1 nos diz que, se tentarmos determinar com precisão a posição de uma partícula, a incerteza em seu momento aumentará, e vice-versa. Essa não é uma limitação tecnológica ou de instrumentos de medição, é uma característica fundamental da natureza.

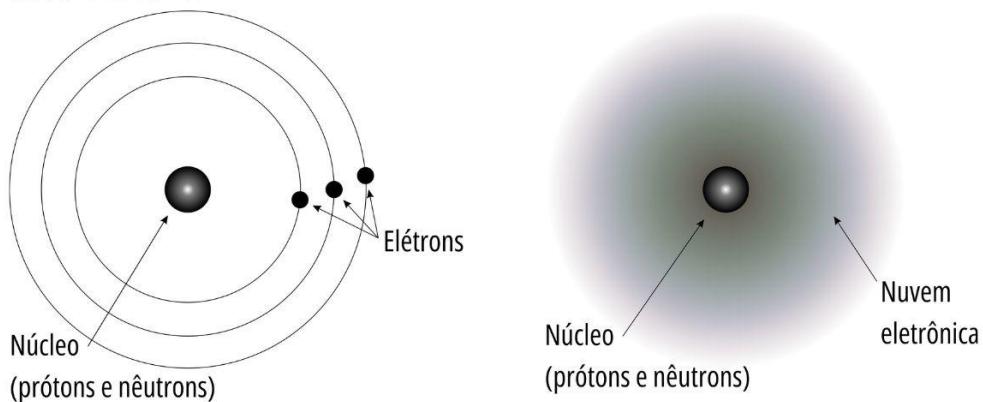
Incerteza na Natureza

A incerteza de Heisenberg não é apenas uma curiosidade matemática, mas uma característica fundamental da Mecânica Quântica, com consequências diretas para a forma como as partículas microscópicas interagem com o mundo. Diferentemente da Física Clássica, onde podemos prever com precisão a posição e a velocidade de um objeto, no mundo quântico existe um limite imposto pela própria natureza. Essa limitação tem impactos profundos na estrutura dos átomos, no comportamento das partículas subatômicas e até mesmo na energia do vácuo.

Uma das consequências mais notáveis dessa incerteza ocorre na estrutura do próprio átomo. Se não podemos conhecer simultaneamente a posição e o momento de uma partícula com precisão absoluta, como isso afeta os elétrons que orbitam o núcleo atômico? Essa limitação imposta pela natureza tornou insustentável a ideia de órbitas bem definidas como são descritas no modelo de Bohr, levando ao desenvolvimento do **Modelo Quântico de Schrödinger**.

Nesse novo modelo, os elétrons não seguem trajetórias fixas ao redor do núcleo, mas ocupam **regiões de probabilidade conhecidas como orbitais eletrônicos** (Figura 3.2). Essas regiões são chamadas de orbitais porque são soluções matemáticas das equações de Schrödinger, mas não são trajetórias circulares ou elípticas como as órbitas planetárias, e sim regiões onde a presença do elétron é mais provável. Isso acontece porque, segundo o **Princípio da Incerteza**, se tentarmos determinar com muita precisão a posição de um elétron, sua velocidade (ou momento) se tornará completamente indefinida. Como resultado, os elétrons não podem ser descritos por órbitas fixas, mas sim por **nuvens eletrônicas**, onde há uma maior ou menor probabilidade de encontrá-los em determinado local. Esse conceito é fundamental para a explicação da **estrutura atômica e da formação de ligações químicas**.

Figura 3.2 - Comparação visual entre o modelo de Bohr e o modelo quântico de Schrödinger para a estrutura do átomo.



À esquerda, o modelo de Bohr (1913) representa os elétrons orbitando o núcleo em trajetórias bem definidas, semelhantes a órbitas planetárias. Esse modelo foi uma evolução do modelo de Rutherford, introduzindo a quantização dos níveis de energia, mas ainda mantendo um conceito clássico de movimento orbital. À direita, o modelo quântico de Schrödinger (1926) substitui as órbitas fixas por distribuições de probabilidade chamadas orbitais eletrônicos. O núcleo é cercado por uma região nebulosa, que indica onde há maior probabilidade de encontrar um elétron em determinado instante. Essa representação reflete o Princípio da Incerteza de Heisenberg, que impede a determinação simultânea exata da posição e do momento do elétron.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da incerteza na posição e no momento de uma partícula, Heisenberg também mostrou que existe uma relação entre a energia e o tempo de medição. Esse princípio nos diz que, em escalas extremamente pequenas, a energia de um sistema pode variar espontaneamente por curtos períodos de tempo. Isso tem consequências profundas para o vácuo quântico, onde partículas e antipartículas podem surgir e desaparecer continuamente devido às flutuações quânticas.

A Relação entre Energia e Tempo

Além da incerteza na posição e no momento de uma partícula, Heisenberg também demonstrou que existe uma relação entre a energia de um sistema e o tempo durante o qual essa energia pode ser medida. Diferente da incerteza posição-momento, que afeta o comportamento das partículas, essa relação tem consequências profundas na forma como a energia pode se manifestar em escalas microscópicas.

Matematicamente, a incerteza entre energia e tempo é expressa por:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (3.2)$$

Essa equação estabelece um **limite fundamental** para a precisão com que a energia de um sistema pode ser medida em um determinado intervalo de tempo. Especificamente, **se a incerteza no tempo de medição de um sistema (Δt) for muito pequena, então a incerteza na medida de sua energia (ΔE) será grande**. Isso significa que, para sistemas onde a energia está bem definida (E pequeno), é necessário um tempo de medição maior. Em outras palavras, se tivermos um tempo t muito pequeno, a incerteza na energia E pode ser grande, permitindo a criação de partículas virtuais por instantes muito pequenos.

Exemplo: Se a incerteza no tempo (Δt) for da ordem de 10^{-25} s, a incerteza na energia (ΔE) será extremamente alta, permitindo a criação de partículas virtuais por intervalos muito curtos, sem violar a conservação de energia a longo prazo.

Até este ponto, exploramos como o **Princípio da Incerteza de Heisenberg** estabelece um limite fundamental para a precisão com que podemos medir certas grandezas físicas. No caso da relação energia-tempo, essa incerteza permite que, em escalas microscópicas, a energia de um sistema possa variar espontaneamente por intervalos de tempo extremamente curtos.

Essa variação temporária de energia tem consequências surpreendentes, como o que acontece no vácuo quântico, em que pares de partículas e antipartículas podem **surgir e desaparecer** continuamente, desde que o tempo de existência dessas partículas seja curto o suficiente para respeitar a incerteza energia-tempo. Essas partículas, conhecidas como **partículas virtuais**, não podem ser detectadas diretamente, mas seus efeitos são mensuráveis e desempenham um papel essencial em diversos fenômenos físicos.

Esse comportamento peculiar do vácuo, onde a energia nunca é exatamente zero e flutua constantemente, desafia a concepção clássica de vazio absoluto. Agora, exploraremos como essas **flutuações quânticas do vácuo** influenciam a estrutura do universo e dão origem a efeitos físicos mensuráveis.

Embora a relação energia-tempo estabeleça um limite fundamental para a variação espontânea de energia, essas flutuações não significam que estamos violando as leis da Física. Pelo contrário, elas ocorrem dentro dos limites da Mecânica Quântica e são a base para os fenômenos que veremos a seguir, como as flutuações quânticas do vácuo. Essas flutuações quânticas são responsáveis por efeitos físicos que podem ser observados experimentalmente, demonstrando que o vácuo quântico não é um espaço inerte, mas sim um ambiente dinâmico repleto de atividade microscópica. Esta concepção se fundamenta na ideia de que mesmo o vácuo apresenta uma energia mínima (energia de ponto zero), que é responsável pelas flutuações espontâneas observadas em escalas microscópicas.

3.2 Flutuações Quânticas no Vácuo

No contexto da **Física Clássica**, o vácuo é definido como um espaço completamente vazio, sem matéria e sem energia. No entanto, a **Mecânica Quântica** revela uma realidade muito diferente: mesmo em uma região do espaço onde aparentemente não há partículas, ainda existem fenômenos que desafiam a intuição. Esse comportamento peculiar é consequência das **flutuações quânticas do vácuo**, um efeito diretamente ligado ao **Princípio da Incerteza de Heisenberg**.

A relação energia-tempo estabelecida por Heisenberg (Equação 3.2) permite que, por um intervalo de tempo extremamente pequeno, a energia de um sistema possa variar espontaneamente. Essa variação temporária da energia se manifesta através do surgimento e desaparecimento de **pares de partículas e antipartículas**, conhecidas como **partículas virtuais**. Essas partículas não podem ser observadas diretamente, pois existem apenas por um período de tempo. No entanto, seus efeitos são reais e podem ser detectados em experimentos físicos.

Partículas Virtuais
surgem em intervalos de tempo curíssimos, não podem ser detectadas diretamente, mas afetam o comportamento de partículas reais e campos quânticos.

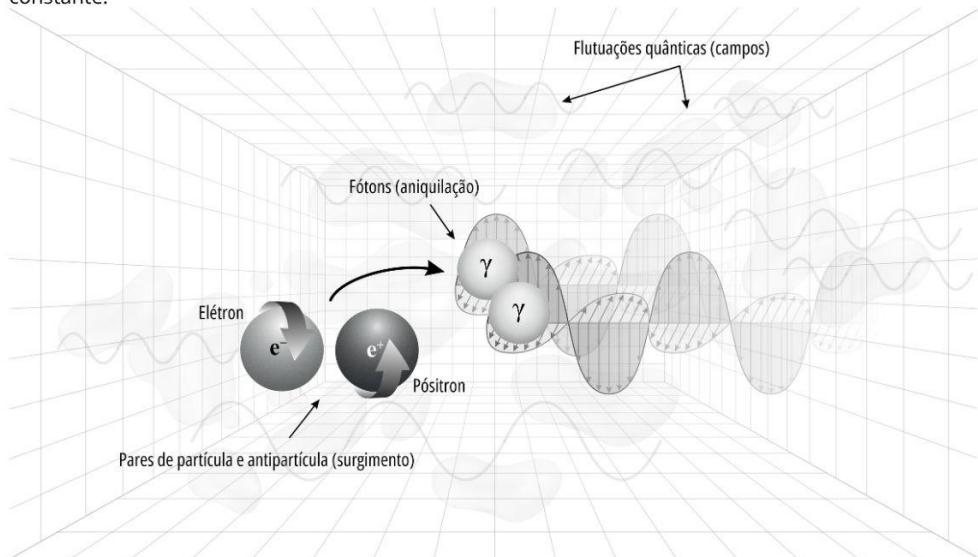
As flutuações do vácuo ocorrem porque, na Teoria Quântica de Campos, o **vácuo não é um estado completamente estático**, mas sim um campo dinâmico no qual diferentes quantidades de energia podem emergir momentaneamente.

As flutuações do vácuo ocorrem devido ao Princípio da Incerteza de Heisenberg, que estabelece um limite para a precisão com que a energia pode ser medida em um determinado intervalo de tempo. Como consequência, pares de partículas e antipartículas (como elétrons e pósitrons) podem surgir espontaneamente no vácuo, existirem por um curto período de tempo e, em seguida, se aniquilarem. Esse fenômeno, que pode parecer contraintuitivo, tem efeitos mensuráveis e está na base da Teoria Quântica de Campos.



Essas flutuações permitem que pares de partículas e antipartículas (como elétrons e pósitrons) surjam espontaneamente a partir do vácuo, existam por um curto período de tempo e, em seguida, se aniquilem. Esse processo ocorre continuamente em todas as regiões do espaço, mesmo no chamado “vazio absoluto” (Figura 03).

Figura 3.3 - Diagrama representativo das flutuações quânticas do vácuo: um par elétron-pósitron — isto é, partícula e antipartícula — surge e se aniquila, liberando fótons (γ), enquanto campos ondulatórios e “nuvens” semitransparentes indicam que o “vazio” é permeado por atividade quântica constante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3.3, observa-se a criação espontânea de um **par elétron-pósitron**, composto por uma partícula com carga negativa (**elétron, e^-**) e sua antipartícula correspondente, o **pósitron (e^+)**. Esses pares podem existir por um breve intervalo de tempo antes de se aniquilarem, um processo no qual sua massa é convertida em energia, emitida na forma de **fótons (γ)**, partículas de radiação eletromagnética. Além disso, a imagem destaca a presença de **flutuações quânticas**, representadas por formas ondulatórias e estruturas semitransparentes, que ilustram a contínua atividade dos campos quânticos permeando o vácuo.



Essas partículas não são fictícias; seus efeitos foram confirmados experimentalmente em diversos experimentos da **Eletrodinâmica Quântica (QED)**, demonstrando que o vácuo quântico possui **energia mensurável**.

Flutuações do Vácuo e Suas Consequências

Embora as partículas virtuais existam apenas por um tempo extremamente curto, suas interações geram efeitos físicos mensuráveis. Algumas das principais consequências das flutuações do vácuo incluem:



Polarização do Vácuo: Em campos elétricos muito intensos, as flutuações do vácuo podem influenciar a distribuição de cargas elétricas no espaço, alterando o comportamento das partículas carregadas. Esse efeito é uma das previsões centrais da **Eletrodinâmica Quântica**.



Interação de Partículas Fundamentais: As partículas virtuais desempenham um papel essencial nas forças fundamentais da natureza. Por exemplo, no **modelo padrão da física de partículas**, bósons como o **fóton** e o **glúon** interagem com partículas virtuais para mediar as forças eletromagnética e nuclear forte.



Radiação Hawking: Nos arredores de buracos negros, flutuações do vácuo podem resultar na criação de pares de partículas onde uma delas escapa, enquanto a outra é absorvida pelo buraco negro. Esse fenômeno, proposto por Stephen Hawking, sugere que buracos negros podem perder energia ao longo do tempo.

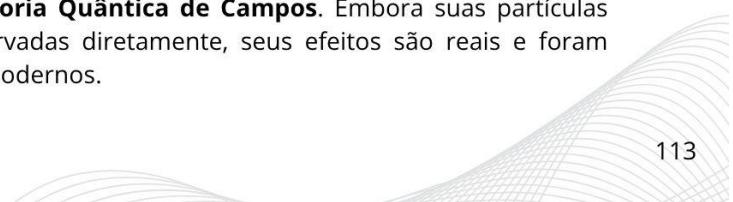
O Vácuo não é inerte

Os experimentos modernos confirmam que o vácuo quântico possui **energia mensurável**, e suas flutuações são responsáveis por efeitos que influenciam tanto sistemas microscópicos como o universo em larga escala.

Além disso, as flutuações do vácuo podem ter desempenhado um papel fundamental na evolução cósmica. Segundo a **Teoria da Inflação Cósmica**, pequenas flutuações quânticas do vácuo foram amplificadas pela rápida expansão do universo nos instantes iniciais do Big Bang, formando as estruturas primordiais que deram origem às galáxias.

Dessa forma, o vácuo quântico não pode ser tratado como um simples “nada”, mas sim como um **tecido dinâmico da realidade**, onde a própria estrutura do espaço-tempo manifesta variações microscópicas de energia.

As **flutuações quânticas do vácuo** são um fenômeno diretamente previsto pela **Mecânica Quântica** e pela **Teoria Quântica de Campos**. Embora suas partículas virtuais não possam ser observadas diretamente, seus efeitos são reais e foram detectados em experimentos modernos.



Essas flutuações são um dos exemplos mais fascinantes de como as leis da Física Quântica desafiam nossa intuição, mostrando que mesmo o vácuo não é um espaço inerte, mas sim **um ambiente rico em atividade microscópica e fundamental para diversos fenômenos da natureza**.

Além de buracos negros, pesquisas em computação quântica e experimentos em grandes aceleradores (como o CERN) também dependem de compreender as propriedades do vácuo, pois as partículas virtuais influenciam medições de alta precisão e o comportamento de campos quânticos.

Exercícios Propostos

1. Princípio da Incerteza de Heisenberg estabelece que o produto das incertezas na medição da posição (x) e do momento (p) de uma partícula não pode ser inferior a $\hbar/2$, ou seja,

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Esse limite fundamental não resulta de falhas dos instrumentos, mas sim da natureza ondulatória das partículas em escala quântica, implicando que, quanto mais precisamente se determina a posição, maior será a incerteza no momento, e vice-versa.

De acordo com o texto-base, qual das alternativas a seguir melhor explica a origem do limite na precisão simultânea das medições de posição e momento de uma partícula?

- A) Porque os instrumentos de medição possuem limitações tecnológicas que impedem a obtenção de valores exatos.
- B) Porque o comportamento ondulatório intrínseco das partículas impõe que, quanto mais precisamente se mede a posição, menor é a precisão na medição do momento, conforme expresso por $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar/2$.
- C) Porque os efeitos relativísticos em altas velocidades tornam impossível medir simultaneamente a posição e o momento com precisão absoluta.
- D) Porque a interferência externa de campos magnéticos e elétricos altera as medições, causando incertezas dependentes do ambiente experimental.
- E) Porque partículas em repouso não possuem momento definido, o que inviabiliza a medição precisa em ambos os parâmetros simultaneamente.

2. A relação entre energia e tempo é expressa pela desigualdade

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

que impõe um limite fundamental à precisão com que a energia de um sistema pode ser medida em um intervalo de tempo específico. Esse princípio indica que, quanto menor o intervalo de tempo (Δt) em que se tenta medir a energia, maior será a incerteza (ΔE) nessa medição. Esse fenômeno permite que, em escalas muito curtas, ocorram flutuações energéticas temporárias que viabilizam a criação de partículas virtuais sem violar a conservação de energia a longo prazo.

Com base no texto-base, qual das alternativas melhor explica a importância da relação entre energia e tempo na mecânica quântica?

- A) Ela demonstra que a energia de um sistema pode ser medida com precisão absoluta se o tempo de medição for reduzido.
- B) Ela implica que, para intervalos de tempo extremamente curtos, a incerteza na energia é alta, possibilitando flutuações que permitem a criação temporária de partículas virtuais.
- C) Ela estabelece que a incerteza na energia é constante, independentemente do intervalo de tempo utilizado na medição.
- D) Ela confirma que, aumentando o tempo de medição, a incerteza na energia também aumenta, dificultando a observação de flutuações quânticas.
- E) Ela indica que as medições de energia e tempo são independentes, e a variação de um não afeta a precisão do outro.

3. As flutuações do vácuo, previstas pela Mecânica Quântica e associadas à relação energia-tempo $\Delta E \cdot \Delta t = \hbar/2$, permitem a criação espontânea e temporária de pares de partículas e antipartículas (partículas virtuais). Tais flutuações têm consequências mensuráveis, como a polarização do vácuo, a mediação das forças fundamentais e até a emissão de radiação em torno de buracos negros (radiação Hawking), demonstrando que mesmo o “vazio” possui uma atividade energética dinâmica.

Com base no texto, qual das alternativas a seguir melhor descreve uma consequência observável das flutuações do vácuo?

- A) A criação permanente de partículas reais que aumentam continuamente a energia do vácuo.
- B) A anulação completa do campo eletromagnético em determinadas regiões, impedindo qualquer interação.
- C) A formação temporária de pares de partículas e antipartículas, que resulta na polarização do vácuo e na mediação de forças fundamentais.

- D) O surgimento de partículas estáveis que bloqueiam a propagação de ondas eletromagnéticas no vácuo.
- E) A redução total da energia do vácuo a zero, inviabilizando a criação de partículas virtuais.
- 4.** Embora o conceito clássico defina o vácuo como um espaço completamente vazio, a Mecânica Quântica demonstra que o vácuo é um meio dinâmico. Flutuações energéticas contínuas permitem a criação temporária de partículas virtuais, influenciando fenômenos em escala microscópica e macroscópica, como a evolução cósmica e a interação entre forças fundamentais. Com base no texto-base, qual das alternativas a seguir melhor explica o significado da afirmação "o vácuo não é inerte"?
- A) O vácuo é um espaço desprovido de qualquer atividade, onde não há emissão ou absorção de energia.
- B) O vácuo possui energia residual, mas essa energia não se manifesta em fenômenos observáveis.
- C) O vácuo é preenchido por partículas reais e estáveis, que podem ser detectadas diretamente em experimentos.
- D) O vácuo é um meio dinâmico, caracterizado por flutuações energéticas que permitem a criação e aniquilação temporária de partículas virtuais, influenciando processos físicos.
- E) O vácuo apresenta variações estacionárias de energia, sem impactar as interações fundamentais entre partículas.
- 5.** O Princípio da Incerteza de Heisenberg estabelece que o produto das incertezas na medição da posição (x) e do momento (p) de uma partícula é limitado por

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

no qual $\hbar=1,05 \times 10^{-34} \text{ Js}$. Suponha que, em um experimento, a incerteza na posição de um elétron seja $1,0 \times 10^{-10} \text{ m}$. Considerando que a massa do elétron é $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, a incerteza mínima no momento pode ser estimada por

$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{2\Delta x}$$

e a incerteza da velocidade é dada por

$$\Delta v = \frac{\Delta p}{m}$$

Com base nessas informações, determine a incerteza mínima no momento (Δp) e a correspondente incerteza na velocidade (Δv) para o elétron.

- A) $\Delta p \approx 5,27 \times 10^{-25} \text{ kg} \cdot \text{s}$ e $\Delta v \approx 5,78 \times 10^5 \text{ m/s}$
- B) $\Delta p \approx 1,05 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{s}$ e $\Delta v \approx 1,15 \times 10^6 \text{ m/s}$
- C) $\Delta p \approx 2,11 \times 10^{-25} \text{ kg} \cdot \text{s}$ e $\Delta v \approx 2,32 \times 10^5 \text{ m/s}$
- D) $\Delta p \approx 5,27 \times 10^{-25} \text{ kg} \cdot \text{s}$ e $\Delta v \approx 1,15 \times 10^6 \text{ m/s}$
- E) $\Delta p \approx 1,05 \times 10^{-25} \text{ kg} \cdot \text{s}$ e $\Delta v \approx 1,15 \times 10^5 \text{ m/s}$



Capítulo 4

O Efeito Casimir

Contextualização Histórica e Conceitual

Em 1948, o físico holandês Hendrik Casimir demonstrou que duas placas metálicas, mesmo sem terem carga elétrica, podem se atrair quando estão imersas num vácuo. Ele utilizou o conceito de “energia de ponto zero”, a energia mínima que permanece presente mesmo no váazio, para mostrar que o espaço, longe de ser completamente desprovido de atividade, está repleto de pequenas oscilações de energia.

Essa nova visão, que contrasta com a ideia clássica de um váazio desprovido de atividade, permite que possamos compreender fenômenos que antes eram considerados inacessíveis à observação direta.

Ao considerar que essas oscilações se organizam de maneira diferente quando o espaço é limitado pela presença das placas, Casimir calculou que essa diferença na distribuição da energia gera uma força de atração entre elas. O cálculo resultou na seguinte expressão para a força por unidade de área:

$$F = \frac{\pi^2 \hbar c}{240 a^4} \quad (4.1)$$

na qual F é a força por unidade de área, a representa a distância entre as placas, \hbar é a constante de Planck reduzida e c a velocidade da luz (CASIMIR, 1948). Essa relação revela a sensível dependência do fenômeno à geometria do sistema, destacando que a força é inversamente proporcional à quarta potência da separação entre as placas.

Posteriormente, os experimentos realizados, inicialmente por Sparnaay (1958) e, mais recentemente, por Lamoreaux (1997) e Mohideen e Roy (1998), confirmaram a existência do efeito Casimir, demonstrando a relevância das flutuações do vácuo na física moderna. Enfatiza-se a transformação da visão clássica de vácuo, concebido como um espaço desprovido de matéria, para uma perspectiva quântica, onde o vácuo é um estado dinâmico, permeado por constantes flutuações de energia.

Portanto, o efeito Casimir emerge como uma manifestação macroscópica das oscilações quânticas do vácuo, estabelecendo um elo crucial entre a teoria quântica de campos e as observações experimentais. Essa dualidade, que confronta a concepção clássica do vácuo com a sua complexa estrutura quântica, não só enriquece a compreensão dos fundamentos da Mecânica Quântica, mas também inaugura novas po

Prof. Dr. H. B. G. Casimir

Hendrik Casimir nasceu em 15 de julho de 1909, na cidade de Haia, nos Países Baixos. Desde cedo, demonstrou interesse pela ciência, seguindo uma trajetória que o levaria a se tornar um dos físicos mais influentes do século XX. Casimir é lembrado principalmente por sua contribuição ao entendimento das oscilações do vácuo, culminando na formulação do que hoje conhecemos como efeito Casimir. Sua descoberta não só ampliou a compreensão sobre a natureza do "vazio" na física quântica, como também estimulou novos experimentos e estudos que transformaram nossa visão sobre as forças que atuam em escalas microscópicas e macroscópicas.



Neste capítulo, vamos juntar os conceitos que já vimos sobre vibrações, ondas e as flutuações quânticas do vácuo. A ideia principal é mostrar que o espaço vazio, ou vácuo, não é realmente "nada", mas sim um ambiente onde ocorrem pequenas oscilações, chamadas de energia de ponto zero. Quando colocamos dois objetos, como placas metálicas, perto um do outro, essas oscilações são alteradas e isso gera

uma força de atração entre eles

O que queremos com este capítulo é que você entenda como essas oscilações no vácuo podem ser modificadas pela presença de objetos e que essa modificação resulta em uma força que pode ser observada experimentalmente. Assim, pretendemos conectar a teoria com os experimentos que mostram essa força de atração.

Em resumo, o objetivo aqui é ajudar você a perceber que os conceitos da Física Quântica, que parecem abstratos à primeira vista, têm consequências reais. Dessa forma, ao estudar o efeito Casimir, você verá como o “vazio” pode influenciar fenômenos do nosso dia a dia e aprender a pensar de maneira crítica sobre como a energia e o espaço se relacionam na natureza.

4.1 Fundamentação Teórica do Efeito Casimir

Revisitando o Vácuo Quântico e as Flutuações

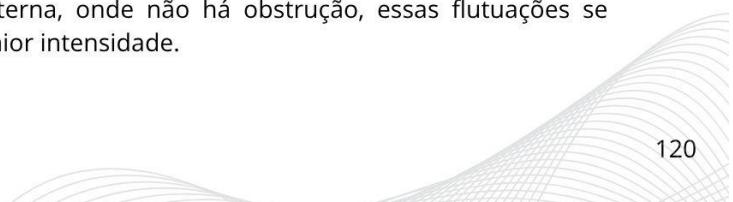
a Física Quântica, como já vimos no Capítulo 3, o vácuo é bem diferente do que conhecemos classicamente, ele não é um nada absoluto, mas sim um ambiente dinâmico, onde ocorrem pequenas oscilações de energia, mesmo quando não há partículas visíveis.

De acordo com o princípio da incerteza de Heisenberg, é impossível determinar com precisão absoluta a energia e o tempo ao mesmo tempo. Isso significa que, mesmo no que chamamos de vácuo, sempre há uma energia mínima presente, a energia de ponto zero. Essas oscilações geram o surgimento temporário de partículas e antipartículas, que aparecem e se anulam em intervalos de tempo tão curtos que não violam a conservação de energia.

Origem e Formulação do Efeito Casimir

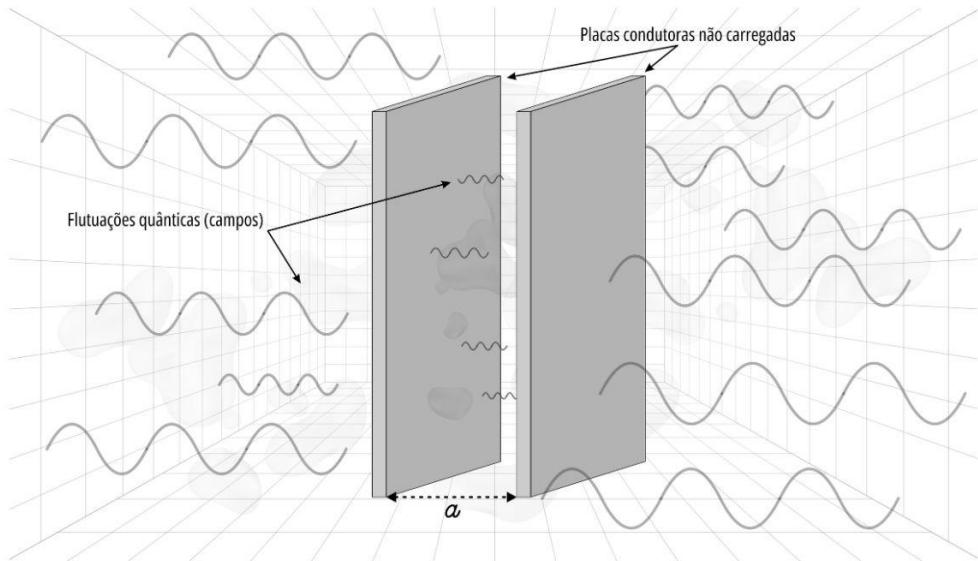
O efeito Casimir surge como uma manifestação macroscópica das flutuações quânticas do vácuo, diretamente relacionadas ao Princípio da Incerteza de Heisenberg. Essas flutuações criam uma pressão diferencial entre as regiões interna e externa das placas metálicas, resultando em uma força de atração que foi prevista teoricamente por Hendrik Casimir em 1948 e confirmada experimentalmente décadas depois.

Na Figura 4-1, percebemos que duas placas metálicas, mesmo sem carga, estão dispostas próximas uma da outra. No espaço entre elas, as flutuações quânticas (representadas pelos campos ondulatórios em menor quantidade) ficam limitadas ou reduzidas. Já na região externa, onde não há obstrução, essas flutuações se espalham livremente, e com maior intensidade.



Essa diferença na distribuição das oscilações do vácuo, dentro e fora do espaço entre as placas, cria uma espécie de desequilíbrio que, de forma simples, pode ser visto como uma pressão que empurra as placas para dentro, resultando em uma força de atração mensurável.

Figura 4.1 - Diagrama do efeito Casimir, mostrando duas placas condutoras não carregadas separadas por uma distância “ a ”. As flutuações quânticas (linhas onduladas) ficam mais limitadas entre as placas e mais livres na região externa, ilustrando o princípio da força de atração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Hendrik Casimir foi o primeiro a quantificar esse fenômeno, em 1948. Ele mostrou que a diferença de energia entre o interior e o exterior das placas pode ser calculada e que essa diferença gera uma força de atração. A fórmula que descreve essa força, por unidade de área, é dada por:

$$F = \frac{\pi^2 \hbar c}{240 a^4} \quad (4.1)$$

no qual, F representa a força de atração entre as duas placas por unidade de áreas destas, a é a distância entre as placas, \hbar é a constante de Planck reduzida e c é a velocidade da luz.

A expressão mostra que a força aumenta significativamente quando as placas estão muito próximas, já que ela é inversamente proporcional à quarta potência da distância entre elas ($\propto 1/a^4$). Essa relação reflete a sensibilidade do fenômeno às condições impostas pelas placas.

A fim de ilustrar experimentalmente a relação entre a força de atração e a distância entre placas metálicas, o físico M. J. Sparnaay realizou medições diretas dessas forças e organizou seus resultados em um gráfico (Figura 4.2).

Nele, o eixo horizontal representa a distância entre as placas, em micrômetros ($\mu m = 10^{-6} m$), enquanto o eixo vertical mostra a intensidade da força por unidade de área, em $dinas/cm^2$. À medida que a distância diminui, a força de atração aumenta de forma acentuada, evidenciando uma concordância com a tendência prevista teoricamente por Casimir.

Esse experimento foi um passo importante para confirmar, na prática, que o vácuo e suas flutuações quânticas desempenham um papel real e mensurável na geração de forças entre objetos próximos. Ao analisar o gráfico, podemos perceber que, para distâncias maiores, a força se torna muito pequena, mas não desaparece completamente dentro do intervalo observado. Isso reforça a ideia de que o efeito Casimir é especialmente significativo em escalas microscópicas, onde a proximidade entre as superfícies faz com que as oscilações quânticas sejam mais limitadas.

Em resumo, o efeito Casimir é um exemplo impressionante de como as pequenas oscilações no vácuo, a energia de ponto zero, podem resultar em uma força mensurável e observável. Essa descoberta, que começou como um estudo teórico por Casimir, foi confirmada por experimentos ao longo dos anos e se tornou uma importante ferramenta para compreender como a Física Quântica se manifesta no mundo real.

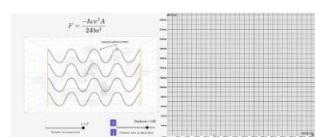
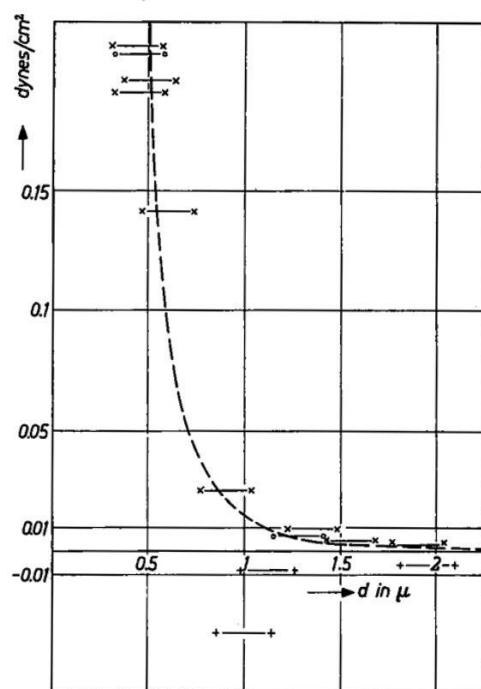


Figura 4.2 - Resultados (x — x) para aço-cromo e (O — O) para cromo. A incerteza na determinação da distância entre as placas é indicada por linhas horizontais em vez de pontos. Cada medição específica foi frequentemente repetida. Algumas repulsões entre placas de alumínio também são mostradas (+ — +). A linha tracejada (----) representa a relação de Casimir.



Fonte: Adaptado de SPARNAAY (1958).

Acesse a simulação do gráfico do Efeito Casimir e observe o comportamento resultante da aproximação entre as placas e a variação de seu tamanho.

¹Acesse a simulação em: <https://universosingular.com.br/conexoes-quanticas-grafico-efeito-casimir/>

4.2 O Efeito Casimir na Eletrodinâmica Quântica

Aspectos Teóricos

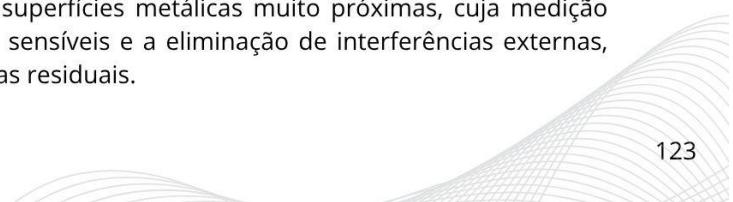
A eletrodinâmica quântica (QED) é o ramo da Física que descreve como a luz e as partículas carregadas, como os elétrons, interagem por meio de campos eletromagnéticos. O campo eletromagnético é descrito como uma entidade quântica contínua, permeando todo o espaço, mas suas excitações ocorrem em unidades discretas chamadas fôtons ($E=h\nu$). Isso significa que a luz e outras formas de radiação não são emitidas ou absorvidas de maneira arbitrária, mas sim em pacotes bem definidos de energia. Esse tratamento quântico do eletromagnetismo fornece a base para entendermos como as flutuações do vácuo, caracterizadas pela criação e aniquilação espontânea de fôtons virtuais, podem gerar fenômenos como o efeito Casimir.

Na QED, a energia total das flutuações do vácuo, se considerada em todas as frequências possíveis, leva a um valor matematicamente infinito. No entanto, essa infinidade não é um problema físico, pois apenas diferenças de energia podem ser medidas experimentalmente. Para lidar com isso, utilizam-se técnicas como a regularização, que impõe um limite artificial para evitar contribuições excessivas das altas frequências, e a renormalização, que redefine os cálculos de modo que apenas as diferenças de energia tenham significado físico e possam ser comparadas com os experimentos.

Assim, a QED oferece a estrutura teórica que explica por que o vácuo não é vazio no sentido clássico e como o rearranjo das flutuações de energia pode gerar forças mensuráveis. Esse rearranjo se torna particularmente evidente quando há objetos próximos (como as placas condutoras), pois a configuração dessas oscilações fica limitada, criando uma diferença de energia entre a região entre as placas e o restante do espaço. Na Figura 4-1, podemos observar que as flutuações quânticas do vácuo são mais intensas na região externa das placas, enquanto dentro da região entre elas, essas flutuações são parcialmente suprimidas. Essa diferença na densidade de oscilações gera um desequilíbrio de pressão que resulta na força de atração prevista por Casimir.

Implicações Físicas e Experimentais

Além de fornecer uma das confirmações experimentais mais diretas da teoria quântica de campos, o efeito Casimir possui implicações importantes na física moderna, especialmente na nanotecnologia e nos sistemas microeletrônicos. Em experimentos, esse fenômeno se manifesta como uma força de atração extremamente pequena entre superfícies metálicas muito próximas, cuja medição exige equipamentos altamente sensíveis e a eliminação de interferências externas, como vibrações e cargas elétricas residuais.



Essa força, extremamente pequena, atua em superfícies separadas por micrômetros e pode atingir magnitudes da ordem de frações de micro newtons por metro quadrado ($\mu N/m^2$), exigindo medições altamente sensíveis. A capacidade de detectar e quantificar essa força não apenas valida os modelos teóricos baseados na energia de ponto zero, mas também impulsiona o desenvolvimento de dispositivos em escala nanométrica.

Nos dispositivos microeletromecânicos (MEMS), o efeito Casimir pode representar tanto um desafio, ao causar aderência indesejada entre componentes próximos, quanto uma oportunidade, ao permitir o desenvolvimento de dispositivos baseados em forças quânticas para aplicações em sensores e atuadores ultrassensíveis.

A medição experimental do efeito Casimir apresenta desafios notáveis, incluindo a necessidade de controlar a separação entre as placas com precisão subnanométrica e minimizar influências externas, como forças eletrostáticas residuais e vibrações térmicas. Estudos pioneiros, como os de Sparnaay (1958), demonstraram que, mesmo em meio a dificuldades técnicas, é possível obter dados que se aproximam das previsões teóricas de Casimir.

Os avanços experimentais no estudo do efeito Casimir não apenas confirmam previsões teóricas da mecânica quântica, mas também impulsionam o desenvolvimento de novas técnicas de medição de forças em nanoescala. Esses progressos permitem a exploração de aplicações inovadoras baseadas em interações quânticas de curto alcance, consolidando o efeito Casimir como uma ferramenta essencial para o avanço da ciência e da tecnologia.

4.3 Análogos do Efeito Casimir

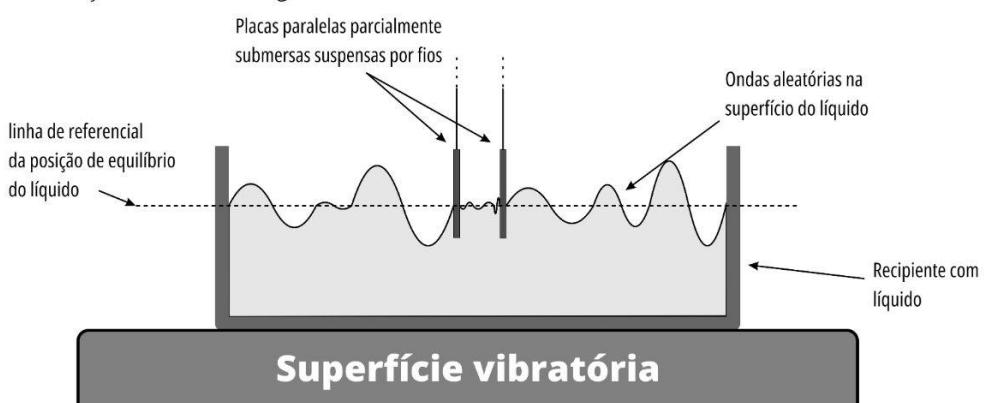
O efeito Casimir, originalmente previsto no contexto da Eletrodinâmica Quântica (QED), pode ser compreendido como uma consequência das flutuações do vácuo quântico que geram uma força de atração entre duas placas metálicas neutras. No entanto, fenômenos análogos a esse efeito podem ser observados em outros sistemas físicos, onde ondas transportam momento e criam forças de radiação semelhantes à força de Casimir.

O Conceito de Análogo Físico

Na física, um análogo é um sistema que reproduz as características essenciais de outro, permitindo sua investigação sob novas perspectivas. O efeito Casimir, que surge da quantização do campo eletromagnético no vácuo, encontra análogos em sistemas mecânicos e fluidodinâmicos onde ondas propagam energia e momentum de maneira discreta e estruturada. Um dos exemplos mais elucidativos desse tipo de análogo ocorre em sistemas de ondas de superfície em líquidos, onde forças de radiação emergem devido à modificação da propagação das ondas.

A Figura 4.3 mostra o experimento análogo ao efeito Casimir utilizando ondas de superfície em líquidos. Nela, podemos observar um recipiente com líquido sobre uma superfície vibratória, onde duas placas paralelas estão parcialmente submersas e suspensas por fios. As ondas se propagam na superfície do líquido, criando regiões de maior e menor intensidade de oscilação. A interferência das ondas entre as placas gera uma força de atração, reproduzindo um comportamento análogo ao efeito Casimir quântico.

Figura 4.3 - Diagrama do experimento análogo ao efeito Casimir utilizando ondas de superfície em líquidos. As placas submersas experimentam uma força de atração devido à modificação da distribuição das ondas na região entre elas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

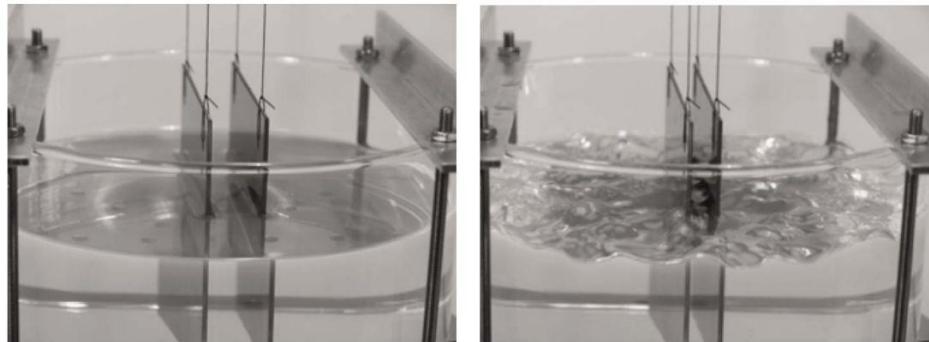
Efeito Casimir e Ondas Mecânicas

Uma das formas mais acessíveis de ilustrar o efeito Casimir é através do estudo de ondas mecânicas geradas em fluidos. Em um experimento descrito por Denardo, Puda e Larraza (2009) (Figura 4.4), duas placas rígidas foram suspensas verticalmente e parcialmente submersas em um recipiente contendo um líquido, enquanto ondas de superfície eram geradas por uma mesa vibratória, observou-se que as placas se atraíam, um fenômeno que pode ser compreendido pela redução da intensidade das ondas entre as placas em comparação com a região externa. Essa diferença cria um desequilíbrio de pressão que força as placas a se aproximarem. Esse comportamento é análogo ao efeito Casimir, onde a restrição das flutuações do vácuo entre as placas metálicas leva a uma força resultante de atração.

Na Figura 4.4, as placas paralelas foram parcialmente submersas em álcool etílico misturado com corante fluoresceína. O recipiente utilizado no experimento tem um diâmetro de 19 cm e foi fixado a uma mesa vibratória vertical. À medida que o agitador gerava ondas na superfície do líquido, observou-se uma atração considerável entre as placas. Curiosamente, a região entre as placas apresentou

pouquíssima movimentação ondulatória, demonstrando a diferença na distribuição das ondas que leva ao efeito análogo ao Casimir.

Figura 4.4 - Aparato de demonstração do efeito Casimir a partir do análogo de ondas de água



A imagem exibe duas fases do experimento de ondas de superfície em um líquido. Na primeira, à esquerda, o líquido encontra-se em equilíbrio, com a superfície estável e as placas paralelas suspensas e parcialmente submersas sem perturbações visíveis. Na segunda, à direita, a vibração aplicada gera ondas na superfície do líquido, alterando a interação entre as placas. Observa-se uma redução significativa do movimento ondulatório na região entre elas, resultando em uma força de atração análoga ao efeito Casimir.

Fonte: Denardo; Puda e Larraza (2009).

Força de Radiação e o Princípio do Efeito Casimir

A força responsável pela aproximação das placas no experimento com ondas de superfície em líquido é um tipo de força de radiação, causada pelo transporte de momento pelas ondas. Assim como no efeito Casimir original, onde as flutuações do vácuo são restrinvidas pela geometria das placas metálicas, no experimento com ondas mecânicas a limitação espacial imposta pelas placas modifica a distribuição das ondas entre elas. Esse rearranjo gera uma força líquida de atração, confirmando a universalidade dos princípios que fundamentam o efeito Casimir.

Comparação entre o Efeito Casimir Tradicional e seu Análogo em Ondas de Superfície

A comparação entre o efeito Casimir tradicional e seu análogo em ondas de superfície evidencia a complexidade dos fenômenos envolvidos e a versatilidade da teoria para diferentes sistemas físicos. No efeito Casimir tradicional, a força surge da restrição dos modos de oscilação do campo eletromagnético no vácuo, resultando em uma dependência bem definida da separação entre as placas, proporcional $1/a^4$. Já no análogo com ondas de superfície, a atração entre as placas não segue uma relação tão simples, pois depende de múltiplos fatores, como a amplitude e a frequência das ondas geradas.

A amplitude das ondas influencia diretamente a quantidade de energia transportada e a intensidade da força resultante. Frequências mais altas geram ondas de menor comprimento, podendo afetar de forma distinta a região entre as placas. Além disso, a formação de ondas estacionárias pode modificar significativamente a distribuição de pressão ao redor das placas, alterando a força de atração. Essas interações tornam a relação entre a força e a distância mais complexa do que no caso do efeito Casimir quântico, onde a relação matemática já é bem estabelecida pela teoria de campos.

A observação experimental desses fenômenos reforça a ideia de que forças induzidas por flutuações quânticas podem encontrar paralelos em sistemas clássicos bem projetados. A medição direta da força no efeito Casimir tradicional e o deslocamento das placas no experimento com ondas demonstram que, apesar das diferenças nos mecanismos subjacentes, ambos os sistemas compartilham princípios fundamentais relacionados à restrição de modos ondulatórios e à consequente geração de forças de interação.

A seguir é apresentado um quadro comparativo das características do efeito casimir e o análogo de ondas em superfícies de líquidos.

Característica	Efeito Casimir Tradicional	Análogo em Ondas de Superfície de Líquidos
Meio físico	Flutuações do vácuo quântico	Ondas de superfície em líquidos
Origem da força	Restrição da densidade de modos do vácuo	Redução da intensidade das ondas entre as placas
Dependência da distância	Inversamente proporcional à quarta potência da separação ($1/a^4$)	Dependência complexa da amplitude e frequência das ondas
Observação experimental	Medições diretas da força entre placas metálicas	Deslocamento mensurável das placas suspensas em líquido

Implicações dos Análogos do Efeito Casimir

A existência de análogos físicos para o efeito Casimir não apenas reforça sua validade teórica, mas também amplia suas aplicações experimentais. Sistemas como o descrito acima oferecem uma maneira acessível de demonstrar visualmente conceitos quânticos complexos, tornando-os mais compreensíveis para estudantes e pesquisadores. Além disso, esses análogos podem fornecer insights para aplicações tecnológicas, como a manipulação de nanoestruturas e o desenvolvimento de novos dispositivos baseados em forças quânticas.

4.4 O Análogo do Efeito Casimir em Ondas de Água: Observação e Hipóteses

A fim de proporcionar uma experiência prática e intuitiva sobre o efeito Casimir e seu análogo em ondas de superfície, você realizará um experimento demonstrativo. Esse experimento tem o propósito de visualizar como a interação entre ondas em um meio pode gerar um comportamento análogo à força de Casimir, proporcionando-o uma situação de formulação de hipóteses e a análise qualitativa do fenômeno.

Procedimento Experimental

1. Preparação do sistema:

- Encha o bêquer com água limpa até que as placas, quando suspensas, fiquem imersas até 2/3 de sua altura.
- Fixe os fios de costura no suporte universal de maneira que as placas fiquem paralelas entre si e com uma pequena separação entre elas.

2. Ativação da vibração:

- Ligue o motor da superfície vibratória e ajuste sua intensidade.
- Observe a formação de ondas na superfície do líquido e sua propagação pelo bêquer.

3. Observação do comportamento das placas:

- Inicialmente, observe como as placas se movem antes da ativação do motor.
- Após a ativação da vibração, perceba como a movimentação das placas muda.
- Atente-se à região entre as placas e compare com a região externa.

4. Formulação de hipóteses:

- Você deve registrar suas observações e formular hipóteses para explicar o comportamento observado.
- Algumas questões norteadoras para reflexão:
 - O que acontece com a movimentação das placas quando o motor é ligado?
 - A oscilação das ondas na região entre as placas é semelhante à oscilação das ondas externas?
 - Como esse comportamento pode estar relacionado ao efeito Casimir estudado anteriormente?



Discussão e Reflexão Inicial

Esse experimento permite que você explore um fenômeno físico que, embora seja um análogo clássico, apresenta um comportamento comparável ao efeito Casimir quântico. A supressão das ondas entre as placas pode ser interpretada como uma redução dos modos ondulatórios, o que, em um nível quântico, ocorre no efeito Casimir devido à restrição dos modos do vácuo.

Você deve refletir sobre as condições do experimento, levantar hipóteses sobre o fenômeno observado e discutir suas implicações, preparando-se para a próxima etapa, onde serão analisadas as conexões do experimento com aplicações reais e conceitos mais amplos da Física Moderna.

4.5 Reflexão e Conexões com a Física Moderna

O experimento realizado proporcionou uma observação qualitativa de um fenômeno análogo ao efeito Casimir, incentivando o pensamento crítico e a formulação de hipóteses. Agora, é essencial refletir sobre as implicações dessas observações e como elas se conectam com conceitos mais amplos da Física Moderna e suas aplicações tecnológicas.

Discussão das Observações

Ao longo do experimento, foi possível perceber mudanças na movimentação das placas ao ativar a vibração na superfície do líquido. A principal questão que se impõe é: por que as placas se atraem? A resposta reside na variação da intensidade das ondas na região entre as placas e no ambiente ao redor. Como observado, a amplitude das ondas entre as placas foi significativamente reduzida em comparação com a área externa. Esse comportamento pode ser interpretado como uma restrição dos modos ondulatórios, uma característica fundamental também observada no efeito Casimir quântico.

A comparação entre o experimento e o fenômeno quântico ressalta a importância da analogia no ensino da Física Moderna. Embora as ondas de superfície em um líquido sejam descritas por princípios da mecânica clássica, elas compartilham propriedades matemáticas semelhantes às flutuações quânticas do vácuo. Esse tipo de abordagem permite compreender, de forma intuitiva, conceitos que, de outra maneira, seriam excessivamente abstratos.



Limitações e Desafios do Experimento

Embora o experimento tenha sido eficaz para ilustrar qualitativamente o efeito Casimir, algumas limitações devem ser consideradas:

- Ausência de medições quantitativas: Como não foi possível medir a força de atração entre as placas, a interpretação do fenômeno ficou restrita à observação visual.
- Influência de variáveis externas: Pequenas assimetrias na suspensão das placas, variações na vibração da superfície ou até mesmo correntes de ar podem influenciar os resultados.
- Diferentes mecanismos físicos: Enquanto o efeito Casimir real surge da quantização do campo eletromagnético e da energia de ponto zero, o experimento mecânico depende da propagação e reflexão de ondas em um fluido. Apesar da semelhança na restrição de modos, a origem física dos fenômenos é distinta.

Essas limitações não diminuem a importância do experimento, mas reforçam a necessidade de compreender a distinção entre modelos análogos e os fenômenos originais que eles representam.

Aplicações do Efeito Casimir na Ciência e Tecnologia

E Apesar de parecer um efeito puramente teórico, o efeito Casimir possui implicações diretas em diversas áreas da ciência e da tecnologia. Algumas de suas aplicações mais relevantes incluem:

- Nanotecnologia: A força de Casimir é uma preocupação essencial no design de nanoestruturas e dispositivos microeletromecânicos (MEMS). Em escalas extremamente pequenas, essa força pode causar adesão indesejada entre componentes, afetando seu desempenho.
- Propulsão e energia em microescala: Pesquisas recentes exploram o uso do efeito Casimir como uma possível fonte de energia para dispositivos nanoscópicos, utilizando variações controladas da força em diferentes materiais.
- Fundamentos da Física Quântica: O efeito Casimir é uma das manifestações experimentais mais diretas das flutuações do vácuo quântico, reforçando a validade da Teoria Quântica de Campos.

Essas aplicações demonstram que conceitos inicialmente considerados abstratos podem ter impactos significativos no desenvolvimento tecnológico e na compreensão da natureza.

Conclusão e Perspectivas Finais

O experimento realizado foi um exercício valioso de exploração científica, permitindo visualizar um fenômeno análogo ao efeito Casimir e refletir sobre seu significado na Física Moderna. Através da observação e da formulação de hipóteses, foi possível compreender como restrições impostas por geometrias específicas podem influenciar a propagação de ondas e gerar forças mensuráveis.

Esse tipo de abordagem experimental não apenas facilita a assimilação de conceitos quânticos, mas também estimula o desenvolvimento do pensamento científico e investigativo. Ao conectar esses fenômenos a aplicações reais, amplia-se a percepção dos alunos sobre a importância da Mecânica Quântica no mundo moderno, promovendo um aprendizado significativo e duradouro.

BIBLIOGRAFIA

BARROS, L. dos S. et al. Oscilador harmônico simples, série e transformada de Fourier e operador de Sturm-Liouville – uma breve discussão. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-2022-45-e20230000>. Disponível em: <https://www.sbfisica.org.br/rbef>. Acesso em: 17 abr. 2025.

BEZERRA, V. A. Schola quantorum: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte I: desenvolvimento histórico, 1913-1925. **Scientiae Studia**, v. 1, n. 4, p. 463-517, dez. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-31662003000400004>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ss/a/XYZ>. Acesso em: 2 mar. 2025.

BLUNDELL, S. J.; BLUNDELL, K. M. **Concepts in thermal physics**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2009.

COUGO-PINTO, M. V.; FARINA, C.; TORT, A. O efeito Casimir. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 1, p. 122-132, mar. 2000. Disponível em: https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_122.pdf. Acesso em: 17 abr. 2025.

DENARDO, B. C.; PUDA, J. J.; LARRAZA, A. A water-wave analog of the Casimir effect. **American Journal of Physics**, v. 77, n. 12, p. 1095-1101, dez. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1119/1.3211416>. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article/77/12/1095/1042888>. Acesso em: 8 mai 2023.

FITZPATRICK, R. **Oscillations and waves**. Boca Raton: CRC Press, 2012.

GASIOROWICZ, S. **Física quântica**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GIANCOLI, D. C. **Física para cientistas e engenheiros**: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

GOVERNO DOS PAÍSES BAIXOS (Haia, Países Baixos). Nationaal Archief (ed.). Prof. Dr. H. B. G. Casimir, membro do Conselho Executivo da Philips N.V. Haia: **Nationaal Archief**, 29 out. 1958. 1 fotografia (Coleção de fotos Anefo). Disponível em: <http://hdl.handle.net/10648/a9876ee4-d0b4-102d-bcf8-003048976d84>. Acesso em: 3 mar. 2025.

GRIFFITHS, D. J. **Introduction to quantum mechanics**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**: oscilações, ondas e termodinâmica. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 2.

HERNÁNDEZ, P. J. V. V. **Vácuo quântico**: fundamentos e fronteiras. 2023. Pré-print. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.33458.17609>. Acesso em: 7 fev. 2025.

LARRAZA, A. A demonstration apparatus for an acoustic analog to the Casimir effect. **American Journal of Physics**, v. 67, n. 11, p. 1028-1030, nov. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1119/1.19166>. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article/67/11/1028/1055216>. Acesso em: 15 mai 2023.

LEE, H. et al. Surface structures and compositions of Au-Rh bimetallic nanoclusters supported on thin-film Al₂O₃/NiAl(100) probed with CO. **The Journal of Chemical Physics**, v. 147, n. 4, p. 044704, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5000465>.

NASA. Electromagnetic spectrum diagram. Hampton, VA: **NASA LaRC**, 2025. Imagem adaptada para o português. Disponível em: <https://mynasadata.larc.nasa.gov/basic-page/electromagnetic-spectrum-diagram>. Acesso em: 2 mar. 2025.

SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. **Princípios de física: mecânica clássica, oscilações e ondas**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

SILVEIRA, F. L.; VARRIALE, M. C. Propagação das ondas marítimas e dos tsunami. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 22, n. 2, p. 190-208, 1 ago. 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266014164_PROPAGACAO_DAS_ONDAS_MARITIMAS_E DOS_TSUNAMI/link/54988b8d0cf2eeefc30f9a4a/download. Acesso em: 7 fev. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Física IV – Aula 04 (apostila em PDF). Fortaleza: **UFC Virtual**, [2020?]. Disponível em: https://www.virtual.ufc.br/solar/aula_link/SOLAR_2/Curso_de_Graduacao_a_Distancia/LFIS/A_a_H/Fisica_IV/aula_04/pdf/02.pdf. Acesso em: 17 abr. 2025.

CONEXÕES QUÂNTICAS

VIBRAÇÕES
ONDAS E
EFEITO CASIMIR