

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Do Teórico ao Experimental: Uma Sequência Didática para Introdução a
Conceitos Fundamentais da Física Quântica**

Eliza Andrade Oliveira Pinto
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

ELIZA ANDRADE OLIVEIRA PINTO

**Do Teórico ao Experimental: Uma Sequência Didática para Introdução a
Conceitos Fundamentais da Física Quântica**

Dissertação Mestrado Profissional
apresentada à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Ensino
em Física (Profissionalizante), para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Hallan Souza e Silva

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P659d
2026

Pinto, Eliza Andrade Oliveira, 1997-

Do teórico ao experimental: uma sequência didática para
introdução a conceitos fundamentais da física quântica / Eliza
Andrade Oliveira Pinto. – Viçosa, MG, 2026.

1 dissertação eletrônica (149 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Hallan Souza e Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Física, 2026.

Referências bibliográficas: f. 81-83.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.385>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Física (Ensino médio) - Estudo e ensino. 2. Teoria
quântica. 3. Tunelamento (Física). 4. Funções de onda. I. Silva,
Hallan Souza e, 1978-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Física. Programa de Pós-Graduação em Ensino
de Física. III. Título.

CDD 22. ed. 530.0712

ELIZA ANDRADE OLIVEIRA PINTO

**Do Teórico ao Experimental: Uma Sequência Didática para Introdução a
Conceitos Fundamentais da Física Quântica**

Dissertação Mestrado Profissional
apresentada à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Ensino em
Física (Profissionalizante), para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Eliza Andrade Oliveira Pinto
Autora

Hallan Souza e Silva
Orientador

Essa dissertação mestrado profissional foi assinada digitalmente pela autora em 24/06/2026 às 16:38:33 e pelo orientador em 25/06/2026 às 17:04:51. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **BBPS.CNRX.7YJZ** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder sabedoria e perseverança ao longo desta caminhada.

Agradeço ao meu orientador, Hallan, pelos ensinamentos, dedicação e valiosas contribuições para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Agradeço ao professor Alexandre Tadeu pelas primeiras orientações na pesquisa, pelos ensinamentos compartilhados e pela constante preocupação e compromisso com a formação de seus alunos.

Agradeço aos professores do mestrado pelas aulas de qualidade, pelos conhecimentos compartilhados e pelas contribuições para minha formação acadêmica e profissional.

Agradeço à minha família e, em especial, à minha mãe, pelo carinho e apoio durante minha trajetória no mestrado.

Agradeço às minhas amigas Taciany, Talia e Bruna, por estarem sempre ao meu lado, oferecendo apoio e incentivo.

Agradeço aos amigos que fiz durante minha permanência na UFV, pelas horas de estudo e pela rica troca de experiências.

RESUMO

PINTO, Eliza Andrade Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Do Teórico ao Experimental: Uma Sequência Didática para Introdução a Conceitos Fundamentais da Física Quântica.** Orientador: Hallan Souza e Silva.

A física quântica tem se tornado cada vez mais presente na realidade dos educandos do Ensino Médio, especialmente em razão de suas aplicações tecnológicas. Diante dessa relevância, neste trabalho foi desenvolvida uma sequência didática com o objetivo de introduzir os conceitos de função de onda e tunelamento quântico, por meio da articulação entre aulas teóricas, atividades experimentais e o uso de analogias. Na sequência didática foram utilizados dois experimentos, um envolvendo a função de onda para um elétron preso em uma caixa e o outro a análise de corrente por tensão com o uso de um diodo túnel. A proposta fundamenta-se na teoria de Vygotsky, que compreende a aprendizagem como um processo mediado socialmente, no qual a interação, a linguagem e a mediação desempenham papel central na construção do conhecimento. Nesse contexto, a sequência didática foi aplicada em duas turmas do terceiro ano do Ensino Médio, sendo as aulas concebidas como espaços de mediação, o que favoreceu a construção gradual de significados e a compreensão de conceitos abstratos da mecânica quântica a partir da articulação entre modelos teóricos e práticas experimentais.

Palavras-chave: física; ensino de física; mecânica quântica; Arduino

ABSTRACT

PINTO, Eliza Andrade Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **From Theory to Experiment: A Didactic Sequence for the Introduction of Fundamental Concepts of Quantum Physics.** Adviser: Hallan Souza e Silva.

A quantum physics has become increasingly present in the reality of high school students, especially due to its technological applications. In view of this relevance, this study developed a didactic sequence aimed at introducing the concepts of the wave function and quantum tunneling through the articulation of theoretical classes, experimental activities, and the use of analogies. Two experiments were employed in the didactic sequence: one involving the wave function for an electron confined in a box and the other based on the analysis of current-voltage characteristics using a tunnel diode. The proposal is grounded in Vygotsky's theory, which understands learning as a socially mediated process in which interaction, language, and mediation play a central role in the construction of knowledge. In this context, the didactic sequence was implemented in two third-year high school classes, with the lessons conceived as spaces of mediation. This approach fostered the gradual construction of meaning and the understanding of abstract concepts of quantum mechanics through the articulation between theoretical models and experimental practices.

Keywords: physics; physics education; quantum mechanics; Arduino

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Teoria da mediação de Vygotsky.....	11
2.2 Ensino por analogia.....	15
2.3 Limitações da Física Clássica e o Surgimento dos Modelos Atômicos Pré-Bohr.....	18
2.3.1 Evidências experimentais que fundamentaram os postulados de Bohr e o modelo atômico de Bohr.....	21
2.3.2 Ondas de matéria.....	26
2.3.3 Função de onda.....	28
2.3.4 Modelo da Partícula em uma caixa e o Fenômeno do Tunelamento Quântico.....	31
2.3.5 Semicondutores.....	38
2.4 Ensino de física quântica na educação básica.....	40
3 METODOLOGIA.....	49
3.1 Etapa 1 - “Modelos atômicos e a origem da função de onda: uma viagem pela evolução do pensamento científico sobre a matéria.”.....	50
3.2 Etapa 2 - “Experimento - Caixa Quântica”.....	58
3.3 Etapa 3- “Tunelamento através de uma barreira”.....	59
3.4 Etapa 4 - “Experimento - Diodo Túnel”.....	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1 Percepção e análise da etapa 1 e 2 da sequência didática.....	67
4.2 Percepção e análise dos resultados da etapa 3 e 4 da sequência didática.....	71
5 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS.....	81
APÊNDICE A MONTAGEM DO EXPERIMENTO - CAIXA QUÂNTICA.....	84
APÊNDICE B MONTAGEM DO EXPERIMENTO - DIODO TÚNEL.....	95
APÊNDICE C - ROTEIRO DOS EXPERIMENTOS.....	98
Roteiro do Experimento - Caixa Quântica.....	98
Roteiro do Experimento - Diodo Túnel.....	102

APÊNDICE D - PRODUTO EDUCACIONAL.....	107
Aula 1.....	111
Aula 2.....	119
Aula 3.....	129
Aula 4.....	135
APÊNDICE D1 ROTEIRO DO EXPERIMENTO - CAIXA QUÂNTICA.....	141
APÊNDICE D2 ROTEIRO DO EXPERIMENTO - DIODO TÚNEL.....	145

1 INTRODUÇÃO

Max Planck abriu caminho para o desenvolvimento da mecânica quântica com o seu trabalho sobre a distribuição de energia no espectro de radiação do corpo negro, apresentado em 1900, embora não tenha chamado muita atenção inicialmente ele introduziu a ideia que a energia assumia valores discretos. Anos mais tarde outros pesquisadores como, Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger colaboram com o seu desenvolvimento (Eisberg; Resnick, 1994).

A física quântica vem assumindo um papel cada vez mais relevante, tanto no campo da pesquisa científica quanto em suas aplicações tecnológicas. Seus princípios sustentam diversas inovações contemporâneas, como os semicondutores, a tecnologia dos lasers, os métodos de formação de imagens médicas e a computação quântica, evidenciando sua presença no cotidiano dos estudantes e sua importância para o avanço científico e tecnológico. Através de abordagens voltadas para a compreensão conceitual tornou possível sua inserção no Ensino Médio (Lewerissa *et al.*, 2017).

Nesse sentido, a inserção da física quântica no Ensino Médio mostra-se também alinhada aos documentos orientadores, como o Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN, 2000) e a Base Nacional Comum Curricular (BNCC, 2017). Os documentos oficiais destacam a importância de propor metodologias que estimulem o protagonismo do aluno, permitindo-lhe compreender o funcionamento do mundo e intervir na realidade. Sendo assim, a física moderna mostra-se altamente relevante para a realidade dos estudantes.

No âmbito das escolas estaduais de Minas Gerais, a inclusão desses conteúdos no Ensino Médio é orientada pelos Planos de Curso do Currículo Referência de Minas Gerais, proposto pela Secretaria de Estado de Educação de Minas Gerais (2025). Para o primeiro ano do Ensino Médio, é sugerido o conteúdo de relatividade. No segundo ano, não há abordagem do conteúdo de física quântica. Já no terceiro ano Ensino Médio, são propostos os seguintes temas: Modelo Atômico de Bohr, Efeito Fotoelétrico e Dualidade Onda-Partícula.

Além disso, o ano de 2025 foi instituído pela Organização das Nações Unidas como o Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quântica, em comemoração aos 100 anos do desenvolvimento da mecânica quântica. A iniciativa busca estimular a pesquisa na área e promover a divulgação desses temas entre estudantes do Ensino Fundamental e Médio (*International Year Of Quantum Science & Technology*, 2025).

Apesar de sua relevância curricular, a abordagem da física quântica na educação básica ainda enfrenta desafios significativos, como a articulação entre a física clássica e a moderna no tempo disponível do Ensino Médio, a adoção de estratégias que priorizem a compreensão conceitual em detrimento do formalismo matemático e as limitações na formação de professores, especialmente na rede pública de ensino (Terrazzan, 1992).

Diante desses desafios, torna-se necessário propor estratégias didáticas que favoreçam a inserção dos conceitos de física quântica no contexto escolar. Com o objetivo de minimizar o distanciamento existente entre os fundamentos da mecânica quântica e a realidade dos educandos, foi desenvolvida uma sequência didática baseada em uma abordagem conceitual. A proposta teve como foco o estudo da função de onda e de sua interpretação probabilística, trabalhadas de forma teórica e “experimental” por meio de um kit didático denominado “Caixa Quântica”, onde o estudante consegue simular a posição de um elétron confinado. Além disso, abordou-se também o fenômeno do tunelamento quântico, investigado tanto sob a perspectiva teórica quanto experimental, a partir do estudo do semicondutor diodo túnel, possibilitando a articulação entre os modelos teóricos e as evidências experimentais.

A elaboração dessa sequência fundamenta-se na perspectiva de Vygotsky, segundo a qual a aprendizagem ocorre por meio da mediação social. No contexto escolar, o professor atua como mediador do processo de ensino, promovendo interações que possibilitam ao estudante a construção e a internalização dos conceitos científicos a partir de conhecimentos socialmente compartilhados (Moreira, 1999). Assim, os recursos utilizados ao longo da sequência didática foram planejados de modo a favorecer o diálogo, a troca de ideias e a participação ativa dos alunos, elementos centrais para o desenvolvimento cognitivo.

Além disso, foram empregadas analogias como estratégia didática, com a finalidade de estabelecer relações entre conceitos abstratos da física quântica e situações familiares ao cotidiano dos estudantes. O uso de analogias, enquanto ferramenta didática, contribui para a formação de significados, permitindo que os alunos avancem na formação de conceitos científicos.

Dessa forma, esta pesquisa visou contribuir para a inserção da física quântica no Ensino Médio ao desenvolver, aplicar e analisar uma sequência didática que articulou uma abordagem conceitual e atividades experimentais, com o objetivo de aproximar temas abstratos, como função de onda, interpretação probabilística e tunelamento quântico, da realidade dos estudantes. Tal proposta favoreceu a construção de significados pelos alunos,

ampliando as possibilidades de abordagens pedagógicas voltadas ao ensino de física quântica no Ensino Médio.

Na sequência, o texto está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 2 aborda a teoria da mediação de Vygotsky, o uso de analogias, os fundamentos conceituais da física quântica e uma revisão de estudos relacionados ao ensino dessa temática. O Capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa, detalhando o contexto investigado, o público participante, os instrumentos de coleta de dados e a organização da sequência didática. O Capítulo 4 analisa os resultados obtidos, em uma perspectiva qualitativa e interpretativa, com base nas produções escritas e nas ações dos estudantes. Por fim, o Capítulo 5 reúne as considerações finais, ressaltando as contribuições do estudo, bem como suas limitações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os referenciais teóricos e conceituais que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho, contemplando discussões sobre a teoria da mediação de Vygotsky e suas contribuições para a aprendizagem de conceitos científicos, especialmente no que se refere ao papel da interação social, da linguagem e da Zona de Desenvolvimento Proximal. Também são abordadas as potencialidades do ensino por analogias, bem como suas limitações e os modelos instrucionais que orientam sua aplicação em sala de aula, como o Guia FAR. Além disso, são discutidos aspectos históricos e conceituais da física quântica, incluindo a estrutura atômica, as evidências experimentais que motivaram o modelo de Bohr, os conceitos de dualidade onda-partícula, função de onda, interpretação probabilística, confinamento quântico e o fenômeno de tunelamento, destacando algumas de suas aplicações tecnológicas. Por fim, são apresentados estudos correlatos sobre o ensino de física quântica, com o objetivo de situar a pesquisa no contexto das investigações já desenvolvidas na área.

2.1 Teoria da mediação de Vygotsky

Lev Semionovich Vygotsky nasceu em 1896, na cidade de Orsha, localizada na atual Belarus. Formou-se em Direito pela Universidade de Moscou e, posteriormente, passou a se interessar pela área da medicina, realizando estudos no Instituto Médico de Moscou. Faleceu precocemente, aos 38 anos, vítima de tuberculose, deixando uma vasta e significativa obra. Seus estudos, no entanto, só começaram a ser amplamente conhecidos e divulgados no Ocidente a partir de 1962 (Gaspar, 2014 e Moreira, 1999).

Segundo Moreira (1999), Vygotsky parte do pressuposto de que o desenvolvimento cognitivo não pode ser compreendido sem referência ao contexto social, histórico e cultural. Diferentemente dos teóricos cognitivistas, ele não centra sua análise no indivíduo de forma isolada, mas enfatiza a interação social como elemento central do processo de desenvolvimento e de construção do conhecimento.

De acordo com Vygotsky (2007), um dos principais marcos do desenvolvimento intelectual humano ocorre quando a fala e a atividade prática, que nos primeiros anos da criança se desenvolvem como linhas independentes, passam a convergir. Essa convergência marca o surgimento de formas de pensamento exclusivamente humanas, nas quais a linguagem assume papel fundamental na organização das ações e dos processos cognitivos.

Segundo, Vygotsky (2001), Piaget revolucionou o estudo do pensamento e da linguagem da criança ao propor o método clínico como forma de investigação do desenvolvimento cognitivo infantil. Para Piaget, a linguagem da criança é inicialmente egocêntrica e, no discurso egocêntrico, a criança fala para si mesma, sem se preocupar em adaptar sua fala a um interlocutor, uma vez que seu pensamento é predominantemente egocêntrico. À medida que a criança avança em seu desenvolvimento cognitivo e amplia suas interações sociais, a linguagem passa a assumir uma função comunicativa mais clara, o que leva à redução progressiva da fala egocêntrica, sendo esta gradualmente substituída pela linguagem socializada.

Entretanto, para Vygotsky (2001), ocorre o inverso do que propunha Piaget: a fala mais primitiva da criança é essencialmente social, pois se origina na interação com o outro. O discurso egocêntrico emerge posteriormente como uma etapa de transição, quando a criança passa a internalizar as formas de linguagem social, transferindo-as para a esfera das funções psíquicas internas. Nesse sentido, a fala egocêntrica não desaparece, mas se transforma em fala interior, desempenhando papel fundamental na organização do pensamento e no desenvolvimento da linguagem.

Além disso, para Vygotsky (2007), antes de adquirir o controle sobre o próprio comportamento, a criança utiliza a fala como instrumento para regular o ambiente ao seu redor, estabelecendo uma nova relação tanto com o meio quanto com suas próprias ações. Posteriormente, esse processo contribui para o desenvolvimento do intelecto. Nesse contexto, a fala desempenha um papel fundamental na resolução de tarefas, auxiliando a criança na organização de suas ações e de seus processos de pensamento. Neste sentido:

a fala da criança é tão importante quanto a ação para atingir um objetivo. As crianças não ficam simplesmente falando o que elas estão fazendo; sua fala e ação fazem parte de uma mesma função psicológica complexa, dirigida para a solução do problema em questão (Vygotsky, 2007, p.13).

O processo de internalização da fala é essencial para o pensamento abstrato. Para Vygotsky a linguagem constitui o mais importante sistema de signos. Primeiro ela ocorre em nível social e depois em nível individual. Através da mediação o indivíduo transforma as relações sociais em funções mentais. Essa mediação acontece pelo uso de instrumentos e signos. Os instrumentos são meios orientados externamente, utilizados pelo ser humano para agir sobre o ambiente e dominar a natureza, mediando a relação entre o sujeito e o mundo externo. Já os signos são orientados internamente e atuam sobre o próprio sujeito,

possibilitando o controle consciente do comportamento, a organização do pensamento e a autorregulação das ações. Para a aquisição dos signos, o ser humano precisa apropriar-se dos significados já construídos socialmente. Nesse processo, a interação social desempenha papel central, pois é por meio dela que os significados culturais são compartilhados, compreendidos e, posteriormente, internalizados. Para Vygotsky, a aprendizagem impulsiona o desenvolvimento. Um de seus principais conceitos é a Zona de Desenvolvimento Proximal, definida como a distância entre o nível de desenvolvimento real, correspondente ao que o indivíduo consegue realizar de forma independente, e o nível de desenvolvimento potencial, que se refere ao que ele é capaz de realizar com o auxílio de um adulto ou de pares mais experientes (Moreira, 1999).

Segundo o próprio Vygotsky (2007), a Zona de Desenvolvimento Proximal pode ser definida como aquelas funções que ainda se encontram em processo de desenvolvimento, em uma espécie de fase embrionária. Além disso, através da Zona de Desenvolvimento Proximal, professores e psicólogos podem compreender os ciclos de desenvolvimento já completados e aqueles que ainda se encontram em processo de maturação.

Para que o ensino seja potencialmente eficaz, ele deve ocorrer no interior da Zona de Desenvolvimento Proximal, uma vez que o trabalho apenas com conteúdos já consolidados não promove novos avanços cognitivos, nem impulsiona o desenvolvimento do aluno além de seu nível atual de compreensão, limitando-se à repetição de habilidades já dominadas (Moreira, 1999).

As ideias de Vygotsky sobre a aquisição de conceitos apresentam notável relevância no contexto escolar. Nesse sentido, parte-se:

Como princípio básico de uma pedagogia de inspiração vigotskiana, que todo conteúdo de ciências humanas, exatas, biológicas pode ser ensinado e aprendido por meio de variadas estratégias pedagógicas, desde que elas possibilitem o desencadeamento de interações sociais, da quais participe o professor ou, eventualmente, outro parceiro mais capaz que domine cognitivamente o conteúdo que é o objeto de ensino dessa interação (Gaspar, 2014, p.209).

No contexto escolar, o professor exerce um papel fundamental como mediador da aprendizagem. Essa mediação ocorre na Zona de Desenvolvimento Proximal, favorecendo o desenvolvimento de capacidades que o estudante ainda não domina de forma independente (Moreira, 1999).

As atividades experimentais também têm um papel importante dentro da pedagogia inspirada na teoria de Vygotsky. Sendo assim, é indicado que a atividade aconteça sob a orientação de alguém que domine o conteúdo. Além disso, a função de planejamento/escolha da atividade é desse alguém mais experiente. Porém, nem sempre é uma tarefa fácil e essa decisão vai depender do tempo, materiais disponíveis, habilidades para a construção e realização de teste antes para garantir que não haverá nenhum erro e cause frustração no aluno (Gaspar, 2014).

Em resumo, podem ser identificados três tipos de atividades experimentais dentro da pedagogia vigotskiana: demonstrações experimentais, atividades experimentais em grupo e atividades experimentais de longa duração (Gaspar, 2014).

As demonstrações experimentais são indicadas quando se utilizam aparatos de difícil montagem ou de alto custo. Esse tipo de prática torna-se especialmente interessante quando possui menor duração, possibilitando maior tempo para o estabelecimento de interações sociais entre professor e alunos. As atividades experimentais em grupo são recomendadas quando os equipamentos são de fácil manipulação e podem ser operados pelos alunos com relativa autonomia. Nesses casos, o uso de roteiros orientadores é essencial, uma vez que se torna difícil para o professor acompanhar simultaneamente todos os grupos. Além disso, as interações sociais podem ser estimuladas a partir de questões e problematizações propostas nesses roteiros. Além disso, destaca-se ainda atividades experimentais de longa duração, que exigem um acompanhamento mais contínuo por parte do professor. Nessa modalidade, é fundamental que o docente monitore todo o processo experimental, inclusive quando houver a necessidade de realização de atividades extraclasse (Gaspar, 2014).

Diante do exposto, a teoria da mediação de Vygotsky fornece importantes fundamentos para a compreensão dos processos de ensino e aprendizagem no contexto escolar, ao conceber o desenvolvimento cognitivo como um fenômeno social, histórico e culturalmente mediado. A pedagogia de inspiração vigotskiana destaca a importância de estratégias didáticas que promovam a interação social, a construção compartilhada de significados, elementos essenciais para a aprendizagem de conceitos científicos abstratos. Nesse sentido, o ensino de física quântica demanda uma mediação pedagógica cuidadosa, na qual o professor assume papel central como mediador entre a cultura científica e o aluno, organizando situações de aprendizagem que se desenvolvam no interior da Zona de Desenvolvimento Proximal. Assim, o professor contribui para a internalização dos conceitos

quânticos, possibilitando que os estudantes avancem do nível de compreensão intuitiva para formas mais elaboradas de pensamento científico.

Considerando a importância da mediação na construção do conhecimento, torna-se relevante discutir recursos didáticos que favoreçam a atribuição de significados aos conceitos científicos. Nesse contexto, destacam-se as analogias, tema abordado na próxima seção.

2.2 Ensino por analogia

A analogia é definida no dicionário como uma relação de semelhança entre fatos ou coisas. Segundo Duarte (2005), as primeiras teorias sobre analogias surgiram na Grécia clássica e são associadas a Aristóteles. Para o filósofo Aristóteles, a ideia de analogia está ligada a uma noção de proporção matemática (Zingano, 2013). De acordo com Glynn (1994), uma analogia é construída a partir da identificação de semelhanças entre dois conceitos: o análogo, que corresponde ao conceito já conhecido, e o alvo, que se refere ao conceito ainda não familiar. Quando o análogo e o alvo compartilham características comuns, elementos do conceito conhecido podem ser transferidos para a compreensão do conceito desconhecido. Trata-se de uma prática bastante comum, utilizada tanto em livros didáticos quanto na atuação dos professores em sala de aula.

As analogias são utilizadas no ensino de ciências pelos professores para facilitar a compreensão de conceitos considerados difíceis e abstratos (Almeida e Diniz, 2022). Segundo Duarte (2005) existem potencialidades relacionadas ao uso do ensino por analogias:

1. Levam à activação do raciocínio analógico, organizam a percepção, desenvolvem capacidades cognitivas como a criatividade e a tomada de decisões;
2. Tornam o conhecimento científico mais inteligível e plausível, facilitando a compreensão e visualização de conceitos abstratos, podendo promover o interesse dos alunos;
3. Constituem um instrumento poderoso e eficaz no processo de facilitar a evolução ou a mudança conceptual;
4. Permitem perceber, de uma forma mais evidente, eventuais concepções alternativas;
5. Podem ser usadas para avaliar o conhecimento e a compreensão dos alunos. (Duarte, 2005, p. 11 - 12).

Entretanto, toda analogia apresenta limites e falha em algum ponto (Glynn, 1994). Por isso, seu uso em contextos educativos exige planejamento cuidadoso por parte dos professores, que precisam avaliar até que ponto a analogia contribui para a compreensão e onde ela pode gerar interpretações equivocadas (Almeida e Diniz, 2022). Muitas vezes, o

aluno não possui base para compreender conteúdos mais complexos e uma forma de o professor enfrentar esse desafio é estabelecer uma relação entre um conceito já conhecido e outro ainda desconhecido. No entanto, é necessário que o professor busque um análogo familiar ao aluno. O análogo e o alvo compartilham certos atributos, o que possibilita a identificação de semelhanças que facilitam a construção do novo conceito. Contudo, para que a analogia seja realmente eficaz, é essencial mapear cuidadosamente tanto as semelhanças quanto às diferenças entre os dois elementos (Aubusson, Treagust e Harrison, 2009).

Para que o uso de analogias seja relevante para o maior número possível de alunos, é necessário um planejamento cuidadoso. Nesse contexto, a necessidade de orientar os professores quanto ao uso apropriado das analogias levou ao desenvolvimento de modelos instrucionais específicos. Dentre esses modelos, destaca-se o Teaching-With-Analogies (TWA), proposto por Glynn na década de 1990, que apresenta um conjunto de etapas para orientar o uso de analogias no ensino de Ciências. Segundo Treagust, Harrison e Venville (1998), esse modelo é considerado apropriado para o ensino de Ciências por oferecer uma estrutura que auxilia o professor na seleção e na apresentação de analogias. Entretanto, os autores também ressaltam que o TWA pode ser difícil de ser implementado, pois ele é composto de muitas etapas para serem desenvolvidas em um tempo limitado de aula e turmas heterogêneas. Diante dessas dificuldades, Treagust, Harrison e Venville (1998), e a partir de análises críticas do uso de analogias em sala de aula e das limitações observadas na aplicação do TWA, desenvolveram o Guia FAR, cujo propósito é auxiliar o professor a potencializar os benefícios das analogias e a reduzir suas limitações por meio de um planejamento sistematizado. O Guia FAR organiza o uso das analogias em três etapas: Foco, Ação e Reflexão — conforme descrito a seguir:

Foco refere-se ao momento em que o professor identifica quais aspectos do conteúdo são difíceis de explicar ou de serem compreendidos pelos alunos. Diante dessa dificuldade, ele decide utilizar a analogia como um recurso pedagógico para facilitar a aprendizagem e ainda precisa verificar se os alunos possuem alguma familiaridade sobre o análogo escolhido.

Ação corresponde à apresentação da analogia em sala de aula. Normalmente acontece em três etapas (A) familiaridade - quando o professor presta uma atenção cuidadosa se os alunos compreendem bem a analogia escolhida; (B) mapeamento - quando se estabelece correspondências entre os atributos compartilhados pelo análogo e pelo alvo; (C) momento

em que se explicitam as diferenças entre o análogo e o alvo, evidenciando onde a analogia falha.

Reflexão é o momento em que o professor avalia a utilidade da analogia. Essa etapa pode ocorrer antes, durante ou após a aula, e envolve refletir com clareza sobre a eficácia da analogia para promover a aprendizagem.

No contexto do ensino de física quântica, Hastenreiter (2015), em sua tese, desenvolveu um estudo de caráter empírico ao investigar o uso de analogias em atividades didáticas voltadas para o Ensino Médio. O autor analisa episódios de ensino relacionados a temas da física quântica, nos quais é possível identificar a presença de analogias utilizadas pelos professores.

Entre os exemplos discutidos, destaca-se a analogia entre os níveis de energia do modelo atômico de Bohr e uma pessoa subindo uma escada, na qual se considera que só é possível subir um degrau por vez, assim como, no modelo de Bohr, o elétron só pode ocupar determinados níveis discretos de energia. Outro exemplo refere-se à analogia com a chuva, utilizada para comparar a continuidade da luz quando observada à distância com sua descontinuidade quando analisada de perto, em que as gotas de chuva são associadas aos fótons.

Hastenreiter (2015), aponta que as analogias, embora constituam importantes ferramentas didáticas, podem tornar-se problemáticas no ensino da física quântica, uma vez que se apoiam em experiências do mundo macroscópico conhecido, estabelecendo relações que não encontram correspondência direta com o mundo quântico. Ainda assim, o autor defende que o uso de analogias é possível e produtivo, desde que seja cuidadosamente planejado e conduzido de maneira reflexiva, com a explicitação de seus limites. Nesse sentido, ressalta também a importância da formação e do treinamento dos professores para o uso consciente e crítico dessas estratégias no ensino da física quântica.

Sendo assim, o uso de analogias no ensino de Ciências configura-se como um recurso pedagógico relevante, ao possibilitar a articulação de conhecimentos familiares com conteúdos mais complexos, favorecendo a aprendizagem. Contudo, considerando que toda analogia apresenta limitações, torna-se indispensável um planejamento docente cuidadoso, que envolva a seleção criteriosa de análogos e a utilização de modelos instrucionais que

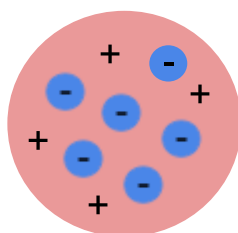
orientem seu uso. A seguir, serão apresentados os fundamentos históricos e teóricos da física quântica.

2.3 Limitações da Física Clássica e o Surgimento dos Modelos Atômicos Pré-Bohr

Em 14 de dezembro de 1900, Max Planck apresentou à Sociedade Alemã de Física o artigo “*Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal*”. Embora, em um primeiro momento, esse trabalho não tenha despertado grande repercussão, essa data passou a ser reconhecida, posteriormente, como o marco inaugural da física quântica. Nos anos seguintes, diferentes desenvolvimentos teóricos e experimentais começaram a convergir, evidenciando as limitações da física clássica na descrição de certos fenômenos e apontando para a necessidade de uma nova estrutura teórica, que viria a se consolidar como a mecânica quântica (Eisberg; Resnick, 1994).

Um exemplo emblemático dessas limitações pode ser encontrado no estudo da estrutura atômica, cujos modelos clássicos mostraram-se incapazes de explicar de forma satisfatória a estabilidade da matéria. Nesse contexto, em 1897, J. J. Thomson descobriu o elétron, fornecendo as primeiras evidências de que o átomo não era indivisível. Posteriormente, em 1909, Robert Millikan realizou o experimento da gota de óleo, por meio do qual foi possível determinar a carga elétrica dessa partícula. Essas e outras evidências experimentais indicavam que o átomo continha partículas de carga negativa e que a maior parte de sua massa estava associada a uma região de carga positiva. Diante dessas observações, por volta de 1910, o modelo atômico mais aceito era o proposto por J. J. Thomson. Nesse modelo, o átomo era concebido como uma esfera constituída por uma substância de carga positiva, ainda desconhecida, na qual os elétrons estariam distribuídos de maneira uniforme, de forma análoga às uvas-passas em um pudim (Figura 1) (Young; Freedman, 2016).

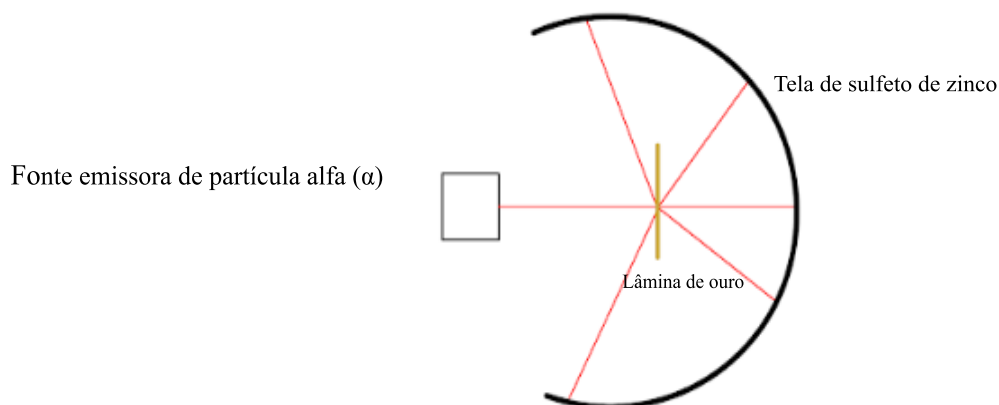
Figura 1: Representação esquemática do modelo atômico de Thomson ("pudim de passas").



Fonte: A autora.

Nesse mesmo ano Rutherford e dois de seus alunos, Hans Geiger e Ernest Marsden, na Universidade de Manchester, na Inglaterra, foram os pioneiros na realização de experimentos destinados a testar o modelo atômico de Thomson e investigar a estrutura interna do átomo. Esses experimentos consistiam em bombardear partículas alfa em lâminas finas de diferentes elementos, como ouro, cobre e prata, com feixes de partículas alfa que atravessavam a lâmina, observava-se pequenos clarões momentâneos atingindo uma tela coberta por sulfeto de zinco, que permitiam sua detecção. A figura 2 apresenta uma representação esquemática do experimento de Rutherford. Na época, embora a natureza das partículas alfa ainda não fosse completamente compreendida, já se sabia que elas eram emitidas por núcleos instáveis, possuíam carga positiva e se propagavam com velocidades da ordem de 10^7 m/s (Young; Freedman, 2016).

Figura 2: Representação esquemática do experimento de Rutherford.



Fonte: A autora.

Ao atravessar a lâmina metálica, o feixe de partículas alfa passa pelo interior dos átomos, interagindo tanto com os elétrons quanto com a distribuição de carga positiva. Como o átomo é eletricamente neutro, a força elétrica exercida sobre a partícula alfa deveria ser pequena. Além disso, o elétron possui massa muito menor que a da partícula alfa, o que implica que colisões com elétrons não seriam capazes de provocar deflexões significativas em sua trajetória (Young; Freedman, 2016).

Além disso, no modelo atômico previsto por Thomson, as cargas positiva e negativa estariam distribuídas de maneira uniforme ao longo do átomo. Dessa forma, o campo elétrico resultante no interior do átomo seria fraco, não sendo suficiente para causar grandes desvios nas partículas alfa. No entanto, os resultados experimentais obtidos por Rutherford mostraram

que, embora a maioria das partículas atravessasse a lâmina sem grandes desvios, uma pequena fração era defletida por ângulos muito grandes, chegando a valores próximos de 180° (Young; Freedman, 2016).

Os resultados experimentais observados só poderiam ser explicados se praticamente toda a carga positiva do átomo estivesse concentrada em uma região extremamente pequena. Nessa condição, essa região atuaria, para as partículas alfas incidentes, de forma semelhante a uma carga puntiforme, produzindo um campo elétrico suficientemente intenso para provocar grandes desvios em suas trajetórias (Young; Freedman, 2016).

A partir dessa observação, Rutherford propôs que a carga positiva é quase toda a massa do átomo (cerca de 99,95%) e estaria concentrada em uma pequena região central, à qual deu o nome de núcleo. Os elétrons, por sua vez, estariam distribuídos ao redor do núcleo, possivelmente em movimento orbital (Young; Freedman, 2016).

Entretanto, o modelo de Rutherford não explicava a estabilidade do átomo. De acordo com o eletromagnetismo clássico, uma carga elétrica acelerada em movimento oscilatório ou circular emite radiação eletromagnética. Assim, no caso do elétron no interior do átomo, que descreve um movimento com aceleração centrípeta em torno do núcleo, deveria emitir radiação continuamente. Caso isso realmente ocorresse, o elétron perderia energia de forma progressiva, reduzindo sua energia e, em uma fração de segundo, se chocando com o núcleo, no entanto, tal comportamento não é observado (Young; Freedman, 2016).

Diante dessas limitações, tornou-se necessária a criação de um novo modelo atômico que preservasse as evidências experimentais obtidas por Rutherford, mas que fosse capaz de explicar a estabilidade dos átomos. Isso foi possível a partir da incorporação de hipóteses que extrapolavam o domínio da física clássica, inicialmente postuladas no modelo de Bohr e, posteriormente, aprofundadas pelas ideias inovadoras de Louis de Broglie (Young; Freedman, 2016). A seguir trata-se dos modelos experimentais e teorias que motivaram o modelo de Bohr.

2.3.1 Evidências experimentais que fundamentaram os postulados de Bohr e o modelo atômico de Bohr

Materiais, quando aquecidos, emitem radiação luminosa; um exemplo clássico é o carvão em brasa, que passa a emitir uma luz de coloração alaranjada. Para analisar essa radiação, pode-se utilizar um prisma ou uma rede de difração (Young; Freedman, 2016).

Quando a radiação é proveniente de um sólido ou de um líquido aquecido, observa-se a formação de um espectro contínuo. Isso ocorre porque, nesses estados físicos, as partículas encontram-se muito próximas umas das outras, interagindo intensamente. Essas interações fazem com que os níveis de energia eletrônicos não sejam bem definidos, formando faixas de energia quase contínuas, o que permite a emissão de radiação em uma ampla gama de comprimentos de onda. (Eisberg; Resnick, 1994).

Já quando a matéria se encontra no estado gasoso excitado, os átomos ou moléculas estão, em média, muito afastados entre si e podem ser considerados praticamente isolados. Nessa condição, os níveis de energia são bem definidos, e as transições eletrônicas ocorrem apenas para valores específicos de energia, resultando em um espectro discreto, caracterizado por linhas bem definidas. Observa-se, ainda, que um gás frio absorve radiação apenas em comprimentos de onda específicos, correspondentes às mesmas linhas observadas em seu espectro de emissão (Eisberg; Resnick, 1994).

As linhas espectrais mostraram-se de grande utilidade para a ciência, pois, por meio de sua análise, tornou-se possível identificar a composição química de estrelas e outros corpos celestes. Entretanto, apesar de sua importância experimental, esses espectros eram um enigma para os cientistas da época, que não compreendiam por que os átomos emitiam e absorviam radiação somente em determinados comprimentos de onda (Young; Freedman, 2016).

O modelo proposto por Thomson servia para explicar a origem das linhas espectrais. De acordo com seu modelo, quando um gás era excitado, os elétrons oscilavam em torno de suas posições de equilíbrio com frequências específicas, emitindo radiação com essas mesmas frequências. Da mesma forma, quando iluminados, esses elétrons absorviam radiação cujas frequências coincidissem com suas frequências naturais de oscilação (Young; Freedman, 2016).

No entanto, Rutherford e seus colaboradores obtiveram resultados experimentais significativamente diferentes. Apesar dos resultados relevantes obtidos por Rutherford, seu modelo atômico não era capaz de explicar a origem das linhas espectrais observadas experimentalmente. Em seu modelo planetário, ele sugeriu que os elétrons orbitam do núcleo e, portanto, encontram-se em movimento acelerado devido à aceleração centrípeta. Segundo a física clássica, cargas elétricas aceleradas emitem radiação eletromagnética, cuja frequência estaria relacionada às características do movimento orbital do elétron. Como consequência dessa emissão contínua de radiação, os elétrons deveriam perder energia progressivamente, alterando continuamente seu movimento orbital e assim sua frequência. Esse processo implicaria a emissão de um espectro contínuo (Young; Freedman, 2016).

Com base nos conhecimentos já estabelecidos sobre as linhas espectrais, era preciso estabelecer um modelo atômico que explicasse esse comportamento. Então em 1913, o físico dinamarquês, Niels Bohr, elaborou uma hipótese inovadora para a estrutura atômica incorporando a quantização da energia proposta por Max Planck e o conceito de fóton introduzido por Albert Einstein na estrutura atômica.

O conceito de quantização da energia teve início a partir das ideias de Max Planck, propostas para explicar o comportamento do espectro de radiação emitido por um corpo negro.

Segundo a teoria da radiação do corpo negro, um corpo pode absorver e emitir radiação eletromagnética de acordo com sua temperatura. À medida que a temperatura de um corpo aumenta, a radiação emitida sofre uma alteração em seu espectro: inicialmente, a emissão ocorre em comprimentos de onda maiores, região do infravermelho e, com o aumento da temperatura, passa a incluir luz visível e o ultravioleta (Eisberg; Resnick, 1994).

Para investigar o comportamento da radiação térmica emitida pela matéria, foi introduzido o modelo ideal de corpo negro, definido como um sistema capaz de absorver toda a radiação eletromagnética incidente e tem reflexão nula. Uma realização prática desse modelo consiste em uma cavidade com uma pequena abertura em um objeto opaco, na qual a radiação que penetra sofre sucessivas reflexões nas paredes internas, sendo praticamente toda absorvida. Nessas condições, a radiação emitida pela abertura apresenta um espectro contínuo que depende exclusivamente da temperatura do sistema, independentemente da composição

material das paredes da cavidade, tornando o corpo negro um referencial fundamental para o estudo da radiação térmica (Eisberg; Resnick, 1994).

No âmbito da física clássica, os modelos conseguiam descrever satisfatoriamente o comportamento do espectro de radiação do corpo negro apenas na região de comprimentos de onda longos. Contudo, ao serem aplicados à região dos comprimentos de onda curtos, especialmente no ultravioleta, esses modelos previam uma “explosão” da energia da região nesta região, contrastando com os dados experimentais observados, onde a energia deveria cair. Essa inconsistência teórica, ficou conhecida como a catástrofe do ultravioleta (Eisberg; Resnick, 1994).

A superação desse impasse ocorreu a partir dos esforços de Max Planck em obter uma expressão matemática que estivesse de acordo com os dados experimentais do espectro de radiação do corpo negro. Para alcançar esse resultado, Planck introduziu uma hipótese segundo a qual as cargas elétricas presentes nas paredes da cavidade, responsáveis pela emissão e absorção da radiação, não poderiam trocar energia de forma contínua, como previa a física clássica. Em vez disso, essa troca ocorreria apenas em quantidades específicas de energia. Assim, a diferença de energia emitida ou absorvida por esses osciladores, em valores sucessivos possíveis de energia, deveria satisfazer a relação:

$$\Delta E = h\nu \quad (2.1)$$

onde h é a constante de Planck e vale ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ joules.segundo) e ν a frequência da radiação. Embora inicialmente formulada como uma hipótese de caráter matemático, essa proposta representou uma ruptura com a física clássica e estabeleceu o conceito de quantização da energia, que mais tarde seria reinterpretado e aprofundado com a introdução do conceito de fóton (Young; Freedman, 2016).

A quantização da energia forneceu a base conceitual para avanços posteriores. A partir dessa ideia, Albert Einstein, em 1905, estendeu esse conceito à radiação eletromagnética.

Einstein, propôs que a radiação eletromagnética é composta por pacotes discretos de energia. Segundo essa proposta, a radiação eletromagnética pode ser descrita como um feixe de quanta de energia, que recebeu o nome de fótons. Os fótons apresentam um comportamento dual, manifestando propriedades tanto de onda quanto de partícula, dependendo do fenômeno analisado. Um aspecto fundamental dessa descrição é que a

interação entre a radiação e a matéria ocorre de forma quantizada, isto é, a energia associada a um fóton com frequência ν é transferida de maneira em valor específico, sendo absorvida ou emitida integralmente, de acordo com a relação (equação 2.1), proposta por Planck, sendo sua energia dada por:

$$E = h\nu \quad (2.2)$$

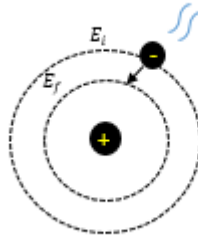
Foi então em 1913, que Niels Bohr trabalhando na Universidade de Manchester com Rutherford, propôs um modelo atômico que revolucionou as ideias do século XIX ao incorporar o conceito quantização da energia e do fóton a um modelo essencialmente clássico (Young; Freedman, 2016).

Bohr estabeleceu que os elétrons movem-se ao redor do núcleo do átomo sob a influência da força coulombiana, obedecendo as leis da física clássica. No entanto, ele introduziu uma hipótese inovadora ao afirmar que o elétron não pode ocupar quaisquer órbitas, mas apenas órbitas permitidas, nas quais o momento angular orbital é quantizado e um múltiplo inteiro de $\frac{h}{2\pi}$ (Eisberg; Resnick, 1994).

Nessas órbitas, embora o elétron esteja em movimento acelerado, não ocorre emissão de radiação eletromagnética, contrariando as previsões da física clássica. A radiação é emitida ou absorvida apenas quando o elétron realiza uma transição entre dois níveis de energia permitidos (Eisberg; Resnick, 1994).

Quando o elétron passa de um estado de maior energia para um estado de menor energia, ocorre a emissão de radiação na forma de um fóton. Também pode ocorrer de o elétron absorver um fóton e realizar uma transição para um nível de energia mais elevado. O módulo da diferença de energia entre os níveis corresponde exatamente à energia do fóton que é absorvido ou emitido pelo átomo durante a transição eletrônica entre dois estados permitidos. A Figura 3 ilustra a transição de um elétron de um nível mais energético para um nível menos energético, acompanhada da emissão de um fóton.

Figura 3: Representação esquemática da transição eletrônica de um nível de maior energia para um nível de menor energia, com emissão de um fóton.



Fonte: A autora.

Portanto, o módulo da diferença de energia entre dois níveis envolvidos em uma transição eletrônica é dada por:

$$|E_f - E_i| = h\nu \quad (2.3)$$

Como a frequência da radiação eletromagnética relaciona-se com a velocidade da luz no vácuo c e o comprimento de onda λ , pela relação: $\nu = \frac{c}{\lambda}$. Sendo assim, a equação (3) pode ser reescrita como:

$$\Delta E = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.4)$$

Suas ideias sobre a quantização dos níveis de energia e as transições eletrônicas acompanhadas pela emissão ou absorção de fótons forneceram uma base conceitual importante para o entendimento das linhas espectrais discretas e para a estabilidade do átomo. Contudo, o modelo de Bohr forneceu previsões precisas apenas sobre os níveis de energia para o átomo de hidrogênio, de estrutura mais simples, tendo um elétron e um próton.

Desse modo, para dar explicações ainda mais precisas sobre o átomo, torna-se necessário abandonar a concepção clássica do elétron como uma partícula que orbita o núcleo em trajetórias bem definidas e passar a compreendê-lo a partir de uma descrição ondulatória. Essa mudança de paradigma foi proposta por Louis de Broglie, ao introduzir a hipótese de que toda partícula material possui propriedades ondulatórias associadas. Veja no próximo tópico.

2.3.2 Ondas de matéria

Em 1924, Louis de Broglie apresentou uma proposta inovadora ao estender o conceito de dualidade onda-partícula, até então restrito à radiação eletromagnética. Já se reconhecia que o fóton poderia manifestar comportamento ondulatório ou corpuscular, dependendo do arranjo experimental. Baseando-se na ideia de que a natureza apresenta simetrias fundamentais, De Broglie propôs que partículas materiais, como os elétrons, também deveriam exibir propriedades ondulatórias em determinadas condições (Young; Freedman, 2016).

Para De Broglie a energia da matéria quanto a da radiação estão relacionadas à frequência e à constante de Planck, pela relação:

$$E = h\nu \quad (2.5)$$

De Broglie estabeleceu uma relação entre o comprimento de onda associado a uma partícula material de massa m e velocidade v , a constante de Planck h e o seu momento linear p , expressa por:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (2.6)$$

Essa hipótese permitiu reinterpretar o movimento do elétron no átomo como sendo associado a uma onda estacionária, cujo comprimento de onda se ajusta à geometria da órbita circular em torno do núcleo (Young; Freedman, 2016).

Anteriormente, Bohr, havia introduzido de forma postulatória a quantização do momento angular orbital do elétron, assumindo que apenas determinados valores discretos seriam permitidos. Essa condição é expressa pela relação:

$$l = mv r_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (2.7)$$

onde l é o momento angular, m a massa do elétron e r o raio da órbita circular.

A introdução das ondas estacionárias de De Broglie forneceu uma fundamentação física para esse postulado. Diferentemente da descrição clássica, tais ondas não irradiam energia, o que está em consonância com a estabilidade das órbitas estacionárias previstas por Bohr (Young; Freedman, 2016).

Dentro das ideias de De Broglie para que a onda associada ao elétron seja estacionária em uma órbita circular de raio r , é necessário que o comprimento da circunferência seja igual um número inteiro de comprimentos de onda, isto é:

$$2\pi r_n = n \lambda \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

substituindo a expressão do comprimento de onda de De Broglie $\lambda = \frac{h}{mv}$, obtém-se:

$$2\pi r_n = n \frac{h}{mv}$$

reorganizando os termos, chega-se a:

$$mvr_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (2.8)$$

que coincide com a condição de quantização do momento angular (equação 2.7) introduzida no modelo de Bohr, evidenciando a coerência entre a hipótese ondulatória de De Broglie e os postulados do modelo atômico de Bohr (Young; Freedman, 2016).

Anos mais tarde, a proposta revolucionária de Louis de Broglie acerca da natureza ondulatória da matéria foi confirmada experimentalmente. Em 1927, Davisson e Germer observaram a difração de elétrons por um cristal de níquel, e independentemente por G. P. Thomson, ao estudar a difração de elétrons transmitidos por filmes metálicos finos. Nessa abordagem, o arranjo periódico dos átomos em um sólido atua como uma rede de difração, provocando a dispersão do feixe de elétrons e a formação de padrões de interferência característicos de fenômenos ondulatórios. Esses resultados forneceram uma forte evidência experimental da validade da hipótese de De Broglie e consolidaram o conceito de dualidade onda-partícula da matéria (Eisberg; Resnick, 1994).

Sendo assim, a hipótese de De Broglie estabeleceu que o elétron apresenta um comportamento dual, manifestando propriedades tanto de partícula quanto de onda, o que representou um avanço decisivo na descrição quântica da matéria. No contexto da mecânica quântica, essa abordagem está intimamente associada ao Princípio da Incerteza de Heisenberg, segundo o qual não é possível determinar simultaneamente, com precisão arbitrária, a posição e o momento de uma partícula quântica. Como consequência, o conceito

clássico de órbita eletrônica perde validade, sendo substituído por uma descrição probabilística (Young; Freedman, 2016).

Essa nova perspectiva exigiu uma formulação matemática capaz de descrever a evolução espacial e temporal da onda associada à partícula. Tal descrição é fornecida pela função de onda, introduzida no formalismo da mecânica quântica por meio da equação de Schrödinger. Veja a seguir.

2.3.3 Função de onda

Com o constante desenvolvimento da mecânica quântica, tornou-se necessária uma reformulação na descrição do comportamento das partículas. Embora a hipótese de De Broglie já atribuísse caráter ondulatório às partículas materiais, essa ideia estava inserida no modelo atômico de Bohr, no qual o elétron era descrito por órbitas bem definidas, interpretadas como ondas estacionárias. No entanto, essa concepção mostrou-se incompatível com o Princípio da Incerteza de Heisenberg, que impede a determinação simultânea e precisa da posição e do momento da partícula. Assim, a noção de trajetória eletrônica perde validade, sendo substituída por uma nova descrição quântica baseada na função de onda.

A função de onda, usualmente representada por $\Psi(x, t)$, é uma entidade matemática que contém toda a informação acessível sobre o estado físico de um sistema quântico. Diferentemente da mecânica clássica, em que é possível determinar, por exemplo, posições e velocidades futuras antes mesmo de realizar uma medida, na mecânica quântica o que se pode obter é uma distribuição de probabilidade, ou seja, regiões mais prováveis de se encontrar uma partícula em um instante t . A grandeza física só se revela de forma concreta após a realização da medida (Young; Freedman, 2016).

Para ilustrar essa descrição quântica, considera-se inicialmente o caso idealizado de uma partícula livre, nesse caso, as soluções da equação de Schrödinger assumem a forma de ondas planas caracterizadas por terem comprimento de ondas e frequência bem definidas e podem ser escritas na forma exponencial complexa:

$$\Psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)} \quad (2.9)$$

onde A é uma constante de normalização, k é o número de onda e ω é a frequência angular. Essa representação é matematicamente equivalente a uma combinação linear de funções seno

e cosseno, conforme a fórmula de Euler, e apresenta vantagens operacionais no cálculo de derivadas (Young; Freedman, 2016).

Derivando a função de onda (equação 2.9) em relação à posição, obtém-se:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = ik A e^{i(kx - \omega t)} = ik\Psi$$

Derivando novamente em relação a x:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial^2 x} = i^2 k^2 A e^{i(kx - \omega t)} = -k^2 \Psi \quad (2.10)$$

Derivando a função de onda em relação ao tempo:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = i\omega A e^{i(kx - \omega t)} = i\omega \Psi \quad (2.11)$$

Agora é necessário introduzir algumas relações fundamentais propostas por De Broglie e pela teoria de Einstein–Planck, que conectam as grandezas ondulatórias às grandezas físicas da partícula:

Momento de De Broglie:

$$p = \hbar k \quad (2.12)$$

Energia de (einsteins-planck) :

$$E = \hbar \omega \quad (2.13)$$

onde p é o momento linear da partícula, E é sua energia total e $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ é a constante de Planck reduzida.

Substituindo a equação 2.12 na equação 2.10, a derivada espacial pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial^2 x} = - \frac{p^2}{\hbar^2} \Psi \quad (2.14)$$

Da mesma forma substituindo a equação 2.13 na equação 2.11 a derivada temporal torna-se:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = - \frac{iE}{\hbar} \Psi \quad (2.15)$$

Essas expressões motivam a introdução dos operadores quânticos associados ao momento e à energia, definidos como:

operador para o momento

$$\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \quad (2.16)$$

operador para a energia

$$\hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad (2.17)$$

Para uma partícula livre, a energia é puramente cinética é dada, na mecânica clássica, por:

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad (2.18)$$

Ao promover as grandezas clássicas e os operadores quânticos (equações 2.16 e 2.17) e aplicá-los à função de onda (equação 2.9), obtém-se:

$$\hat{E} \psi = \frac{\hat{p}^2}{2m} \psi \quad (2.19)$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.20)$$

A equação fundamental da mecânica quântica para uma partícula livre, conhecida como equação de Schrödinger dependente do tempo é dada pela equação 2.20.

Em muitos sistemas físicos, o potencial que atua sobre a partícula não depende explicitamente do tempo. Nesses casos, a equação de Schrödinger pode ser escrita em uma forma simplificada, conhecida como equação de Schrödinger independente do tempo, dada por:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + V_{(x)} \psi(x) = E \psi(x) \quad (2.21)$$

A função de onda, por ser composta por partes real e imaginária, não admite uma interpretação física direta. Essa característica tornou sua compreensão conceitual particularmente desafiadora e deu margem a intensos debates acerca de seu significado físico

nos primórdios da mecânica quântica. A interpretação atualmente aceita foi proposta por Max Born, que atribuiu à função de onda um caráter essencialmente probabilístico.

Segundo a interpretação de Born, o módulo ao quadrado da função de onda, $|\psi_{(x,t)}|^2$, representa a densidade de probabilidade de se encontrar a partícula na posição x , no instante t . Assim, para uma partícula que se move ao longo do eixo x , a probabilidade de ela ser localizada no intervalo entre x e $x+dx$ é dada por $|\psi_{(x,t)}|^2 dx$. Essa interpretação marca uma ruptura conceitual profunda com a mecânica clássica, na qual as grandezas são determinísticas (Young; Freedman, 2016).

Para que essa interpretação probabilística seja fisicamente consistente, a função de onda deve satisfazer uma condição de normalização. Em particular, a integral da densidade de probabilidade sobre todo o espaço deve ser igual a um, isto é,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi_{(x,t)}|^2 dx = 1$$

Essa condição expressa o fato de que a probabilidade total de encontrar a partícula em algum ponto do espaço é de 100%, refletindo a certeza de que a partícula existe e deve estar localizada em algum lugar do espaço em um dado instante. Dessa forma, embora a mecânica quântica abandone a noção clássica de trajetória bem definida, ela fornece uma descrição completa e consistente do comportamento microscópico por meio de previsões probabilísticas rigorosamente fundamentadas (Young; Freedman, 2016).

Uma aplicação amplamente estudada da equação de Schrödinger independente do tempo é o problema da partícula confinada em uma caixa, que constitui um caso particular do poço de potencial infinito. Inicialmente, será analisado o modelo da partícula na caixa, por valor didático. Em seguida, será abordado o poço de potencial infinito, bem como o efeito túnel associado a esse tipo de potencial.

2.3.4 Modelo da Partícula em uma caixa e o Fenômeno do Tunelamento Quântico

Segundo os autores Young; Freedman (2016), modelo da partícula confinada em uma caixa descreve o movimento de uma partícula de massa m que se move em uma dimensão, restrita ao intervalo $0 < x < L$. O potencial associado ao sistema é definido como:

$$V(X) = \begin{cases} 0, & 0 < x < L, \\ \infty, & x \leq 0 \text{ ou } x \geq L. \end{cases}$$

O potencial infinito fora da caixa implica que a partícula não pode existir nessas regiões, tornando nula a probabilidade de encontrá-la fora do intervalo permitido. Como a função de onda deve ser contínua ela gera soluções possíveis para equação de Schrödinger, essa condição física impõe que ela também se anule nas fronteiras da região acessível à partícula, estabelecendo as condições de contorno

$$\psi(0) = 0 \quad \text{e} \quad \psi(L) = 0$$

somente para o interior da caixa onde o potencial é nulo $V(x) = 0$, resolve-se a equação de Schrödinger independente do tempo (equação 2.21) aplicada a partícula livre:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} = E\psi(x) \quad (2.22)$$

Multiplicando os dois lados da equação 2.22 por: $-\frac{2m}{\hbar^2}$

$$\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} E\psi(x)$$

$$\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi(x) = 0 \quad (2.23)$$

Agora, define-se $k^2 = \frac{2m E}{\hbar^2}$.

Substituindo o k^2 na equação (2.23), tem-se:

$$\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} + k^2 \psi(x) = 0 \quad (2.24)$$

Isolando a derivada de segunda ordem obtemos:

$$\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} = -k^2 \psi(x)$$

Observa-se que suas soluções devem possuir a propriedade de que a segunda derivada seja proporcional ao negativo da própria função, o que é satisfeito pelas funções seno e cosseno. Ou seja, a solução geral desta equação diferencial de segunda ordem é uma combinação linear de funções seno e cosseno,

$$\psi(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx) \quad (2.25)$$

onde A e B são constantes e $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$.

As condições de contorno, impostas nas fronteiras da caixa, devem ser satisfeitas pela solução obtida no interior. A condição $\psi_{(0)} = 0$ elimina o termo em cosseno, resultando em:

$$\psi(x) = A \sin(kx)$$

A aplicação da condição $\psi(L) = 0$, conduz à restrição:

$$\psi(L) = A \sin(kL)$$

Para que expressão não seja nula, $A \neq 0$, sendo então:

$$A \sin(kL) = 0$$

Essa condição é satisfeita quando:

$$kL = n\pi \quad n=1,2,3,\dots \quad (2.26)$$

Relembrando que $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$ e substituindo na equação 2.26, tem-se:

$$\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} L = n\pi$$

$$\left(\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} L\right)^2 = (n\pi)^2$$

Isolando a energia E obtém -se:

$$E = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$$

Conclui-se, portanto, que as condições de contorno impostas pelo confinamento da partícula restringem os valores possíveis da energia, que passa a assumir apenas valores discretos.

Com isso, a função de onda associada a cada nível de energia permitido assume a forma:

$$\psi(x) = A \sin(n\pi x/L)$$

De acordo com a interpretação probabilística proposta por Born, o módulo ao quadrado da função de onda representa a densidade de probabilidade de encontrar a partícula na posição x . Para que essa interpretação seja fisicamente consistente, a probabilidade total de encontrar a partícula no interior da caixa deve ser unitária, o que impõe a condição de normalização,

$$\int_0^L |\psi(x)|^2 dx = 1$$

substituindo $\psi(x) = A \sin(n\pi x/L)$, obtém-se:

$$A^2 \int_0^L \sin^2\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx = 1$$

$$A = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

resultando nas funções de onda normalizadas:

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

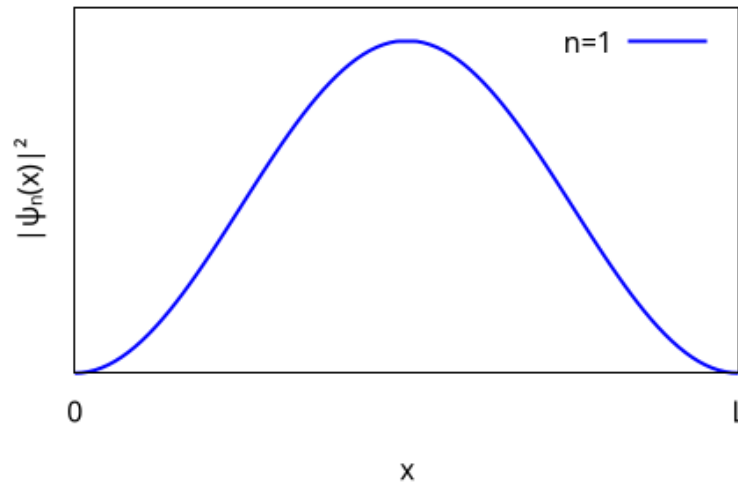
A densidade de probabilidade associada ao estado n é, portanto,

$$|\psi(x)|^2 = \frac{2}{L} \sin^2\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

essa expressão evidencia que a probabilidade de localização da partícula não é uniforme ao longo da caixa, apresentando máximos e mínimos espaciais bem definidos. A Figura 4

apresenta a densidade de probabilidade associada ao $n = 1$, no qual a partícula possui a menor energia permitida pelo sistema.

Figura 4: Densidade de probabilidade para o estado fundamental, $n = 1$, de uma partícula confinada em uma caixa de comprimento L .



Fonte: A autora.

O modelo da partícula confinada em uma caixa pode ser entendido como um caso particular de poço de potencial infinito. Em situações físicas mais realistas, entretanto, o confinamento não é absoluto. Uma generalização desse modelo é o poço de potencial finito, que apresenta maior aplicabilidade em sistemas reais, uma vez que o potencial externo possui altura finita.

Nesse caso, o potencial do poço de potencial finito pode ser escrito como:

$$V(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < L, \\ V_0, & x \leq 0 \text{ ou } x \geq L. \end{cases}$$

No interior do poço ($0 < x < L$), a equação de Schrödinger independente do tempo reduz-se a:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} = E \psi(x)$$

cuja solução possui caráter oscilatório.

Fora do poço, para energias $E < V_0$ a equação de Schrödinger assume a forma.

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} (V_0 - E\psi)(x) = 0$$

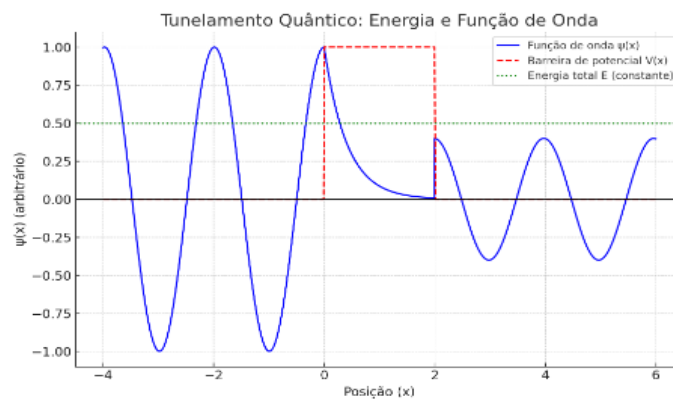
a qual conduz a soluções de caráter exponencial,

$$\psi(x) = C e^{kx} + D e^{-kx}$$

A existência dessas soluções exponenciais implica que a função de onda não se anula abruptamente nas fronteiras do poço de potencial, mas decai gradualmente nas regiões onde a energia da partícula é inferior ao valor do potencial. Como consequência, o módulo ao quadrado da função de onda nessas regiões é diferente de zero, indicando a existência de uma probabilidade não nula de a partícula ser encontrada além da barreira de potencial.

Essa característica diferencia o poço de potencial finito do poço de potencial infinito, no qual a função de onda se anula completamente fora da região de confinamento. A penetração da função de onda em regiões classicamente proibidas constitui a base para a compreensão de um importante fenômeno da mecânica quântica: o tunelamento quântico. Nesse fenômeno, a partícula pode atravessar regiões onde, segundo a física clássica, sua presença não seria permitida, devido ao fato de sua energia ser inferior ao potencial da barreira. A Figura 5 apresenta uma representação esquemática do comportamento da função de onda de uma partícula na presença de uma barreira de potencial, destacando uma penetração permitida na região classicamente proibida.

Figura 5: Tunelamento da partícula pela barreira de potencial.



Fonte: Gerada por IA-Chat Gpt.

O tunelamento quântico é um fenômeno que decorre diretamente da natureza ondulatória da matéria, prevista pela mecânica quântica. Ele ocorre quando uma partícula com

energia E menor que a altura da barreira de potencial V_0 apresenta uma probabilidade não nula de atravessar essa barreira, mesmo sendo esse processo proibido pela mecânica clássica, na qual a partícula seria totalmente refletida.

Esse comportamento está associado ao fato de que a função de onda não se anula no interior da barreira de potencial. Na região da barreira, a equação de Schrödinger admite soluções análogas às obtidas no poço de potencial finito, caracterizadas por um decaimento da função de onda ao longo da região proibida classicamente. Assim, embora a função de onda decaia dentro da barreira, ela não se anula, o que possibilita uma probabilidade não nula de encontrar a partícula do outro lado da barreira.

A probabilidade de tunelamento depende principalmente da largura da barreira e da diferença entre as energias da barreira e da partícula. Para uma barreira retangular, o coeficiente de transmissão T , que representa a probabilidade de a partícula atravessar a barreira, pode ser expresso como:

$$T = G e^{-2kl}, \text{ onde } G = 16 \frac{E}{U_0} \left(1 - \frac{E}{U_0}\right) \text{ e } k = \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar}$$

essa expressão evidencia que a probabilidade de tunelamento decresce exponencialmente com o aumento da largura da barreira e com o aumento da diferença entre V_0 e E (Young; Freedman, 2016).

Por fim, os modelos de confinamento quântico discutidos ao longo deste capítulo, embora idealizados, desempenharam um papel fundamental na fundamentação teórica e na consolidação do modelo atômico contemporâneo. Nesse modelo, o núcleo atômico é constituído por prótons e nêutrons, enquanto os elétrons encontram-se ligados ao núcleo pela interação eletrostática. O comportamento dos elétrons é descrito pela equação de Schrödinger, cujas soluções definem os orbitais atômicos, que, diferentemente da mecânica clássica, representam regiões do espaço onde a probabilidade de encontrar o elétron é maior, não devendo ser interpretados como trajetórias bem definidas.

O tunelamento quântico está presente em vários fenômenos da natureza sendo observado no microscópio de tunelamento por varredura, no processo de fusão nuclear no

interior do Sol e em dispositivos semicondutores, como o diodo túnel, que serão detalhados no próximo capítulo.

2.3.5 Semicondutores

Um semicondutor é um material que apresenta resistividade intermediária entre a de um condutor e a de um isolante. Do ponto de vista da teoria de bandas, sua banda de valência encontra-se completamente preenchida, enquanto a banda de condução está vazia a zero absoluto. Com o aumento da temperatura, a excitação térmica fornece energia suficiente para que alguns elétrons migrem da banda de valência para a banda de condução, tornando possível a condução elétrica (Young; Freedman, 2016).

A condutividade resultante desse processo é denominada condutividade intrínseca. No entanto, a condutividade dos semicondutores pode ser significativamente aumentada por meio da dopagem, que consiste na introdução controlada de impurezas no material puro. Por exemplo, a adição de uma pequena quantidade de arsênio ao germânio origina um semicondutor do tipo n , caracterizado pelo excesso de elétrons livres, enquanto a adição de gálio ao germânio resulta em um semicondutor do tipo p , no qual predominam lacunas como portadores de carga (Young; Freedman, 2016).

Um exemplo de dispositivo semicondutor formado pela junção de um material do tipo p com um material do tipo n é o diodo retificador. Esse dispositivo permite a passagem de corrente elétrica preferencialmente em um único sentido. Na interface entre as regiões p e n forma-se uma região denominada camada de depleção, que atua como uma barreira de potencial ao fluxo de portadores de carga.

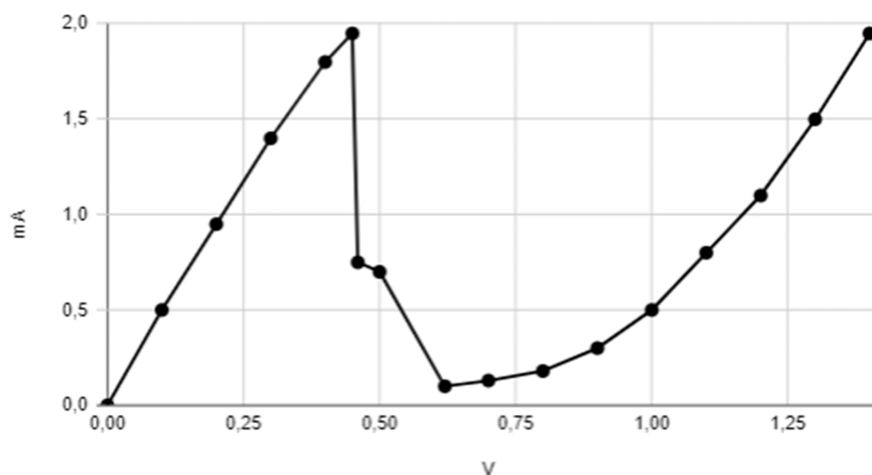
Quando o diodo é polarizado diretamente, com o polo positivo da fonte conectado à região do tipo p e o polo negativo à região do tipo n , ocorre uma redução da barreira de potencial da junção, possibilitando que a corrente elétrica flua com facilidade. Por outro lado, quando o diodo é polarizado inversamente, com o polo negativo conectado à região do tipo p e o polo positivo à região do tipo n , a barreira de potencial da junção p - n aumenta, ampliando a região de depleção e dificultando a passagem da corrente elétrica. Isso explica a condução em um único sentido.

O LED (diodo emissor de luz) também é um dispositivo semicondutor, constituído por uma junção p - n , capaz de emitir radiação luminosa. Quando o LED é submetido a uma

polarização direta, as lacunas são deslocadas em direção à região de junção a partir do lado *p*, enquanto os elétrons são atraídos a partir do lado *n*. Na região da junção ocorre a recombinação entre elétrons e lacunas, processo no qual a energia associada à transição eletrônica é liberada predominantemente na forma de fótons, caracterizando a emissão de luz (Young; Freedman, 2016).

Já o diodo túnel é um dispositivo semiconductor desenvolvido por Leo Esaki em 1958, sendo uma evidência experimental do fenômeno de tunelamento quântico. Desde sua descoberta, esses dispositivos têm sido amplamente estudados devido ao seu grande potencial em diversas aplicações tecnológicas, especialmente em circuitos de alta frequência. Uma das características mais notáveis do diodo túnel é sua curva de corrente por tensão, que apresenta uma região de “resistência elétrica negativa”, na qual o aumento da tensão resulta na diminuição da corrente. Essa propriedade única torna o diodo túnel particularmente interessante para aplicações em osciladores que operam em frequências superiores 10^{11} Hz. (Leão, 2009). A Figura 6 apresenta a curva característica do diodo túnel, construída a partir de dados obtidos experimentalmente pelos autores, utilizando o diodo túnel modelo AU301A.

Figura 6: Gráfico da corrente x tensão para o diodo túnel, obtido por meio do experimento.



Fontes: A autora.

O dispositivo é composto por uma junção p-n altamente dopada. A junção formada é estreita numa ordem de grandeza de 10^{-8} metros permitindo que os elétrons atravessem a banda proibida num processo de tunelamento quântico. À medida que uma tensão é aplicada ao semiconductor, a corrente de tunelamento aumenta. No entanto, quando a tensão continua a

subir, a corrente de tunelamento diminui devido à escassez de estados vazios disponíveis para os elétrons. Com tensões ainda mais altas, o diodo passa a se comportar com um diodo convencional, e os elétrons começam a ser difundidos através da junção em direção à banda de condução (Eisberg; Resnick, 1994).

Após a apresentação dos referenciais teóricos que fundamentam esta pesquisa, torna-se relevante analisar como o ensino de física quântica tem sido abordado em estudos anteriores. Nesse sentido, a próxima seção apresenta trabalhos correlatos, destacando propostas, metodologias e resultados encontrados na literatura da área.

2.4 Ensino de física quântica na educação básica

O ensino de física nas escolas exclui, muitas vezes, as grandes mudanças ocorridas no final do século XX. Os conteúdos abordados são, em geral, limitados ao período compreendido aproximadamente entre 1600 e 1850, com ênfase na física clássica, o que restringe a compreensão dos estudantes acerca dos avanços mais recentes da ciência e de suas aplicações no mundo contemporâneo (Terrazzan, 1992).

Neste contexto, Pinto e Zanetic (1999), destacam que diferentes frentes de pesquisa têm se dedicado ao ensino de física quântica, abrangendo discussões sobre os desafios de sua inserção na educação básica, bem como a elaboração de materiais didáticos, o desenvolvimento de atividades experimentais e a divulgação de propostas pedagógicas.

Dentre os estudos voltados à inserção da física quântica no Ensino Médio, destaca-se o trabalho de Fernanda Ostermann e Marco Antonio Moreira (Ostermann; Moreira, 2001), que discute a necessidade de atualização curricular no ensino de física. Os autores defendem que a escola de nível médio deve incorporar temas mais atuais da ciência, aproximando o conteúdo escolar dos avanços científicos e tecnológicos. Nesse contexto, a pesquisa buscou promover a inserção de tópicos de física contemporânea na formação inicial de professores, além de analisar as experiências desenvolvidas pelos estagiários e pelos alunos envolvidos no projeto e criação de materiais didáticos.

Para selecionar os conteúdos que seriam trabalhados, os pesquisadores utilizaram a técnica Delphi, um método de consulta estruturada a especialistas que busca alcançar consenso sobre determinado tema por meio de sucessivas rodadas de questionários.

Neste estudo Delphi, o levantamento foi realizado em três rodadas. Na primeira, os especialistas foram convidados a sugerir tópicos de física contemporânea que, em sua opinião, deveriam ser contemplados em uma atualização curricular para o Ensino Médio. Na segunda rodada, os participantes posicionaram-se em relação aos tópicos sugeridos anteriormente. Já na terceira, tiveram a oportunidade de revisar suas respostas e atribuir graus de prioridade aos temas propostos. Ao final do processo, foi obtida uma lista dos tópicos considerados mais relevantes para esse nível de ensino. A partir desse levantamento, foram selecionados dois temas: partículas elementares e supercondutividade.

A pesquisa foi desenvolvida com licenciandos do curso de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, participantes da disciplina de Prática de Ensino de Física. A estrutura da disciplina articulava momentos de formação teórica na universidade e atividades de estágio nas escolas. Na universidade os licenciandos participavam de aulas teóricas voltadas ao aprofundamento dos conteúdos e à organização das propostas didáticas e paralelamente durante o estágio assumiam a condução das turmas de Ensino Médio.

Um dos aspectos relevantes do estudo foi a elaboração de materiais didáticos, pôsteres e apresentações em PowerPoint específicos para os temas abordados, já que os pesquisadores identificaram a escassez de conteúdos acessíveis em língua portuguesa sobre os assuntos selecionados. O material didático foi utilizado pelos universitários durante a disciplina de Prática de Ensino de Física e posteriormente esse material foi adaptado para nível médio.

Para o tema partículas elementares, foi elaborado um texto de 69 páginas que aborda desde a evolução do conceito de átomo até o modelo padrão atual, incluindo discussões sobre interações fundamentais e leis de conservação. Além do conteúdo teórico, o material incluía exercícios e sugestões de atividades.

No caso da supercondutividade, foi produzido um texto de 74 páginas. O material apresentava aspectos históricos do fenômeno, propriedades básicas dos supercondutores, aplicações tecnológicas e conceitos relacionados à levitação magnética, dentre outros tópicos.

Outro ponto enfatizado na pesquisa foi a utilização de analogias como estratégia didática para facilitar a compreensão de conceitos abstratos. Entre os exemplos apresentados está a analogia do bumerangue para explicar as interações entre partículas. Esse aspecto evidencia a preocupação metodológica em adaptar conteúdos complexos à realidade cognitiva dos alunos.

O resultado da pesquisa foi obtido a partir de diferentes etapas: observação das aulas ministradas pelos estagiários pela professora de Práticas de Ensino, realização de entrevistas, análise de seus relatórios e aplicação de questionários aos estudantes do Ensino Médio. A partir desses procedimentos, verificou-se que os licenciandos reconhecem a importância da atualização curricular; no entanto, relatam dificuldades relacionadas à falta de conhecimentos prévios dos alunos, ao caráter abstrato dos conteúdos e à insegurança quanto ao próprio domínio conceitual ao ministrar as aulas, além da influência dos vestibulares na organização do currículo escolar.

Mesmo diante dessas dificuldades, os resultados da pesquisa indicaram que a inserção de tópicos de física contemporânea no Ensino Médio é viável. O estudo também mostrou que as dificuldades de aprendizagem encontradas pelos alunos não diferem significativamente daquelas observadas em conteúdos tradicionais da física. Além disso, os temas abordados despertaram o interesse dos estudantes e contribuíram para tornar o ensino de física mais significativo e contextualizado. Dessa forma, a pesquisa reforça a importância da formação adequada dos professores e da produção de materiais didáticos específicos para viabilizar a atualização curricular no Ensino Médio.

Destaca-se também o trabalho de Alípio Correia, Cristiana Gonçalves e Luizdarcy Castro (Correia; Gonçalves; Castro, 2022), desenvolvido no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. O estudo teve como objetivo introduzir conceitos de física quântica no Ensino Médio por meio de uma sequência didática voltada ao fenômeno do tunelamento quântico. Para isso, os autores recorreram à prática experimental, utilizando um arranjo que demonstra a reflexão interna total frustrada e, a partir dele, estabeleceram uma analogia com o tunelamento quântico, buscando aproximar esses conceitos da realidade dos estudantes.

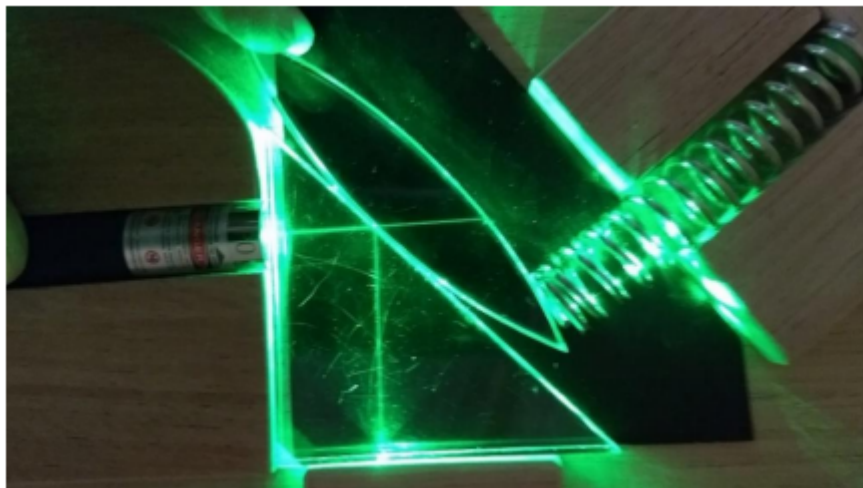
A sequência didática foi aplicada em duas turmas do 3º ano do Ensino Médio de um colégio da Polícia Militar no interior da Bahia. A proposta fundamentou-se na teoria da aprendizagem significativa crítica de Marco Antonio Moreira, que destaca a importância da interação social, da linguagem e da relação entre conhecimentos prévios e novos conceitos no processo de aprendizagem.

Durante as aulas, foram trabalhados conceitos sobre conservação da energia, reflexão, refração, reflexão interna total e reflexão interna total frustrada. Além disso, também foram

abordados conceitos básicos de mecânica quântica, incluindo dualidade onda-partícula, superposição quântica, barreira de potencial e tunelamento quântico.

Um dos aspectos centrais da proposta foi a utilização de atividades experimentais como suporte para a construção de analogias entre fenômenos ópticos e quânticos. Para isso, os autores reproduziram um experimento óptico, apresentado na Figura 7, composto por materiais de baixo custo, como prismas de 45°, cilindro elíptico, mola metálica, base de madeira e fonte de laser. O experimento foi utilizado para demonstrar o fenômeno da reflexão interna total frustrada, estabelecendo uma analogia com o tunelamento quântico. A imagem do aparato experimental pode ser visualizada a seguir:

Figura 7: Transmissão da luz através da barreira óptica no fenômeno de reflexão interna total frustrada.



Fonte: Correia, Gonçalves e Castro (2022).

Segundo a óptica geométrica, quando a luz passa de um meio mais refringente para outro menos refringente (como do vidro para o ar), existe um ângulo limite, chamado ângulo crítico, a partir do qual a luz deixa de se refratar. Para ângulos de incidência maiores que esse valor, a luz não atravessa para o segundo meio, sendo totalmente refletida no interior do prisma, fenômeno conhecido como reflexão interna total. No entanto, considerando a natureza ondulatória da luz, observa-se que essa reflexão não é completamente absoluta. No experimento apresentado pelos autores, a aproximação entre o prisma e o cilindro reduz a camada de ar existente entre eles, permitindo que parte da luz atravessasse essa barreira óptica e seja transmitida para o outro meio. Esse fenômeno é denominado reflexão interna total frustrada.

A partir desse fenômeno óptico, os autores estabeleceram uma analogia com o tunelamento quântico. Na reflexão interna total frustrada, parte da luz consegue atravessar a barreira óptica e ser transmitida para o segundo meio, embora, segundo a óptica geométrica, devesse ocorrer apenas a reflexão interna total. De forma análoga, na mecânica quântica, partículas podem atravessar uma barreira de potencial mesmo sem possuir energia suficiente para superá-la segundo a física clássica. Dessa maneira, a barreira óptica observada no experimento foi associada à barreira de potencial do tunelamento quântico, enquanto a transmissão parcial da luz para o segundo meio foi relacionada à probabilidade de uma partícula ser encontrada além da barreira.

Segundo os autores, a analogia permitiu que os estudantes relacionassem um fenômeno óptico visível e macroscópico a um fenômeno quântico e abstrato. A visualização experimental contribuiu para facilitar a compreensão do conceito de tunelamento quântico, normalmente considerado de difícil entendimento no Ensino Médio.

A metodologia empregada envolveu aulas expositivas, discussões coletivas, aplicação de questionários, exibição de vídeos e atividades experimentais. Os resultados foram analisados a partir da observação das aulas, das discussões realizadas pelos estudantes e das respostas aos questionários aplicados antes e após a sequência didática.

Como resultados, os autores relatam que a utilização de analogias e experimentação contribuiu para despertar o interesse dos alunos e contribui para compreensão por possibilitar a visualização e a compreensão de um fenômeno quântico a partir de um experimento óptico concreto.

No contexto das propostas voltadas à inserção da física quântica no Ensino Médio, destaca-se também a pesquisa de Rafael Filgueira Pimentel (Pimentel, 2022), desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. O autor buscou superar as dificuldades relacionadas à compreensão da dualidade onda-partícula por meio da elaboração e aplicação de uma sequência didática destinada a estudantes do 3º ano do Ensino Médio. Em razão das restrições impostas pela pandemia da COVID-19, a proposta foi aplicada remotamente em quatro turmas de uma escola pública do município de Viçosa (MG), sendo posteriormente utilizada também em disciplinas de graduação.

A sequência didática foi estruturada com o apoio de experimentos virtuais, vídeos e simulações computacionais, recursos que tiveram como finalidade tornar os conceitos da

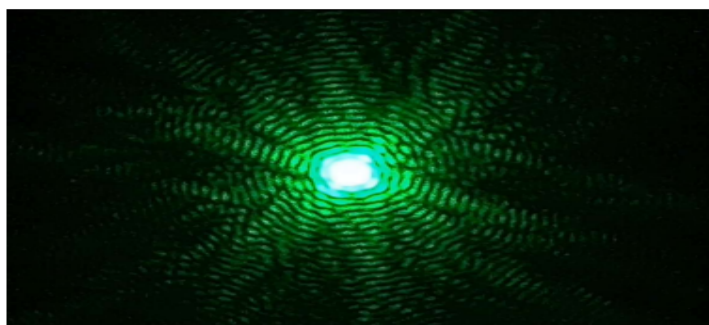
física quântica mais acessíveis aos estudantes. A organização das atividades buscou problematizar o caráter dual da matéria e da radiação, favorecendo a construção gradual dos conceitos relacionados à dualidade onda-partícula. A proposta fundamentou-se nos Três Momentos Pedagógicos, de Delizoicov e Angotti, articulados à teoria da mediação de Vygotsky, especialmente no papel da linguagem como mediadora da aprendizagem, à teoria da aprendizagem significativa, de David Ausubel, e ao conceito de equilíbrio, de Jean Piaget.

Na primeira aula, o conceito de dualidade onda-partícula foi abordado a partir de sua evolução histórica. Inicialmente, foram discutidas as interpretações propostas por Isaac Newton e Christiaan Huygens para a natureza da luz. Em seguida, revisaram-se fenômenos como a interferência e a difração, evidenciando a predominância histórica da teoria ondulatória. Posteriormente, foram apresentados os efeitos fotoelétrico e Compton, cuja interpretação requer a consideração do comportamento corpuscular da luz, representado pelo conceito de fóton.

Para auxiliar na compreensão desses fenômenos, o autor utilizou o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder, uma simulação computacional baseada no interferômetro de Mach-Zehnder, aparato experimental utilizado para estudar fenômenos de interferência e o comportamento quântico da luz. Por meio dessa ferramenta, os estudantes puderam visualizar de forma interativa conceitos relacionados à dualidade onda-partícula.

A proposta também incorporou vídeos de experimentos de interferência. Em um dos vídeos, produzido pelo próprio autor, um feixe de laser atravessa uma abertura em uma placa metálica, produzindo um padrão de interferência observado em um anteparo (Figura 8). Essa atividade permitiu discutir evidências experimentais do comportamento ondulatório da luz. Além disso, vídeos e simulações computacionais foram empregados para explorar o efeito fotoelétrico e o efeito Compton, possibilitando aos estudantes analisar fenômenos que evidenciam a natureza corpuscular da radiação.

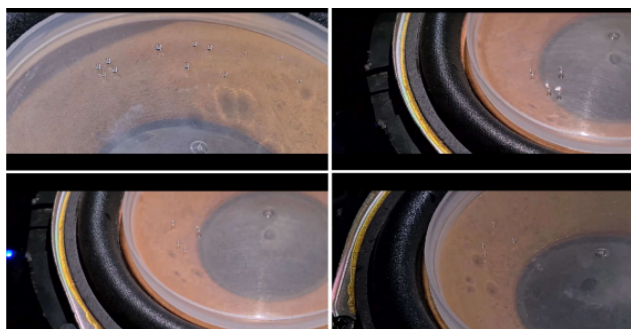
Figura 8: Experimento de interferência realizado pelo autor, evidenciando o padrão formado em um anteparo após a passagem de um feixe de laser por uma abertura em uma placa metálica.



Fonte: Pimentel (2022).

Na segunda aula, foi trabalhado o experimento de difração de elétrons, destacando a extensão do conceito de dualidade onda-partícula à matéria. Além disso, para favorecer a compreensão do comportamento dual da luz, o autor recorreu ao uso de analogias. Uma delas foi apresentada por meio de um vídeo produzido especialmente para a sequência didática, no qual um alto-falante gera vibrações em um líquido viscoso, permitindo que pequenas gotas permaneçam saltando sobre sua superfície (Figura 9). A atividade possibilitou aos estudantes observar características que remetem simultaneamente aos comportamentos ondulatório e corpuscular, promovendo reflexões sobre os fenômenos quânticos e suas interpretações.

Figura 9: Gotas saltantes sobre líquido viscoso em experimento apresentado pelo autor para ilustrar analogias com fenômenos quânticos.



Fonte: Pimentel (2022).

Os resultados da pesquisa evidenciam o potencial pedagógico do uso articulado de analogias, recursos audiovisuais e simulações interativas no ensino de física quântica no Ensino Médio. Esses recursos favoreceram a visualização de fenômenos abstratos, contribuíram para a compreensão da dualidade onda-partícula e estimularam discussões conceituais mais aprofundadas acerca dos fundamentos da física quântica.

No âmbito das investigações sobre as concepções dos estudantes acerca da mecânica quântica, destaca-se o estudo de McKagan, Perkins e Wieman (McKagan; Perkins; Wieman, 2008), cujo objetivo foi investigar as dificuldades de aprendizagem relacionadas ao tunelamento quântico e à interpretação da função de onda. A pesquisa foi desenvolvida em oito cursos de Física Moderna, sendo cinco destinados a estudantes de engenharia e três a estudantes de física, ao longo de cinco semestres. Parte desses cursos utilizou um currículo transformado, elaborado a partir de resultados de pesquisas anteriores sobre as dificuldades conceituais apresentadas pelos alunos no estudo da física quântica.

Os resultados das pesquisas anteriores evidenciaram que muitos estudantes apresentam dificuldades para compreender a função de onda como um modelo físico utilizado para descrever sistemas quânticos. Os autores identificaram também problemas recorrentes na interpretação de diagramas que representam simultaneamente energia potencial, energia total e função de onda, levando os alunos a estabelecer relações inadequadas entre essas grandezas. Uma das dificuldades mais frequentes foi a crença de que a partícula perde energia ao atravessar uma barreira de potencial, interpretação associada à tendência de relacionar o decaimento exponencial da função de onda à diminuição da energia da partícula.

Com o intuito de favorecer a compreensão dos conceitos envolvidos, os autores incorporaram ao currículo recursos como simulações computacionais do projeto PhET, que permitiam a visualização dos processos de tunelamento quântico e do comportamento da função de onda. Além disso, foram empregadas analogias gravitacionais, como a de uma bola movendo-se sobre uma colina, para auxiliar os estudantes na compreensão das relações entre energia potencial, energia cinética e conservação da energia durante o fenômeno de tunelamento.

Os dados foram obtidos por meio da observação de aproximadamente 200 aulas, das quais cerca de 20 abordavam diretamente o tunelamento quântico, além da análise de questões conceituais, atividades avaliativas, tarefas de resolução de problemas e entrevistas com estudantes. Essa diversidade de instrumentos possibilitou uma investigação aprofundada das dificuldades conceituais relacionadas ao tema.

Os autores notaram que mesmo nos cursos que utilizaram o currículo transformado, persistiram dificuldades relacionadas à compreensão do significado físico da função de onda, da natureza dos diagramas de energia potencial e das relações entre energia e probabilidade

em sistemas quânticos. Os autores observaram ainda que muitos estudantes apresentavam dificuldades para atribuir significado físico aos gráficos de energia potencial, confundindo conceitos como energia potencial, energia cinética e energia total ao analisar o fenômeno do tunelamento.

Dessa forma, o estudo de McKagan; Perkins; Wieman, (2008), evidencia que a compreensão do tunelamento quântico envolve desafios conceituais significativos, mesmo após intervenções didáticas específicas. A pesquisa destaca a importância do uso de estratégias que explicitem o significado físico das representações gráficas, da função de onda e dos conceitos energéticos envolvidos, contribuindo para o desenvolvimento de abordagens mais eficazes para o ensino de tópicos de física quântica

A partir dos estudos analisados, observa-se que a pesquisa em ensino de física quântica tem avançado tanto na elaboração de propostas didáticas quanto na investigação das dificuldades conceituais dos estudantes (Ostermann; Moreira, 2001; Correia; Gonçalves; Castro, 2022; Pimentel, 2022; McKagan; Perkins; Wieman, 2008). Entretanto, conforme Ostermann e Moreira (2000), ainda existe a necessidade de ampliar pesquisas que descrevam e avaliem experiências de ensino voltadas à inserção de conteúdos da física moderna e contemporânea na Educação Básica. Embora os trabalhos revisados ofereçam contribuições relevantes para o ensino relacionado aos fenômenos quânticos, permanece a demanda por investigações que analisem os impactos de intervenções pedagógicas sobre a aprendizagem dos estudantes, contribuindo para a consolidação de práticas de ensino fundamentadas e adequadas ao contexto escolar.

3 METODOLOGIA

A sequência didática foi desenvolvida em uma escola estadual, localizada no município de Ponte Nova – MG, onde a pesquisadora exercia a função de professora regente. As aulas ocorreram entre os dias 4 e 19 de novembro de 2025 e foram aplicadas em duas turmas do terceiro ano, totalizando 52 estudantes matriculados até a presente data da aplicação.

O Ensino Médio da escola funciona no turno da manhã, contando com duas aulas semanais de física com duração de 50 minutos. A instituição não conta com um laboratório de Ciências; entretanto, dispõe de uma sala de informática e de um espaço destinado à biblioteca, onde se encontra um kit de robótica. De acordo com informações disponibilizadas no site oficial da Secretaria de Estado de Educação de Minas Gerais, em 2021 houve um investimento de 20 milhões de reais para a aquisição desses kits, destinados ao desenvolvimento de atividades relacionadas à inovação, robótica, tecnologia e mecânica, em escolas da rede estadual (Minas Gerais, 2021). Para realização desta sequência didática, foram utilizadas do kit a placa Arduino Uno (Arduino, 2024) e as baterias.

A sequência didática teve duração total de sete aulas e foi organizada em quatro etapas, contemplando momentos teóricos e a realização de atividades experimentais, conduzidas pela professora-pesquisadora. A sequência didática foi fundamentada na perspectiva sociocultural da aprendizagem proposta por Vygotsky, a qual compreende o desenvolvimento cognitivo como resultado da interação social.

As aulas desenvolvidas apresentaram uma abordagem predominantemente conceitual. De acordo com Krijtenburg-Lewerissa *et al.* (2017), a inserção de conteúdos de física quântica no Ensino Médio constitui um desafio, uma vez que os estudantes não dominam as ferramentas matemáticas necessárias para um tratamento formal desses temas. Além disso, considerando que se trata de um conteúdo de difícil explicação por parte do professor e de complexa compreensão por parte dos alunos, optou-se pelo uso do ensino por analogias. Embora, conforme aponta Hastenreiter (2015), às analogias relacionadas à física quântica apresentem limitações, uma vez que não existe uma correspondência direta entre o universo quântico e o universo macroscópico familiar aos alunos, elas ainda constituem uma estratégia didática utilizada pelos professores.

A etapa 1 concentrou-se em duas aulas teóricas para a introdução de conceitos essenciais. Nessa etapa, foi apresentada a evolução dos modelos atômicos, desde as primeiras concepções até o modelo quântico atual. Como recurso didático, utilizou-se o *data show* e, para aproximar o conteúdo da realidade dos estudantes, empregaram-se analogias que facilitaram a compreensão de conceitos complexos, como fótons e energia discreta.

A etapa 2 centrou-se na realização do experimento denominado, Caixa Quântica e teve duração de duas aulas: a primeira destinada à prática e a segunda voltada à resolução do questionário disponibilizado no Apêndice C. A atividade tinha como objetivo simular o comportamento de um elétron confinado em uma caixa. A prática foi orientada pela professora e realizada em grupos.

A etapa 3 foi composta por uma aula teórica com foco no tunelamento quântico, suas aplicações e nos semicondutores, utilizando-se o *data show* como recurso didático, empregou-se o uso também de analogias para aproximar o conteúdo da realidade dos alunos.

Por fim, a etapa 4 consistiu na realização de um experimento demonstrativo utilizando um diodo túnel, um diodo comum e um LED associado, desenvolvido ao longo de duas aulas: a primeira dedicada à realização de medidas e a segunda à resolução do questionário disponibilizado também no Apêndice C. O objetivo da atividade experimental foi construir as curvas características dos dois diodos e evidenciar a região de resistência elétrica negativa do diodo túnel, comprovando o fenômeno previamente discutido na aula teórica.

A coleta de dados ocorreu por meio de observações em sala de aula e da aplicação de questionários. Para a realização do estudo, o projeto foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos (CEP), sob o número de parecer 7.903.372.

3.1 Etapa 1 - “Modelos atômicos e a origem da função de onda: uma viagem pela evolução do pensamento científico sobre a matéria.”

A etapa 1 foi introduzida com uma pergunta problematizadora: “*Por que os elétrons não caem no núcleo atômico?*” Esse tipo de pergunta, quando utilizado no início da aula, favorece o ciclo argumentativo descrito por Sasseron e Carvalho (2011), pois estimula o estudante a levantar hipóteses e construir explicações. Além disso, promove um ambiente discursivo no qual o aluno interage com os colegas e com o professor, construindo coletivamente o sentido do conteúdo.

Após a problematização inicial, o desenvolvimento da aula concentrou-se em oferecer elementos para responder à pergunta, percorrendo os principais modelos atômicos de modo a evidenciar como cada proposta científica buscou explicar a estabilidade do átomo. Inicialmente com o modelo de Thompson, dando sequência com o modelo planetário de Rutherford até chegar nos postulados de Bohr.

Entretanto, antes da apresentação dos postulados de Bohr, houve a necessidade de trabalhar com os estudantes a ideia de quantização da energia e o conceito de fóton, uma vez que ambos eram novos para a turma. Para esse fim, utilizamos de analogias, recurso que, segundo Almeida e Diniz (2022), pode facilitar a compreensão de conceitos abstratos e complexos, aproximando-os de situações familiares aos estudantes.

À luz do Guia FAR (Foco, Ação e Reflexão), as analogias foram empregadas como recursos pedagógicos para favorecer a compreensão de conceitos abstratos da física moderna. Na etapa de Foco, buscou-se mobilizar conhecimentos familiares dos estudantes por meio de situações cotidianas, como o movimento de um gato descendo um escorregador e do gato descendo uma escada, bem como a observação de um feixe de chuva. Na etapa de Ação, a analogia dos gatos foi utilizada para estabelecer a correspondência entre o movimento contínuo do gato no escorregador e a concepção clássica de energia contínua, em contraste com o movimento discreto do gato na escada, associado ao elétron no modelo atômico de Bohr, no qual a energia é quantizada e restrita a níveis bem definidos.

De forma semelhante, foi empregada a analogia do feixe de chuva para abordar a natureza dual da luz. Na etapa de Ação, apresentou-se aos estudantes uma situação cotidiana: um feixe de chuva. A analogia foi explorada a partir da observação de que a chuva, quando vista à distância, pode ser percebida como um fluxo contínuo, assim como a luz frequentemente se manifesta por meio de fenômenos característicos de ondas, como propagação e interferência. Entretanto, ao observarmos mais atentamente, percebemos que esse fluxo é constituído por gotas individuais. De modo análogo, a luz também apresenta uma natureza discreta, sendo composta por fótons. Dessa forma, o aspecto contínuo do feixe de chuva foi associado ao comportamento ondulatório da luz, enquanto cada gota representou o fóton, evidenciando seu comportamento corpuscular e a quantização da energia luminosa.

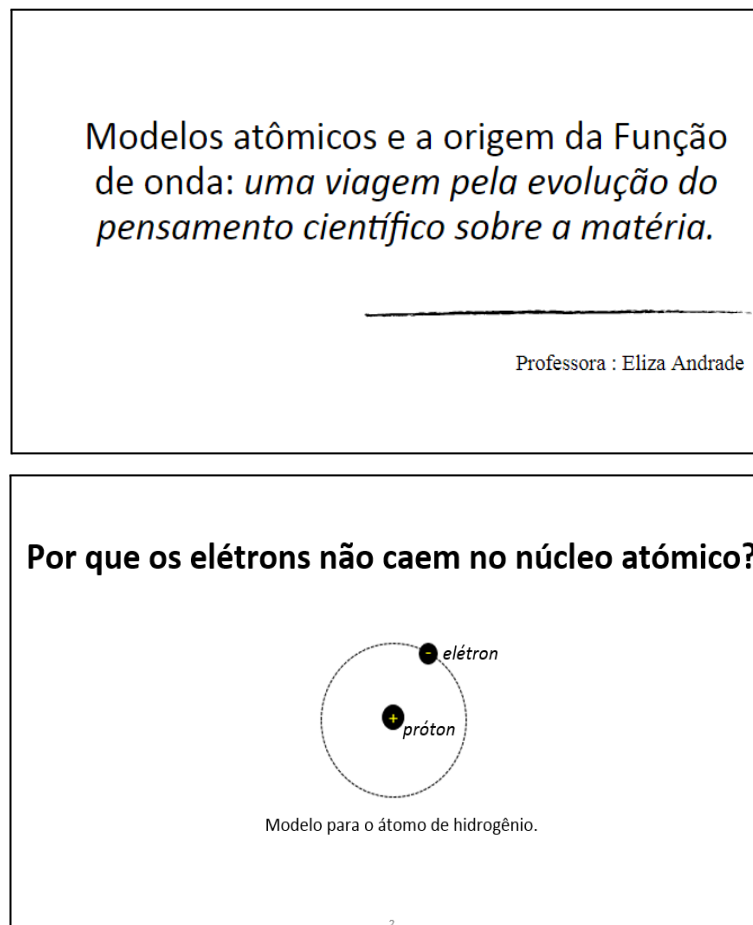
Em ambas as analogias foram discutidas as limitações das analogias, enfatizando que, embora úteis para a compreensão conceitual, elas não devem ser interpretadas literalmente.

Ressaltou-se que nenhuma analogia reproduz integralmente o fenômeno físico representado, servindo apenas para destacar características específicas que auxiliam na compreensão dos conceitos de dualidade onda-partícula e quantização da energia. Dessa forma, as analogias foram empregadas como recursos introdutórios, sendo posteriormente articuladas às explicações científicas formais. Após sua utilização, procedeu-se à etapa de Reflexão, na qual a professora analisou a adequação das analogias empregadas e sua contribuição para a compreensão dos conceitos trabalhados.

Após finalizar os postulados de Bohr, estudou-se o comportamento ondulatório das partículas proposto por De Broglie, iniciando a introdução ao conceito de função de onda. O foco principal foi evidenciar a natureza probabilística da física quântica e mostrar como a função de onda revela esses resultados, além de como tais ideias se aplicam ao modelo atômico atual.

Os *slides* usados para o desenvolvimento da aula podem ser observados na figura 10 abaixo.

Figura 10: *Slides* usados no desenvolvimento da aula.

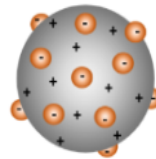


- De acordo, com a física clássica os átomos deveriam ser instáveis.
- Segundo a teoria eletromagnética clássica qualquer carga elétrica acelerada irradia ondas eletromagnéticas.
- Os elétrons orbitando o núcleo atômico possuem uma aceleração centrípeta, portanto deveria emitir radiação todo tempo.
- Assim a energia do elétron orbitando deveria diminuir continuamente e ele deveria se chocar com o núcleo em fração de segundos levando ao colapso atômico.

3

O que era conhecido sobre os átomos?

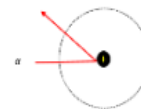
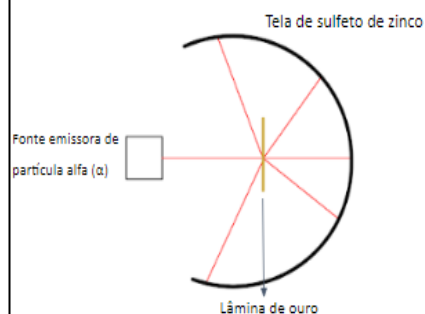
- Em 1897, Thomson descobriu o elétron.
- Para ele o átomo era como uma esfera de alguma substância positivamente carregada, ainda desconhecida, e dentro dela estava os elétrons.



Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/hadrex/particulas/>
Modelo de Thomson - pudim de passas.

4

- Ernest Rutherford e dois de seus alunos na tentativa de investigar o modelo de Thomson elaborou um experimento que consistia em emitir partículas alfas em direção a uma lâmina de ouro cercada por uma tela de sulfeto de zinco.

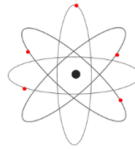


Os resultados foram totalmente diferentes do esperado, pois algumas partículas sofreram deflexões completas. Isso não seria possível se a carga positiva estivesse distribuída uniformemente pelo átomo, no caso, a partícula α sofreria pequenos desvios.

Esquema da montagem do experimento de Rutherford.

5

- O experimento resultou na descoberta de um núcleo atômico positivamente carregado contendo pelo menos 99,95% da massa do átomo.
- Rutherford sugeriu que os elétrons orbitavam o núcleo de modo semelhante aos planetas em torno do Sol.
- Porém, o modelo de Rutherford era instável, de acordo com a mecânica clássica o elétron deveria atingir o núcleo em fração de segundo.



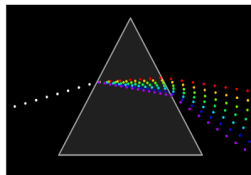
Modelo do átomo de Rutherford.

Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/hadrex/particulas/>

6

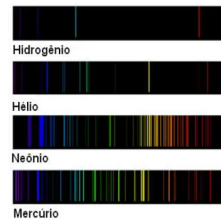
Modelo de Bohr: uma breve contextualização dos experimentos que motivaram seu modelo

Robert Bunsen observou que, ao serem aquecidos, os elementos químicos emitem luz, de forma semelhante ao que ocorre com o carvão em brasa. Quando essa luz é analisada por meio de um prisma, ela se decompõe em diferentes cores. No entanto, quando a luz emitida é proveniente de um gás aquecido, observa-se a formação de um espectro descontínuo, composto por linhas características de cada elemento.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Light_dispersion_conceptual.gif

Decomposição da luz branca.



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/espectros-eletronicos-estrutura-atomo.htm>

Espectro descontínuo.

7

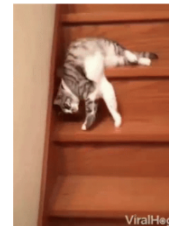
- Em 1900, o físico Max Planck estudou a radiação de corpos aquecidos e percebeu que a energia não era emitida ou absorvida de forma contínua, como se pensava, mas em **pacotes discretos**, chamados **quanta de energia**. Ou seja, a energia só podia assumir certos valores específicos.



Fonte: <https://tenor.com/view/gatinho-escorregando-gif-26774940>

O Gato 1 pode estar em qualquer ponto do escorregador, o que significa que sua energia potencial pode assumir **qualquer valor** entre o topo e a base. Essa situação representa a ideia da física clássica, na qual a energia pode variar de forma **contínua**, sem restrições.

8



Fonte: <https://br.pinterest.com/pin/cat-stairs-gif-cat-stairs-going-down-discover-share-gifs-713328028486720418/>

O Gato 2 só pode descer a escada por degraus específicos, sem passar por posições intermediárias. Isso significa que ele só pode ter **determinados valores de energia**, representando a **quantização da energia** no modelo da física quântica.

- Niels Bohr usou as observações feitas através do espectros descontínuos e a teoria de Planck para criar um novo modelo atômico.

O que é o fóton?

A radiação eletromagnética apresenta natureza dual, comportando-se tanto como onda quanto como partícula. Sua energia é transportada em pacotes denominados fótons.

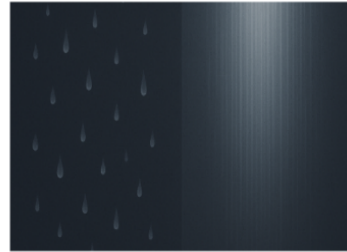
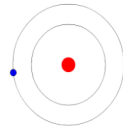


Imagem da chuva gerada por IA - Chatgpt.

9

→ O pensando de Bohr para o átomo era:

- Os elétrons só podem ocupar níveis de energia permitidos (órbitas quantizadas/ valores só podem ser múltiplos de uma unidade menor).
- Enquanto o elétron está em um nível permitido ele não emite energia (mesmo acelerado não emite energia).
- O elétron só absorve ou emite valores específicos de energia em forma de fóton quando muda de nível.



Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/hadrex/particula>

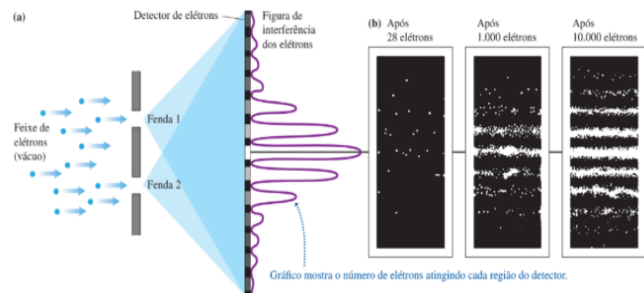
10

Os postulados de Bohr explicou a instabilidade dos átomos e forneceu base para o entendimento para dos espectros. Mas o seu modelo explicou melhor o **átomo de hidrogênio**.

- Mas agora em vez de imaginar o elétron como uma partícula orbitando ao redor do núcleo, vamos considerar, conforme a hipótese de De Broglie, que ele se comporta também como uma **onda**.
- Segundo De Broglie os elétrons formam ondas estacionárias em torno do núcleo, o que explica o fato dos elétrons manterem órbitas bem definidas e não emitirem energia continuamente.
- Sua proposta foi muito inovadora para época levando em consideração que não havia nenhuma comprovação experimental para sua ideia.

11

- Anos mais tarde sua teoria foi comprovada pelo experimento da interferência de elétrons por uma fenda dupla.



Fonte: Young e Freedman 2016.
Difração de elétrons.

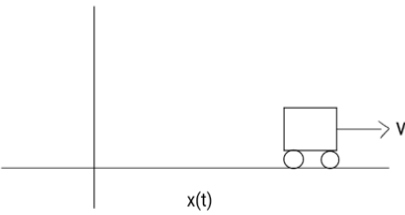
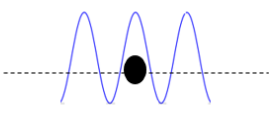
12

- De Broglie propôs que o elétron se comporta tanto como partícula quanto como onda, misturando conceitos clássicos e quânticos.
- Essa natureza ondulatória implica que não podemos determinar simultaneamente a posição e o momento do elétron, conforme estabelece o princípio da incerteza de Heisenberg.
- Portanto, ele não possui órbitas bem definidas. Para descrevê-lo de forma precisa, usamos sua função de onda, que indica as regiões onde é mais provável encontrá-lo.

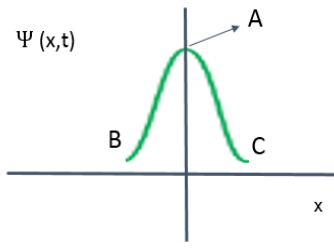
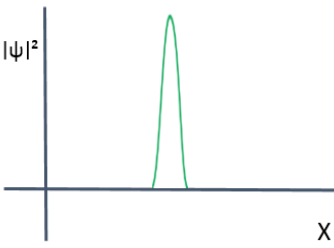
13

- Baseado nessa falta de precisão de se encontrar a posição e o momento simultaneamente do elétron o cientista Schrödinger desenvolveu a função de onda (ψ), que representa matematicamente o comportamento da partícula como uma onda de matéria e contém as informações sobre o sistema quântico, como posição, energia e momento.
- Dando continuidade ao estudo da função de onda Max Born, interpretou que o quadrado do módulo da função de onda, $|\psi|^2$, indica a densidade de probabilidade de encontrar a partícula em uma determinada região do espaço num instante de tempo t .

14

Partícula Clássica	Partícula Quântica
 A física clássica é determinística - Uma vez que conhecida a sua posição e sua velocidade em um instante t podemos calcular com precisão no futuro por exemplo; sua velocidade, posição, momento, energia cinética dentre outras grandezas.	 A mecânica quântica é indeterminística - mesmo conhecendo a função de onda em um instante t tudo que podemos determinar, é uma probabilidade de possíveis resultados.

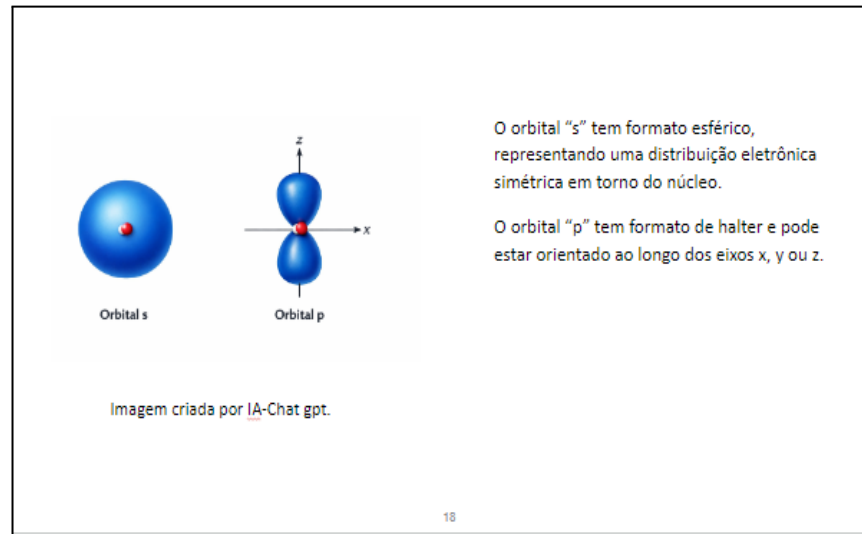
15

 Gráfico da função de distribuição de probabilidade num tempo t - A região "A" indicada pela seta mostra maior probabilidade de encontrar a partícula. Tendo pouca chance se ser encontrada nos pontos B e C.	
Gráfico do colapso da função de onda no ponto c - A partícula não tem uma posição precisa antes de ser medida. O ato observar perturba o sistema e faz a partícula "escolher uma posição".	

16

• A dificuldade de prever com precisão a posição de elétron também se aplica ao átomo. • O modelo atômico mais aceito atualmente se baseia na mecânica quântica. • Em um átomo podem haver até 7 camadas (K, L, M, N, O, P, Q). As camadas contêm os subníveis (s, p, d, f) e esse contêm os orbitais. • A partir na resolução da equação de Schrödinger é possível encontrar maiores regiões de probabilidade de se encontrar o elétron no átomo (orbitais). • Ao marcar cada ponto de maior probabilidade de encontrar um elétron um desenho tridimensional é formado que caracteriza a forma geométrica de cada orbital.	
---	--

17

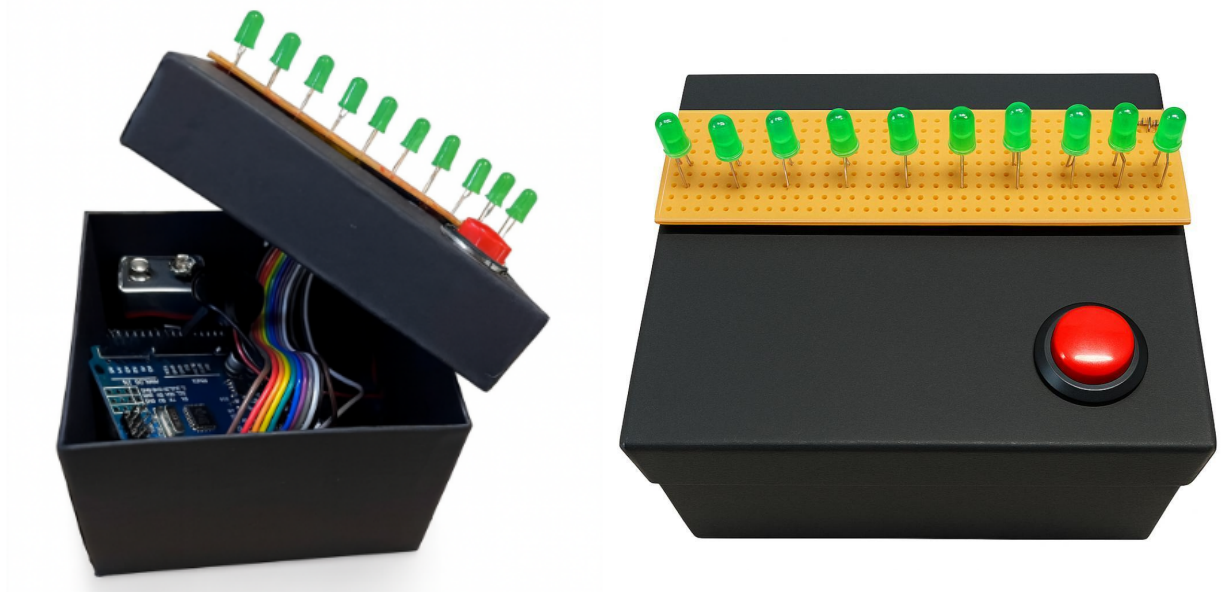


Fonte: A autora.

3.2 Etapa 2 - "Experimento - Caixa Quântica"

A terceira e quarta aula foi destinada a realização do experimento denominado, Caixa Quântica. Foram desenvolvidos três kits do experimento e disponibilizados aos alunos juntamente com um roteiro detalhado. (Toda a montagem do kit e o código utilizado se encontram disponíveis no Apêndice A). A figura do experimento pode ser observada logo abaixo:

Figura 11: Caixa Quântica utilizada no estudo da função de onda. O estudante consegue simular, em um instante t , a medida da posição de um elétron preso na caixa.



Fonte: A autora.

Para a realização da atividade, a turma foi dividida em três grupos, que trabalharam sob orientação da professora. A organização da aula fundamentou-se na perspectiva da teoria

de Vygotsky, segundo a qual a aprendizagem ocorre de forma mais eficaz quando o aluno participa de atividades mediadas por alguém que domina o conhecimento (Gaspar, 2014).

O objetivo da prática foi simular, de forma interativa, o modelo de um elétron confinado em uma caixa, utilizando um conjunto de dez LEDs, em que cada LED representava uma possível região do espaço onde o elétron poderia ser encontrado. A atividade teve como finalidade ilustrar o conceito de função de onda e promover a superação da concepção determinista da física clássica, evidenciando que, no contexto quântico, o elétron não possui uma posição bem definida, mas sim uma distribuição de probabilidade.

A placa Arduino, à qual os LEDs estavam conectados, foi programada com um código com a solução da equação de Schrödinger para o primeiro nível fundamental de energia do elétron confinado. A partir dessa solução, a simulação representou, por meio do acionamento dos LEDs, a probabilidade associada à função de onda.

Para realização da prática, os grupos realizaram 100 medições de posição do elétron, pressionando o botão da Caixa Quântica, e construíram um histograma baseado na densidade de probabilidade teórica. Ao final, os alunos também responderam a perguntas relacionadas ao conteúdo proposto no roteiro, consolidando a compreensão do conteúdo.

3.3 Etapa 3- “Tunelamento através de uma barreira”

A etapa 3 concentrou-se no fenômeno do tunelamento quântico e, para aproximar o conceito da realidade dos alunos, buscou evidenciá-lo por meio de analogias. Duarte (2005, p.8), afirmar que “a analogia envolve o estabelecimento de comparações ou relações, entre o conhecido e o pouco conhecido ou desconhecido”. Assim, o uso de analogias mostrou-se essencial para favorecer a compreensão dos estudantes, permitindo que conceitos abstratos, como o tunelamento quântico, fossem aproximados de suas realidades.

Novamente, sob a orientação do Guia FAR (Foco, Ação e Reflexão), foi utilizada em aula a analogia de um carrinho em uma montanha-russa para discutir o conceito de barreira de potencial. Na etapa de Foco, foi escolhida uma situação conhecida, destacando que o carrinho só consegue ultrapassar a montanha quando possui energia cinética suficiente. Na etapa de Ação, essa situação foi relacionada ao comportamento previsto pela física clássica, no qual a transposição de uma barreira de potencial depende diretamente da energia da partícula. Em contraste, introduziu-se o fenômeno do tunelamento quântico, enfatizando que, mesmo

quando a partícula não possui energia suficiente para superar a barreira, existe uma probabilidade de ela atravessá-la e surgir na região seguinte. Por fim, as limitações da analogia foram discutidas, ressaltando que, diferentemente do carrinho, as partículas quânticas não seguem trajetórias bem definidas, sendo seu comportamento descrito em termos probabilísticos. Após sua utilização, procedeu-se à etapa de Reflexão, na qual foi analisada a adequação da analogia para representar o fenômeno do tunelamento quântico.

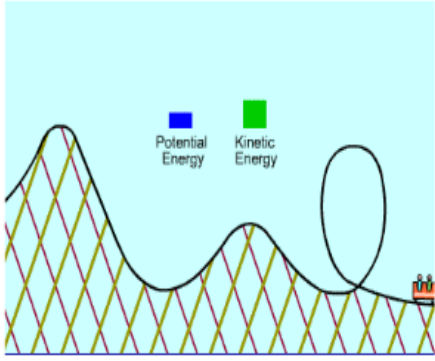
Na continuidade da aula, foram apresentadas aplicações do tunelamento quântico no cotidiano e o princípio de funcionamento dos semicondutores (diodo retificador, diodo túnel e LED), ilustrando como o tunelamento ocorre no diodo túnel. A sequência de *slides* usados durante a aula podem ser analisados abaixo.

Figura 12: *Slides* usados no desenvolvimento da aula.

Tunelamento através de uma barreira

Professora : Eliza Andrade

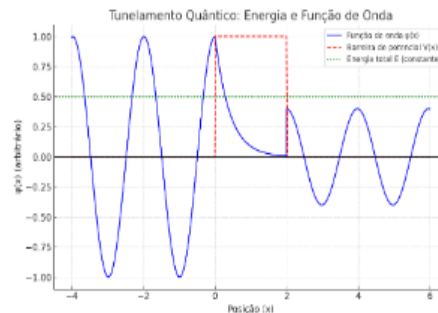
Na mecânica newtoniana, se uma partícula (como um carrinho) está inicialmente no lado esquerdo de uma barreira (montanha), ela só conseguirá atingir o lado direito se sua energia total for suficiente para superar a energia potencial máxima da barreira.



Fonte: <https://www.blogs.unicamp.br/ciencianerd/2017/02/06/montanha-russa-fisica-e-adrenalina/>

1

- Já na mecânica quântica uma partícula pode comportar-se de maneira diferente mesmo que ela tenha uma energia menor, ela pode aparecer do outro lado da barreira.



2

Aplicações do Tunelamento

- **Microscópio eletrônico de tunelamento** – usa o tunelamento de elétrons da amostra com a ponta do microscópio para obter imagens das superfícies das amostras em níveis atômicos.
- **Fusão nuclear** – no sol fusão ocorre quando dois núcleos tunelam pela barreira de potencial formada pela repulsão elétrica dos dois núcleos carregados positivamente. Ao se aproximarem o suficiente a força nuclear forte passa a agir e cause a fusão dos núcleos.
- **Semicondutor (Diodo túnel)** – um semicondutor no qual os elétrons podem tunelar por uma barreira de potencial. A corrente pode ser ligada e desligada em poucos segundos.

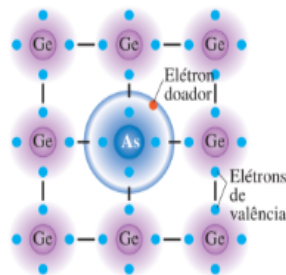
3

Semicondutores

- Um semicondutor possui uma resistividade intermediária entre um condutor e um isolante.
- Sua banda de valência estaria cheia e sua banda de condução é completamente vazia a zero absoluto. Com a excitação térmica um número significativo de elétrons migram da banda de valência para a banda de condução.
- A condutividade dos semicondutores proveniente da excitação térmica é chamada de condutividade intrínseca. Porém, existem outras maneiras de reforçar a condutividade e uma delas é pela dopagem.
- Um exemplo disso, é quando uma pequena quantidade de arsênio é adicionada ao germânio. Ou quando o gálio é adicionado ao germânio.

4

Semicondutores do tipo n

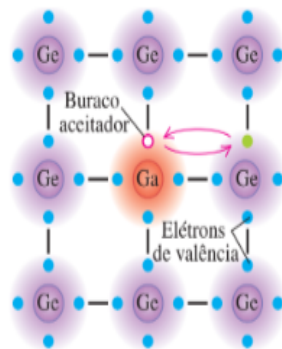


O arsênio tem 5 elétrons na banda de valência e o germânio 4 elétrons. Os 4 elétrons do arsênio serão usados na ligação covalente o quinto elétron pode ir facilmente para a banda de condução. A impureza que fornece elétrons é conhecida como *tipo n*.

Fonte: Young e Freedman 2016.

5

Semicondutores do tipo p



O gálio, pois possui três elétrons de valência e ao ser adicionado ao germânio deixa uma ligação covalente incompleta. Essa ausência de elétron gera buracos na banda de valência, responsáveis pela condução elétrica. Caracterizando o material como um semicondutor *tipo p*.

Fonte: Young e Freedman 2016.

6

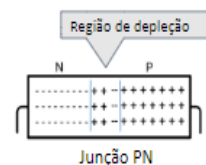
Dispositivos semicondutores - Diodo Retificador

- O diodo retificador permite a passagem de corrente elétrica em apenas um sentido.
- Ele é formado pela junção de um semicondutor do tipo p com o tipo n.
- Onde eles se encontram forma uma barreira de potencial na região de depleção que age como uma barreira para o fluxo dos elétrons.

Diodo retificador 1N4007.



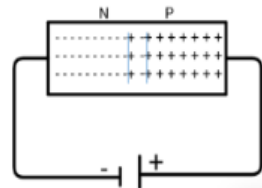
Fonte: A autora.



7

Dispositivos semicondutores - Diodo Retificador

- Quando o diodo é ligado de forma direta, polo positivo conectado ao tipo p e polo negativo conectado ao tipo n, ocorre uma diminuição na barreira de potencial e a corrente flui facilmente.

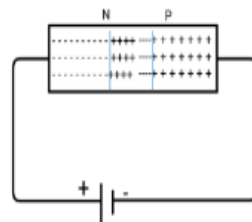


Ligação direta de uma fonte de tensão a um diodo.

8

Dispositivos semicondutores - Diodo Retificador

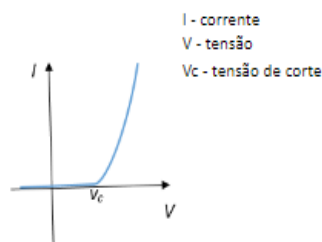
- Quando o diodo é ligado de forma inversa, polo negativo conectado ao tipo p e polo positivo no tipo n, a barreira de potencial da junção P-N aumenta, dificultando a passagem da corrente elétrica.



Ligação reversa de uma fonte de tensão a um diodo.

9

Dispositivos semicondutores - Diodo Retificador



Curva característica do diodo - corrente direta.

A principal função do diodo retificador é na alimentação de circuitos onde a rede elétrica precisa ser convertida de corrente alternada para corrente contínua como em carregadores de celular, computadores e demais eletrodomésticos.

10

Dispositivos semicondutores - Diodo emissor de luz (LED)

- O LED é um diodo constituído por uma junção PN capaz de emitir luz.
- Quando submetido a uma tensão direta, as lacunas são atraídas para a junção pelo lado P e os elétrons pelo lado N.
- Na região de junção, ocorre a recombinação entre elétrons e lacunas, liberando energia na forma de luz.



fonte: <https://www.smartkits.com.br/led-difuso-3mm-vermelho?srsltid=AfmBOopJ-144leS3agc-5uDTHdsG6lZHaAgs-ZtaWH4SMgd4GN3vH8E>

11

Dispositivos semicondutores - Diodo túnel

- O diodo túnel possui uma junção PN extremamente dopada, o que torna a barreira de potencial muito estreita.
- Por isso, mesmo com uma tensão baixa, os elétrons atravessam a barreira por tunelamento quântico, fazendo a corrente aumentar rapidamente.
- Quando a tensão aumenta um pouco mais, não há mais estados disponíveis (lacunas) para os elétrons tunelarem, então o tunelamento diminui e a corrente elétrica cai. Caracterizando a região de resistência elétrica negativa do diodo túnel.
- Com tensões ainda maiores, os elétrons ganham energia suficiente para ultrapassar a barreira, e o diodo passa a conduzir como um diodo comum.

diodo túnel (AU301A).

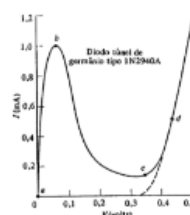


Fonte: A autora...

O diodo túnel pode ser usado em transmissores de rádio e amplificadores de micro-ondas.

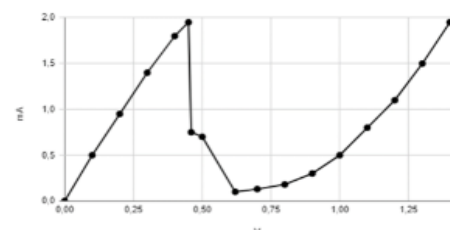
12

Dispositivos semicondutores - Diodo túnel



Fonte: Eisberg e Resnick, 1994.

Gráfico da corrente x tensão para o diodo túnel, prevista pela teoria.



Fonte: A autora.

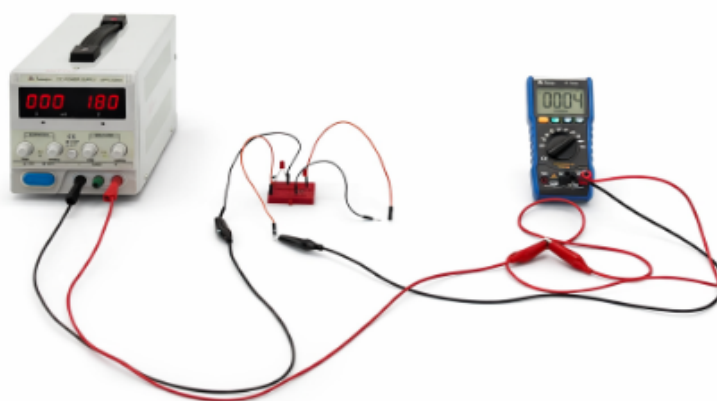
Gráfico da corrente x tensão para o diodo túnel, obtido por meio do experimento.

13

3.4 Etapa 4 - “Experimento - Diodo Túnel”

A última aula da sequência didática teve como objetivo principal ilustrar, na prática, a curva característica do diodo túnel. Para isso, foi realizado um experimento utilizando uma fonte de alimentação para variar a tensão, uma protoboard para as conexões entre os diodos e um LED, e um multímetro que serviu para leitura da corrente elétrica. A montagem detalhada do experimento é apresentada no Apêndice B. O experimento montado pode ser visualizado logo abaixo.

Figura 13: Aparato experimental utilizado para a construção das curvas características dos dispositivos diodo clássico e diodo túnel.



Fonte: A autora.

Como havia apenas uma montagem do aparato experimental, o experimento teve caráter demonstrativo. Segundo Gaspar (2014), demonstrações experimentais são válidas dentro da perspectiva de Vygotsky, quando podem ser realizadas em um tempo curto, de modo que ainda sobre tempo para as interações sociais entre os alunos.

Para otimizar o tempo, as medidas de tensão já estavam pré-definidas no roteiro, e a fonte foi ajustada conforme esses valores para permitir a leitura da corrente com o auxílio de um multímetro. Primeiramente foram feitas as conexões para as leituras do diodo comum e em seguidas as conexões foram alteradas para que as leituras fossem efetuadas para o diodo túnel, ambas as leituras de corrente foram registrados no roteiro. O objetivo era construir o gráfico para os dois semicondutores e evidenciar o comportamento quântico aparente na curva da tensão versus corrente para o diodo túnel.

A turma foi dividida em grupos, que foram chamados simultaneamente para realizar as leituras da corrente e observarem o comportamento do LED que estava associado ao circuito para tornar mais didática e visual a passagem da corrente. Após registrarem os valores no roteiro, os estudantes construíram as curvas características do diodo comum e do diodo túnel. Em seguida, responderam a um questionário composto por seis questões, reforçando as interações sociais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentamos, a seguir, os resultados obtidos a partir da aplicação da sequência didática em duas turmas do terceiro ano do Ensino Médio. Trata-se de uma análise de natureza qualitativa e interpretativa, realizada com base nas observações e registros feitos em sala de aula e na análise das respostas dos alunos aos questionários, buscando verificar a coerência dessas respostas em relação aos conceitos trabalhados.

Os dados foram organizados em duas etapas, de acordo com o desenvolvimento da sequência didática. A primeira etapa refere-se à aula intitulada “*Modelos atômicos e a origem da função de onda: uma viagem pela evolução do pensamento científico sobre a matéria*” e à aula experimental em que foi utilizada a Caixa Quântica, correspondentes às etapas 1 e 2 descritas na metodologia. A segunda etapa da análise contempla a aula “*Tunelamento através de uma barreira*” e a aula experimental envolvendo os dispositivos diodo clássico e diodo túnel, correspondentes às etapas 2 e 3, conforme apresentado na metodologia.

O desenvolvimento das atividades ocorreu ao longo do mês de novembro de 2025, período que coincidiu com a realização do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), ocorrido entre os dias 09 e 16 de novembro (Enem, 2025). Esse contexto influenciou a participação dos estudantes, uma vez que parte deles se ausentou das aulas em função da preparação para o exame. Além disso, por se tratar da etapa final do ano letivo, muitos alunos já haviam atingido a pontuação necessária para aprovação, o que contribuiu para a redução do engajamento nas atividades propostas.

Apesar desse cenário, observou-se diferença no nível de interesse e participação entre as turmas ao longo do desenvolvimento da sequência didática. Enquanto uma delas demonstrou maior motivação, engajamento nas atividades experimentais e curiosidade em relação aos conteúdos de física moderna, a outra apresentou menor envolvimento, refletindo-se em uma participação mais limitada nas atividades propostas.

4.1 Percepção e análise da etapa 1 e 2 da sequência didática.

Está análise refere-se à aula teórica intitulada “*Modelos atômicos e a origem da função de onda: uma viagem pela evolução do pensamento científico sobre a matéria*” e à aula experimental associada ao experimento da caixa quântica. Na aula teórica observou que os estudantes apresentaram dificuldades em se engajar de forma espontânea nas discussões

propostas, sendo identificado maior envolvimento principalmente a partir de incentivos e intervenções diretas da professora já na aula experimental referente ao experimento da caixa quântica, observou-se maior interesse por parte dos estudantes.

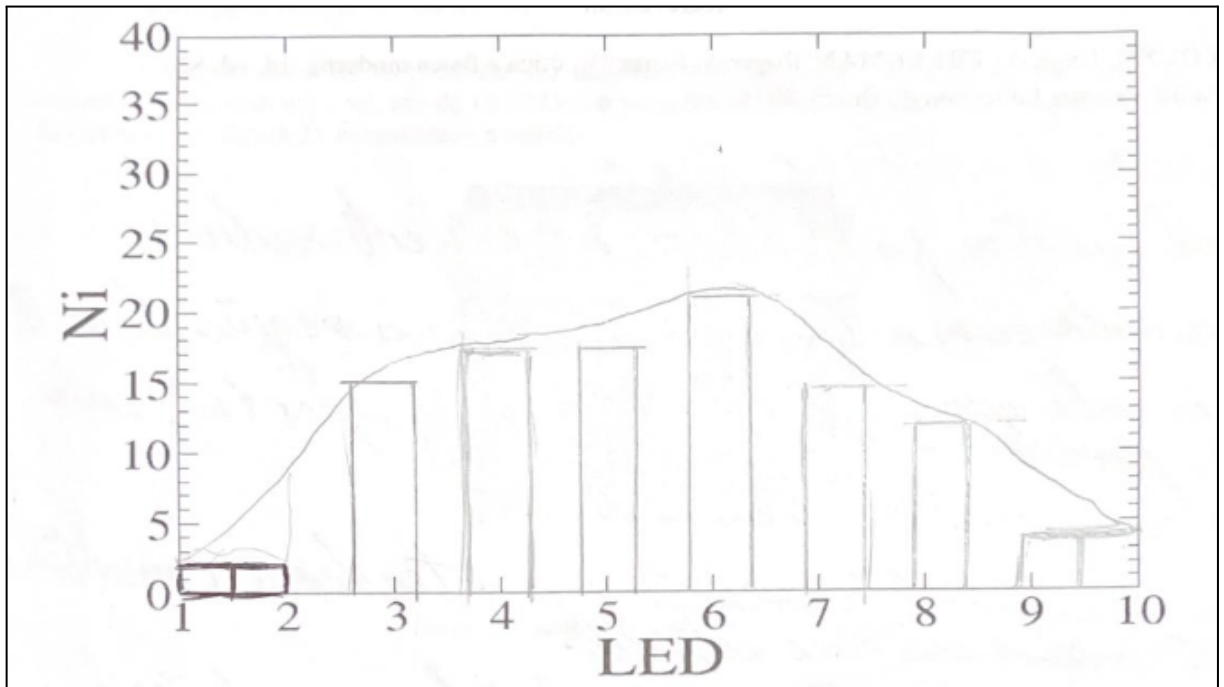
Dessa forma, alguns demonstraram curiosidade inicial em compreender o funcionamento do experimento. Para a realização da atividade, os alunos organizaram-se em três grupos, de forma espontânea, distribuindo-se entre as funções de acionamento do dispositivo e de registro das observações. Notou-se, ainda, que os estudantes buscaram revezar as funções ao longo da atividade, uma vez que a maioria demonstrou interesse em manusear e interagir diretamente com a Caixa Quântica. Durante a realização da atividade prática, as medições das posições foram realizadas sem a ocorrência de dificuldades significativas.

O maior engajamento observado durante a aula experimental com a Caixa Quântica está em consonância com estudos que discutem o papel das atividades experimentais no ensino de Física. Segundo Araújo e Abib (2003), as atividades experimentais favorecem a participação ativa dos estudantes ao promoverem a interação direta com os fenômenos físicos, contribuindo para o aumento do interesse e do envolvimento nas aulas. Nesse sentido, a organização espontânea dos alunos, o revezamento das funções e o interesse em manusear o experimento observados durante a atividade prática indicam uma postura mais participativa, em contraste com a menor interação identificada na aula teórica expositiva.

Após a realização dos experimentos, os alunos iniciaram a construção do histograma, no qual o eixo x representa o número i do LED e o eixo y representa o número de vezes (N_i) que cada LED acendeu. O histograma obtido apresenta comportamento semelhante ao previsto no modelo quântico, associado à densidade de probabilidade.

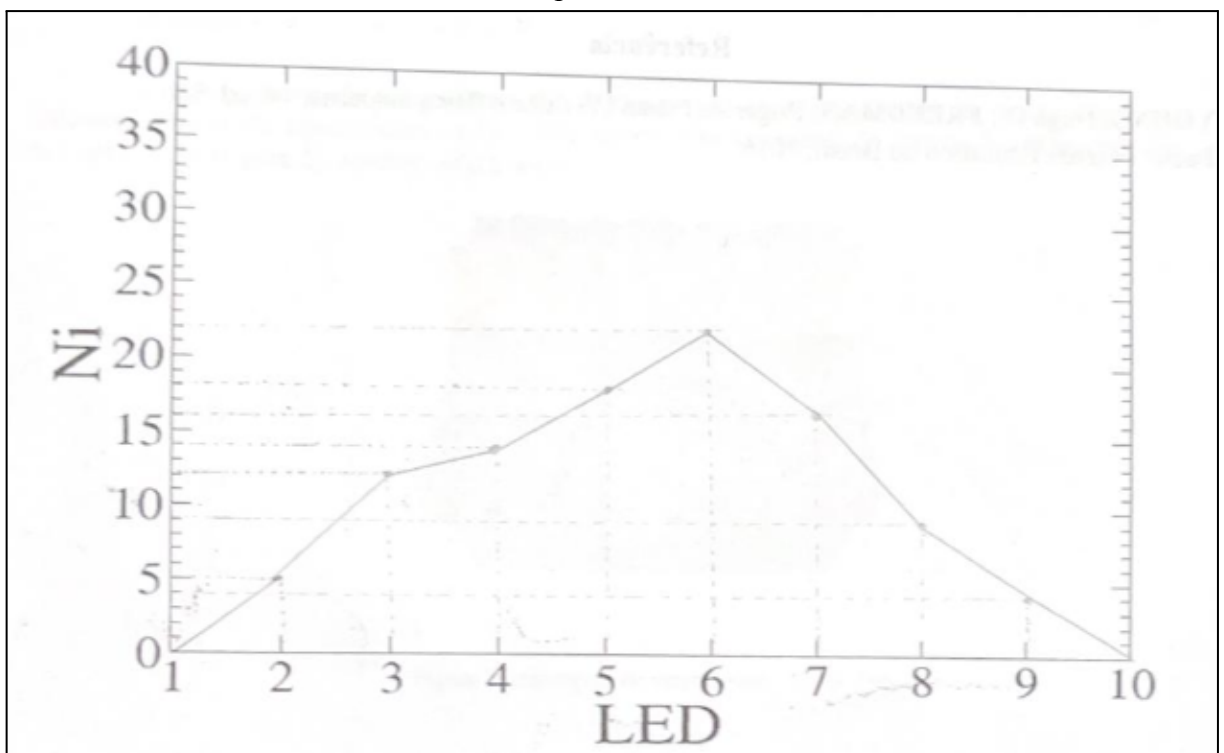
Observou-se que os estudantes não apresentaram grandes dificuldades na construção do histograma, após orientações fornecidas pela professora. Entre os diferentes histogramas elaborados pelos grupos de alunos, foram selecionados três exemplos representativos, denominados neste trabalho como **Grupo A**, **Grupo B** e **Grupo C**, os quais são apresentados respectivamente a seguir.

Figura 14: Imagem extraída do roteiro de aula prática preenchido pelos estudantes do Grupo A.



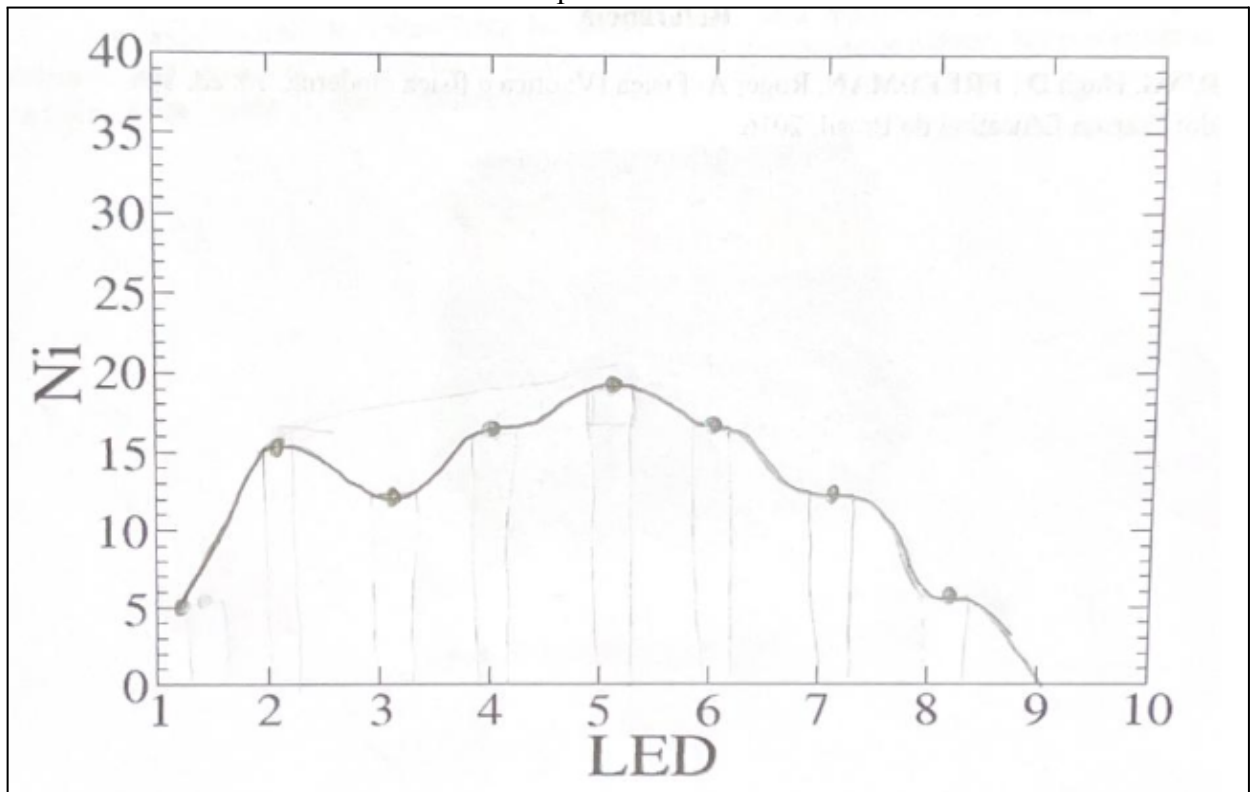
Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da pesquisa (2025).

Figura 15: Imagem extraída do roteiro de aula prática preenchido pelos estudantes do Grupo B.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da pesquisa (2025).

Figura 16: Imagem extraída do roteiro de aula prática preenchido pelos estudantes do Grupo C.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da pesquisa (2025).

Observou-se que os histogramas construídos apresentaram comportamentos semelhantes entre os grupos analisados. Em todos os casos, verificou-se a presença de um máximo na região central do histograma e valores mínimos associados aos LEDs das extremidades, comportamento análogo ao nível fundamental ($n = 1$) do elétron confinado em uma caixa. Esse comportamento já era esperado, uma vez que, no código utilizado no experimento, as probabilidades de acionamento dos LEDs foram previamente definidas de modo a reproduzir a distribuição associada ao nível fundamental do sistema.

Ainda nesse contexto, observou-se que os alunos não apresentaram dificuldades em relacionar o histograma por eles construído ao modelo teórico, especialmente pelo fato de o roteiro da atividade conter imagens de histogramas correspondentes ao elétron confinado em uma caixa unidimensional para os níveis $n = 1$, $n = 2$ e $n = 3$, ver Apêndice C.

Após a construção dos histogramas, os alunos foram orientados a responder a um questionário composto por sete questões. A partir da análise das respostas e da participação dos estudantes durante a aula, observou-se que eles não apresentaram dificuldades em identificar através dos dados coletados durante a prática as regiões de maior e menor

probabilidade de encontrar o “elétron” em seus histogramas, nem em calcular a probabilidade específica associada ao LED 3, posição explicitamente indicada na questão 5, uma vez que o roteiro continha a fórmula necessária para esse cálculo, Apêndice C.

Entretanto, apesar da adequada interpretação dos dados experimentais e das representações gráficas, observou-se que alguns grupos apresentaram dificuldades em compreender se as medidas obtidas possuíam caráter determinista ou probabilístico, bem como em responder ao que significa afirmar que a mecânica clássica não é determinista, conforme solicitado na questão 7.

Essa dificuldade pode ser compreendida à luz dos estudos de Krijtenburg-Lewerissa *et al.* (2017), segundo os quais a compreensão de conceitos da mecânica quântica envolve desafios conceituais significativos. De acordo com os autores, a construção de uma compreensão mais abstrata do caráter probabilístico da teoria demanda um processo gradual de elaboração conceitual, uma vez que esses conteúdos diferem substancialmente das explicações predominantes na física clássica.

Dessa forma, os resultados indicam que, embora a sequência didática tenha favorecido a uma possível compreensão operacional e representacional dos conceitos trabalhados, a elaboração conceitual mais abstrata associada à mecânica quântica demanda um tempo maior de exploração. A necessidade de retomadas conceituais ao longo da atividade e as respostas sucintas observadas nos questionários evidenciam que a consolidação desses conceitos não ocorre de maneira imediata, reforçando a importância de ampliar o número de aulas e de oportunidades de discussão para aprofundar a compreensão dos estudantes. Esse aspecto é ainda reforçado pelo contexto de aplicação da proposta, no qual se observou uma participação irregular dos alunos, com ausências em algumas aulas, o que dificultou o acompanhamento contínuo da explicação e da sequência dos conteúdos abordados.

4.2 Percepção e análise dos resultados da etapa 3 e 4 da sequência didática.

Esta análise refere-se à aula teórica intitulada “*Tunelamento através de uma barreira*” e à aula experimental com diodos. Observou-se que os alunos se apresentaram dispersos e com baixo interesse, contexto semelhante ao identificado nas etapas 1 e 2. Entretanto, houve maior engajamento e participação quando ocorreram incentivos e intervenções diretas por parte da professora, evidenciando a importância da mediação docente para a mobilização dos estudantes durante as atividades propostas.

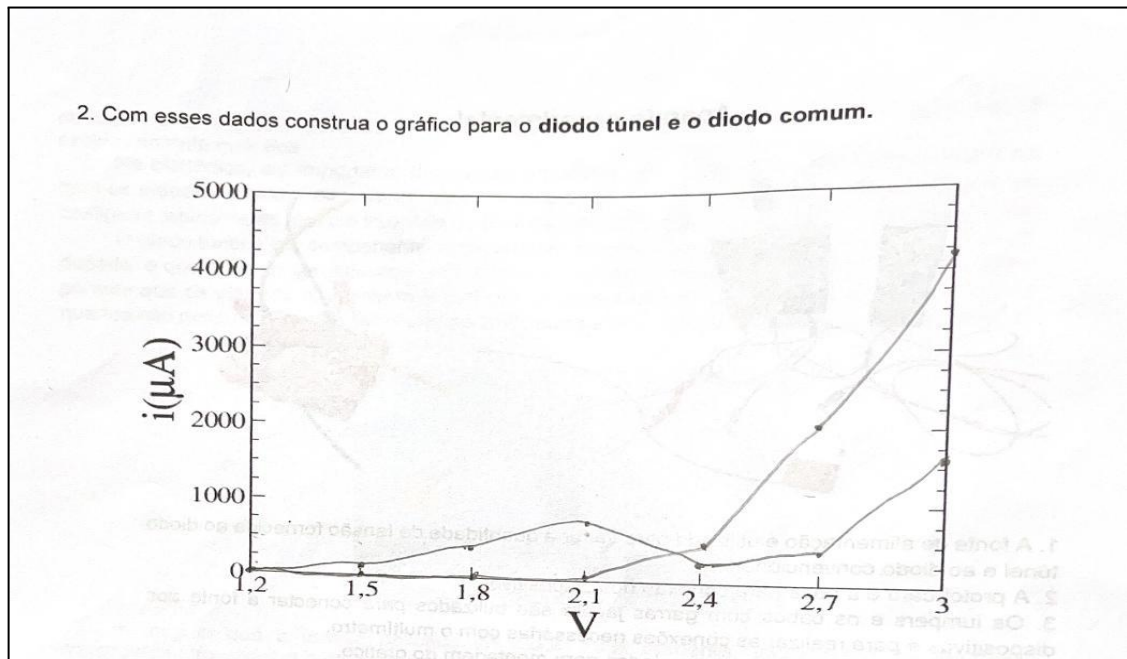
Observou-se maior interação espontânea dos alunos durante a realização do experimento com os diodos. Solicitou-se que os estudantes se organizassem em 5 grupos, os quais foram chamados à frente para receber as explicações e orientações referentes aos procedimentos a serem seguidos. Notou-se que alguns membros dos grupos não demonstraram interesse em se levantar para observar o experimento mais de perto e realizar as medições.

Os alunos não apresentaram dificuldades em compreender a atividade proposta. Como os valores de tensão (V) já estavam definidos previamente no roteiro, foi necessário apenas ajustá-los na fonte de tensão. Durante esse processo, alguns estudantes demonstraram curiosidade em interagir com os equipamentos. Sob orientação da professora foi permitido que eles mesmo ajustassem os valores na fonte de tensão e de forma espontânea foram se organizando para ajustar o valor da tensão. Ao longo das medições os alunos foram ganhando maior autonomia para realizar as leituras no multímetro exigindo menor intervenção da professora.

Depois de finalizadas as medidas com o diodo comum e com o diodo túnel foi solicitado que construíssem manualmente os gráficos de corrente (I) versus tensão (V) para os dispositivos. Notou-se que alguns grupos de alunos tiveram um pouco de dificuldade para compreender a prática, mas com a intervenção da professora conseguiram compreender e prosseguir com a atividade.

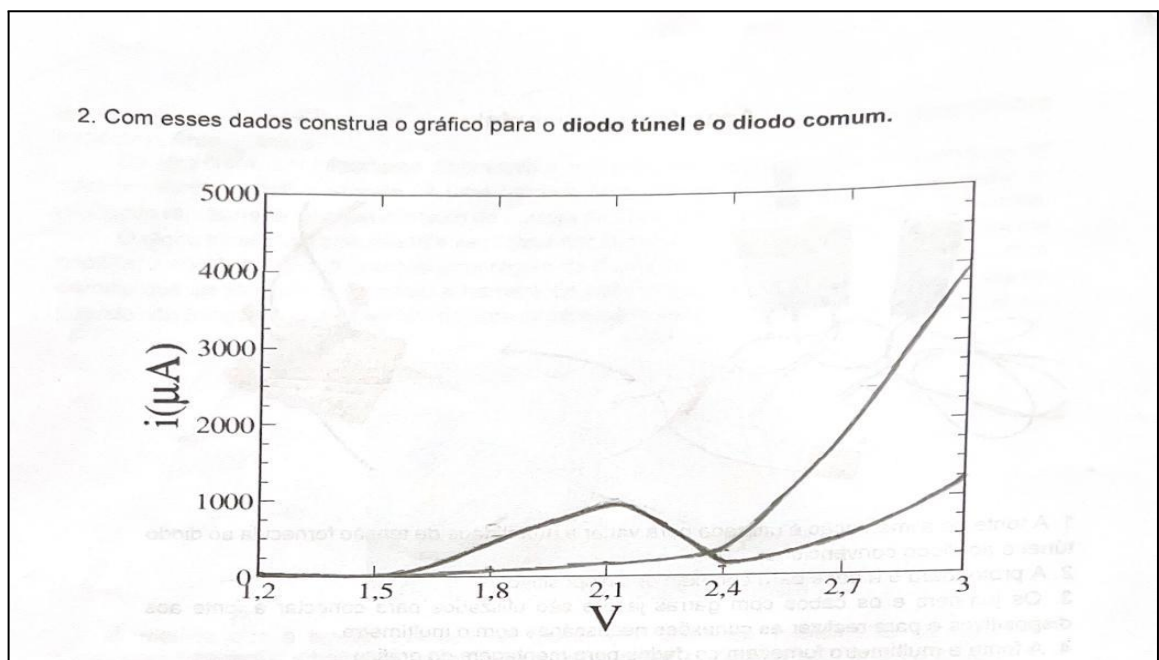
Nas Figuras 12, 13 e 14 é possível observar os três exemplos de gráficos feitos pelos grupos de estudantes a partir dos dados coletados, chamaremos novamente os de **Grupo A**, **Grupo B e Grupo C**. Pelas curvas desenhadas é possível observar o comportamento diferente da corrente (I) que passa pelo diodo convencional quando se compara com o diodo túnel. Para o diodo túnel, entre 2,1V e 2,4V a corrente elétrica diminui à medida que a tensão aumenta.

Figura 17: Imagem extraída do roteiro de aula prática preenchido pelos estudantes pelo Grupo A.



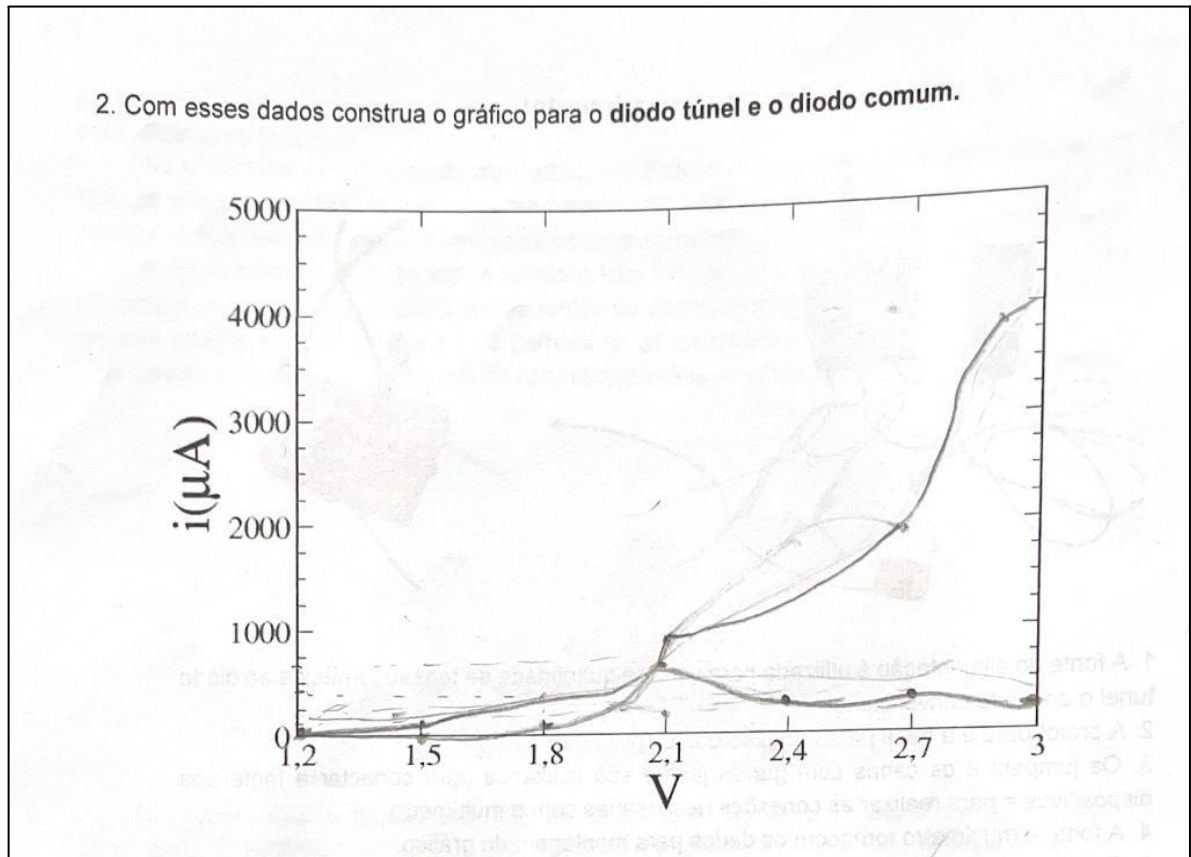
Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da pesquisa (2025).

Figura 18: Imagem extraída do roteiro de aula prática preenchido pelos estudantes pelo Grupo B.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da pesquisa (2025).

Figura 19: Imagem extraída do roteiro de aula prática preenchido pelos estudantes pelo Grupo C.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da pesquisa (2025).

Os gráficos mostram a corrente em função da tensão aplicada para um diodo túnel e um diodo convencional, utilizado para a análise comparativa das suas características físicas. De modo geral, todos os gráficos obtidos ficaram dentro do comportamento esperado. As divergências observadas ocorreram, principalmente, em função da dificuldade de alguns alunos em conectar corretamente os pontos experimentais, conforme exemplificado no gráfico apresentado na figura 19.

Após a construção dos gráficos, os alunos foram orientados a responder ao questionário presente no roteiro, composto por seis questões. A primeira questão: **1. O que é um diodo túnel e como o seu funcionamento difere de um diodo comum?**

Observou-se que muitos grupos limitaram-se a reproduzir a explicação presente na introdução do roteiro. Neste caso não é possível identificar se houve aprendizagem uma vez que o estudante não reelaborou a explicação com suas próprias palavras.

Apesar disso, alguns grupos conseguiram formular respostas com suas próprias palavras, mesmo que de forma sucinta. A seguir, apresenta-se um exemplo de resposta retirada do roteiro, transcrita fielmente, preservando a redação original dos estudantes.

“O diodo túnel difere pois no tunelamento é possível que o elétron atravessasse a barreira mesmo sem ter energia suficiente.”

A resposta, mostrou-se conceitualmente adequada para o nível no Ensino Médio ao reconhecer o tunelamento quântico como o principal fator que diferencia o diodo túnel do diodo convencional, evidenciando uma possível compreensão do fenômeno abordado.

A segunda questão: **Explique, com suas palavras, o comportamento dos elétrons em um diodo túnel quando a tensão aplicada é baixa.** Observou-se que os grupos tiveram respostas mais espontâneas sem ficar presos à explicação introdutória do roteiro. Um exemplo de resposta transcrita do roteiro, considerada adequada é apresentado a seguir:

“Inicialmente os elétrons conseguem atravessar a barreira por tunelamento quântico mesmo sem energia suficiente.”

“Com tensão baixa os elétrons atravessam a barreira por tunelamento, e a corrente já começa a fluir mesmo antes da tensão ser o suficiente para um diodo.”

Por outro lado, também foram observadas respostas com pouca fundamentação ou incompletas, como:

“Que quando a tensão aplicada em um diodo túnel é baixa, a barreira de potencial na junção PN.”

“Quando a tensão é baixa a um aumento significativo da corrente que depois cai.”

Notou-se que nesta questão as respostas ficaram bem divididas. Esse resultado sugere que, embora alguns grupos tenham formulado uma resposta mais elaborada e apropriada, ainda houveram dificuldades na organização e na explicitação conceitual, indicando a necessidade de maior mediação docente e de retomadas ao longo do processo de ensino.

Para a terceira questão: **O que se entende por região de resistência negativa em um diodo túnel? Explique porque esse fenômeno ocorre.** Notou-se que alguns grupos formularam respostas com maior rigor conceitual.

“A tensão aumenta, mas a corrente diminui. Isso ocorre porque reduz o tunelamento dos elétrons.”

“Muitas lacunas na banda de valência do lado P já estão ocupadas, restando poucos estados disponíveis para tunelamentos, e a corrente diminui, formando a região de resistência negativa.”

Algumas respostas se restringiram à observação do gráfico e não à explicação do fenômeno em si.

“É quando mesmo com o aumento da tensão a corrente continua caindo.”

“Resistência negativa é a parte da curva onde a corrente diminui mesmo quando a tensão aumenta.”

As respostas apresentaram-se novamente bem divididas, evidenciando que alguns grupos conseguiram mediar as informações contidas no roteiro e na aula, formulando explicações mais conceituais para o fenômeno observado. Em contrapartida, outros grupos não conseguiram relacionar o comportamento da curva característica ao fenômeno físico responsável, limitando-se à descrição gráfica sem a devida articulação conceitual.

Para a quarta questão: **Como o tunelamento quântico permite a passagem dos elétrons através da junção mesmo sem energia suficiente para ultrapassar a barreira de potencial?** Notou-se que os grupos conseguiram formular respostas semelhantes e trouxeram termos relevantes, como:

“O tunelamento ocorre porque os elétrons têm comportamento ondulatório, e sua onda de probabilidade se estende pela barreira fina.”

“O elétron atravessa a barreira porque existe uma probabilidade quântica de passagem, mesmo sem energia suficiente.”

“O tunelamento quântico ocorre porque, na mecânica quântica elétrons são descritos como ondas de probabilidade.”

Nota-se que, mesmo com uma linguagem mais sucinta e com a presença de alguns equívocos formais, aparecem termos que indicam compreensão dos aspectos centrais do fenômeno, como a menção ao comportamento ondulatório associado ao elétron e a menção da probabilidade da existência da ultrapassar a região proibida.

A quinta questão: **O que ocorre com o fluxo de elétrons quando a tensão aplicada ao diodo túnel é alta o suficiente? Como a condução muda?** A seguir, apresenta-se alguns exemplos de respostas obtidas:

“Ele vai passa na barreira de maneira clássica.”

“O tunelamento acaba e o diodo conduz como um diodo normal aumentando a corrente de novo.”

“Os elétrons ganham força para atravessar a barreira de forma clássica.”

De modo geral, as respostas sinalizam o reconhecimento por parte dos alunos que existe o momento da transição do regime de condução pelo tunelamento e de maneira clássica. No entanto, respostas sugerem pouca apropriação do fenômeno ligado ao fluxo dos elétrons.

Observa-se ainda um equívoco conceitual ao empregar o termo “força” no lugar de “energia”, confusão recorrente entre estudantes ao tratar de fenômenos quânticos. Esse tipo de dificuldade é discutido por McKagan *et al.* (2008), que apontam que muitos alunos apresentam limitações na compreensão dos modelos explicativos da mecânica quântica, tendo dificuldades em interpretar a função de onda como descrição de sistemas físicos, bem como em compreender gráficos de energia potencial como representações das interações entre os objetos e o ambiente. Além disso, é comum a confusão entre os conceitos de função de onda e energia, o que se reflete em explicações imprecisas como as observadas nesta questão.

A última questão: **Porque a análise da curva característica $I \times V$ é importante para entender o comportamento do diodo túnel?** Investigou como a análise da curva ajuda a compreender o comportamento do diodo túnel. A seguir tem-se algumas respostas representativas.

“Porque ela mostra claramente as três fases diodo túnel:

Quando a corrente sobe rapidamente: (tunelamento)

Quando cai (resistência negativa)

Quando volta a subir (Condução normal)

Sem a curva não dá para entender.”

“Deixa claro onde ele conduz muito, onde conduz pouco e ontem tem um “trecho estranho” de resistência negativa.”

“Por que ela ajuda a analisar o efeito de tunelamento quântico.”

Observa-se que, embora os estudantes reconheçam a importância da curva característica para identificar os diferentes regimes de funcionamento do diodo túnel, a maioria apresentou dificuldades em estruturar respostas mais bem fundamentadas do ponto de vista conceitual.

5 CONCLUSÃO

A física quântica é frequentemente percebida como um conteúdo distante da realidade dos estudantes, marcada pelo estigma de ser uma ciência complexa e inacessível. Diante desse cenário, este trabalho buscou contribuir para a aproximação desta ciência ao contexto escolar, evidenciando que, apesar de seu caráter abstrato e conceitualmente desafiador, é possível integrá-la ao Ensino Médio por meio de abordagens didáticas adequadas.

A inserção desses conteúdos no currículo foi realizada a partir de uma abordagem conceitual, fundamentada na teoria da mediação proposta por Vygotsky, aliada ao uso de analogias e de experimentos práticos como recursos didáticos. Essa abordagem teve como objetivo favorecer a aproximação dos estudantes a conceitos centrais da mecânica quântica, em especial à função de onda e ao seu caráter probabilístico, bem como ao fenômeno do tunelamento quântico, evidenciado pela análise da curva característica do diodo túnel.

Entretanto, houve alguns desafios durante a aplicação da sequência didática. O fato de tradicionalmente a física quântica ser abordada apenas ao final do Ensino Médio pode ter contribuído para uma participação mais limitada dos estudantes, uma vez que muitos já se encontram em fase de encerramento do ciclo escolar e estão preocupados com os vestibulares.

Ainda nesse contexto de dificuldades notou-se que, mesmo após a realização das atividades e o preenchimento do questionário, parte dos estudantes apresentou dificuldades em retomar e articular os conceitos trabalhados, indicando limites na consolidação conceitual. Esse comportamento persistiu mesmo após algumas retomadas dos principais conceitos ao longo da sequência didática, o que aponta para a necessidade de maior tempo de exposição e aprofundamento dos conteúdos, especialmente em se tratando de conceitos próprios da física quântica.

Ainda assim, durante as intervenções realizadas, foi possível identificar algumas ideias centrais nos discursos dos estudantes, como a noção do caráter probabilístico da mecânica quântica e a existência de uma função de onda associada ao elétron. À luz da teoria de Vygotsky, esses indícios podem ser interpretados como sinais de que os alunos iniciaram um possível processo de apropriação conceitual, ainda que de forma inicial e não plenamente sistematizada, o que reforça a importância da mediação docente no processo de ensino e aprendizagem de conteúdos abstratos, especialmente aqueles situados na zona de desenvolvimento proximal.

Além disso, o uso de analogias, apesar de suas limitações na relação entre o universo microscópico e o macroscópico, facilitou a explicação da professora e contribuiu para uma possível ampliação da compreensão dos conceitos por parte dos alunos, enquanto a realização de atividades experimentais favoreceu o engajamento dos estudantes.

Dessa forma, os resultados deste trabalho não permitem afirmar a consolidação da aprendizagem conceitual, mas apontam para potencialidades da sequência didática proposta, bem como para desafios inerentes à inserção da física quântica no Ensino Médio. Esses aspectos indicam caminhos para futuras intervenções, destacando a relevância de abordagens mediadas e experimentais para favorecer o contato dos estudantes com temas contemporâneos da Física.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Hederson; DINIZ, Renato. Analogias no ensino de Ciências: atividades desenvolvidas em um curso de formação continuada. **Educar Mais**, v. 6, p. 341–354, 2022.

ARAÚJO, M. S. T.; ABIB, M. L. V. S. Atividades experimentais no ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 176–194, 2003.

ARDUINO. Arduino Uno Rev3. **Ivrea**: Arduino, 2024. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Acesso em: 19 jan. 2026.

AUBUSSON, P. J.; TREAGUST, D.; HARRISON, A. *Learning and teaching science with analogies and metaphors*. Editor: S. M. Ritchie, **The World a/Science Education: Handbook of Research in Australasia**, Sense Publishers, Online Publication, p.199-216, 2009.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, DF: Ministério da Educação, 2017. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/conselho-nacional-de-educacao/base-nacional-comum-curricular-bnc>. Acesso em: 10 de jan. 2025.

CRUZ-HASTENREITER, R. S. **Das palavras aos quantas**: analogias como elementos de pensamento e ferramenta didática em aulas de Gna educação básica, 2015. 338 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, 2015.

CORREIA, Alípio; GONÇALVES, Cristina; CASTRO, Luizdarcy. Uma proposta de introdução à Física Moderna no Ensino Médio por meio do fenômeno de tunelamento quântico. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 17, n. 3, p. 63-97, 2022.

DUARTE, Maria da Conceição. Analogias na educação em ciências: contributos e desafios. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 1, p. 7–29, 2005.

EISBERG, M.; RESNICK, R. **Física Quântica**: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1994.

ENEM 2025: anunciadas datas de inscrições e provas. Secretaria de Comunicação Social (SECOM), Governo Federal. Publicado em 09 maio 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/acompanhe-a-secom/noticias/2025/05/enem-2025-governo-federal-anuncia-datas-de-inscricoes-e-provas>. Acesso em: 26 de jan. de 2026.

GASPAR, Alberto. **Atividades experimentais no ensino de Física**: uma nova visão baseada na teoria de Vygotsky. São Paulo: Livraria de Física, 2014.

GLYNN, Shawn M. Teaching science with analogies: a strategy for teachers and textbook authors. **Reading Research Report**, n. 15. Athens, GA: National Reading Research Center, University of Georgia; College Park, MD: University of Maryland, 1994.

INTERNATIONAL YEAR OF QUANTUM SCIENCE & TECHNOLOGY – IYQ. **What is IYQ?** [S.l.]: IYQ, 2025. Disponível em: <https://quantum2025.org/>. Acesso em: 24 jun. 2025.

KRIJTENBURG-LEWERISSA, H. J. Pol; BRINKMAN, A.; VAN JOOLINGEN, W. R. Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education, **Physical review physics education research**, v. 13, n. 1, p. 010109, 2017. Disponível em: <https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109>. Acesso em: 17 out. 2024.

LEÃO, Aroldo. **Abordagem Teórico – Experimental do Efeito do Tunelamento Quântico em Dispositivos Semicondutores**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais), Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2009. Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/arquivos/tcc/tcc1034.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Educação. Atividades de robótica já fazem parte das aprendizagens em escolas estaduais de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2021. Disponível: <https://www.educacao.mg.gov.br/atividades-de-robotica-ja-fazem-parte-das-aprendizagens-em-escolas-estaduais-de-minas-gerais/>. Acesso em: 24 jan. 2026.

MCKAGAN S. B.; PERKINS K. K.; WIEMAN C. E. *A Deeper Look at Student Learning of Quantum Mechanics: the Case of Tunneling*, 2008. Disponível em: <https://journals.aps.org/prper/pdf/10.1103/PhysRevSTPER.4.020103>. Acesso em: 20 jan. 2026.

MOREIRA, Marco Antônio. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1999.

OpenAI. ChatGPT, versão GPT-4. Inteligência Artificial. Disponível em: <https://openai.com/>. Acesso em: 27 de maio de 2026.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 18, n. 2, p. 135–151, ago. 2001.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antônio. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. **Investigações em Ensino de Ciências – V5(1)**, pp. 23-48, 2000. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/141158>. Acesso em: 15 jan. 2025.

PIMENTEL, Rafael Filgueira. **A linguagem e o ensino conceitual da dualidade onda-partícula no Ensino Médio**. 2022. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Física, Viçosa, MG, 2022.

PINTO, A. Custódio; ZANETIC, João. É possível levar a Física Quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999.

PLANCK, M. Zur. *Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, v. 2, p. 237–245, 1900.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Construindo argumentação na sala de aula: a presença do ciclo argumentativo, os indicadores de alfabetização científica e o padrão de Toulmin. **Revista Ciência e Educação**, v. 17, n. 1, p. 97-114, 2011.

Secretaria de Educação Básica. **Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio**. PCN. Brasília DF, 2000.

Secretaria de Estado de Educação de Minas Gerais – SEE-MG. Planos de Curso CRMG. Belo Horizonte: SEE-MG, 2019. Disponível em: <https://curriculoreferencia.educacao.mg.gov.br/index.php/plano-de-cursos-crmg>. Acesso em: 24 jun. 2025.

TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992.

TREAGUST, David; HARRISON, Allan; VENVILLE Grady. Teaching science effectively with analogies: an approach for preservice and inservice teacher education. **Journal of Science Teacher Education**, v. 9, p. 85–101, 1998.

VYGOTSKY, Lev Semenovich. **A formação social da mente**: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores. Organizadores: Michael Cole (*et al*); tradução José Cipolla Neta, Luís Silveira Menna Barreto, Solange Castro Afeche - 7ª edição - São Paulo: Martins Fontes, 2007.

Disponível: <https://pt.scribd.com/document/100924534/VIGOTSKI-2C-A-formacao-social-da-mente>. Acesso em: 24 dez. 2025.

VYGOTSKY, Lev Semenovich. **Pensamento e linguagem**. Edição eletrônica: Ed Ridendo Castigat Mores. 2001. Versão para eBook eBooks Brasil. Disponível em: <http://www.ebooksbrasil.org/adobeebook/vigo.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2026.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV**: ótica e física moderna. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

ZINGANO, Marco. Unidade do gênero e outras unidades em Aristóteles: significação focal, relação de consecução, semelhança, analogia. **Analytica**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 395–432, 2013.

APÊNDICE A MONTAGEM DO EXPERIMENTO - CAIXA QUÂNTICA

Apresentamos neste apêndice a descrição detalhada da montagem do experimento denominado Caixa Quântica, desenvolvido com fins didáticos para o estudo de conceitos fundamentais da mecânica quântica, em particular o modelo de um elétron confinado em uma caixa unidimensional, sendo possível ao estudante simular a medida de posição do elétron na caixa. Medir a posição de um elétron e fazer um levantamento estatístico sobre probabilidades, por meio de um experimento, é algo extremamente complicado de se fazer em uma sala de aula do Ensino Médio. A posição do elétron não é algo que se observa, mas algo que se produz por meio de uma interação de medida, cujo resultado é governado pela função de onda. Detectores de partículas usam por exemplo tubos de vácuo, câmaras de ionização, detectores semicondutores.

No apêndice também é descrito os materiais empregados, as etapas de montagem do circuito eletrônico, a programação utilizada no microcontrolador Arduino e a integração dos componentes na estrutura física do experimento. O intuito deste apêndice é fornecer as informações suficientes para a compreensão do funcionamento do aparato experimental, bem como possibilitar sua reprodução em contextos educacionais, assegurando clareza quanto às escolhas metodológicas e à correspondência entre o modelo teórico e sua implementação prática.

O custo total estimado para a construção do experimento é relativamente baixo, situando-se entre aproximadamente R\$ 80,00 e R\$ 150,00, dependendo dos fornecedores e das marcas dos componentes utilizados. Esse valor reduzido reforça o caráter didático e acessível do experimento, tornando-o viável para aplicação em contextos educacionais, como laboratórios de ensino, atividades demonstrativas em sala de aula e até mesmo projetos de extensão universitária. Alguns dos materiais, como o Arduino uno, LED e a bateria já estavam disponíveis na escola e efetivamente não foi preciso realizar a compra.

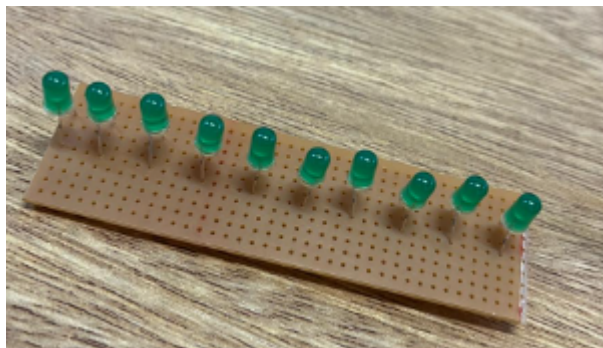
Para o montagem do experimento foram utilizados:

- 1 placa perfurada universal, 10 LEDs, emissores de luz verde (pode ser também emissor de outra cor),
- 1 botão (R-13-507) do tipo *push button*,
- 1 Arduino Uno,
- 1 bateria de 9v,

- 2 resistores de $150\ \Omega$,
- cabo flexível,
- 1 caixa de papel, do tipo joalheria.

1º passo: Inicialmente, os 10 LEDs foram posicionados de maneira uniforme sobre a placa perfurada, respeitando a orientação correta de polaridade de cada componente. Em seguida, procedeu-se à soldagem dos terminais negativos (cátodos) de todos os LEDs à placa, formando uma conexão comum, como indicado na Figura 1a. Para facilitar o trabalho foi utilizado um suporte com garras, visto pela Figura 1b. Essa etapa é fundamental para garantir a referência elétrica adequada do circuito, assegurando o correto acionamento individual de cada LED nas etapas posteriores da montagem.

Figura 1: Soldagem do LEDS à placa perfurada, utilizada no experimento da Caixa Quântica. a) leds soldados na placa e b) suporte utilizado no processo.



a)



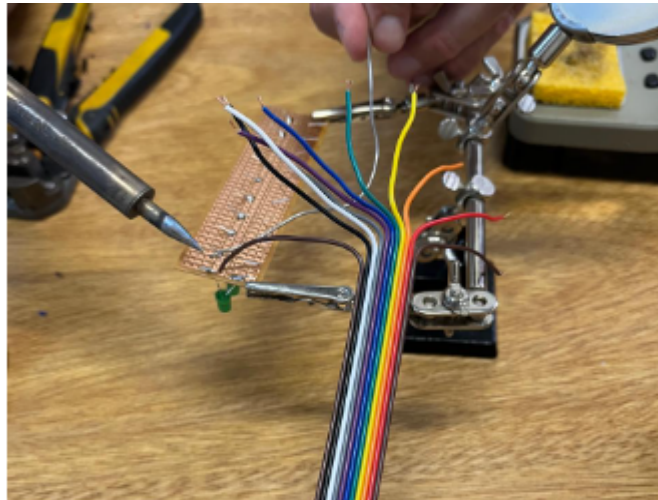
b)

Fonte: A autora.

2º passo: Após a fixação dos terminais negativos dos LEDs à placa perfurada, realizou-se a soldagem individual dos terminais positivos (ânodos) de cada LED a cabos flexíveis, Figura 2. Cada cabo foi conectado de forma independente, permitindo que os LEDs fossem posteriormente ligados a portas digitais distintas do Arduino. Essa configuração possibilita o controle individual do acionamento de cada LED por meio da programação do

microcontrolador, assegurando que cada LED represente, de maneira independente, uma região específica do espaço discretizado no experimento.

Figura 2: Soldagem dos fios ao terminal ânodo do LED utilizado no experimento da Caixa Quântica.



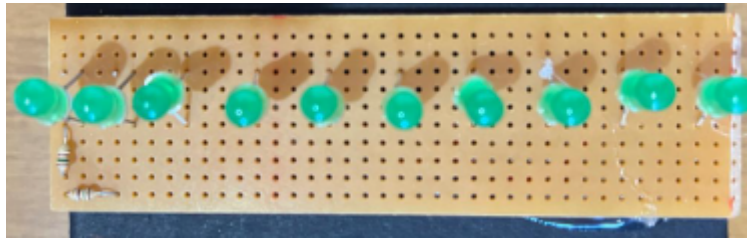
Fonte: A autora.

3° passo: Os LEDs utilizados no experimento são emissores de luz verde, os quais requerem a utilização de resistores limitadores de corrente para garantir seu funcionamento seguro. Para esse propósito, foram empregados dois resistores de $150\ \Omega$ soldados em série diretamente na placa perfurada, uma vez que não se dispunha de um resistor único com valor de resistência mais elevado, Figura 3. O conjunto equivalente, com resistência total de $300\ \Omega$, foi conectado à trilha comum que interliga os terminais negativos (cátodos) dos dez LEDs, enquanto a extremidade oposta será ligada, posteriormente por meio de um cabo flexível, ao terminal GND do Arduino.

A escolha do valor da resistência pode ser escolhida a partir da Lei de Ohm. Considerando uma tensão de alimentação de $V_{fonte} = 5,0V$, fornecida pelas portas digitais do Arduino, e uma queda de tensão típica de aproximadamente $V_{LED} = 2,0V$ a $V_{LED} = 2,2V$ para LEDs que emitem luz verde, a tensão efetiva sobre o resistor é da ordem de $2,8V$ a . Admitindo-se uma corrente nominal segura de aproximadamente $I = 10mA$ a $I = 20mA$, obtém-se um valor de resistência mínimo entre $R = 140\Omega$ e $R = 300\Omega$, conforme:

$$R = \frac{V_{fonte} - V_{LED}}{I}$$

Figura 3: Resistores soldados no canto inferior esquerdo da placa perfurada para o experimento da Caixa Quântica.



Fonte: A autora.

3º passo: Soldagem de cabos flexíveis aos terminais do botão do tipo push button, Figura 4. A soldagem assegura conexões elétricas firmes e mecanicamente estáveis. Os cabos soldados ao botão servirão para posterior ligação com as portas do Arduino, permitindo sua utilização como dispositivo de entrada do sistema. O botão foi configurado via programação no modo INPUT_PULLUP, no qual o microcontrolador utiliza um resistor de pull-up interno, mantendo o nível lógico alto quando o botão se encontra em repouso e nível lógico baixo quando pressionado. Essa configuração é interessante, pois dispensa o uso de resistores externos adicionais e garante uma leitura confiável do estado do botão, possibilitando que cada acionamento controle, de forma precisa, o sorteio e o acendimento individual dos LEDs conforme definido no código implementado.

Figura 4: Conexão dos fios ao botão do tipo *push button* utilizado no experimento da Caixa Quântica.

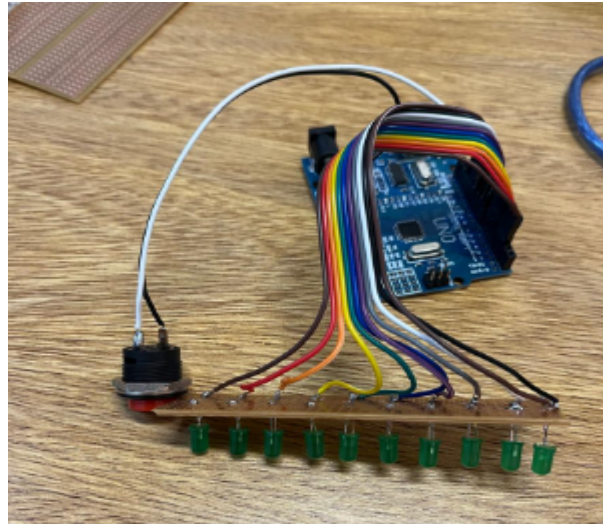


Fonte: A autora.

4º passo: Conexão dos LEDs e do botão ao microcontrolador Arduino, Figura 5. Os terminais positivos (ânodos) dos dez LEDs foram conectados individualmente às portas digitais 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 do Arduino, via os cabos soldados no 2º passo, possibilitando o acionamento independente de cada LED por meio da programação. O botão do tipo *push button* foi conectado à porta digital 12 e a porta GND, sendo configurado como

entrada no modo INPUT_PULLUP, de modo que o Arduino pudesse detectar o acionamento do botão a partir da variação do nível lógico. Essa etapa conclui a integração elétrica entre os componentes do circuito e o microcontrolador, permitindo a implementação do controle lógico e probabilístico do experimento conforme descrito no código desenvolvido.

Figura 5: Conexão dos LEDs e do botão ao microcontrolador Arduino Uno utilizados no experimento da Caixa Quântica.



Fonte: A autora.

5º passo: Definição do código.

```
// =====
// SIMULAÇÃO DE CAIXA QUÂNTICA COM LEDs
// Cada LED representa uma possível posição do elétron
// O LED aceso é escolhido com base em uma distribuição de probabilidades
// =====
// Número total de LEDs
const int numLEDs = 10;

// Pinos onde os LEDs estão conectados
const int ledPins[numLEDs] = {2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11};

// Pino do botão de acionamento
const int botaoPin = 12;
```

```

// Vetor com as probabilidades de cada LED acender
// Esses valores simulam a densidade de probabilidade  $|\psi(x)|^2$ 
// para o estado fundamental ( $n = 1$ ) da partícula na caixa
float probabilidades[numLEDs] = {
    // n = 1
    0.006, // LED 1 (extremo esquerdo da caixa)
    0.042, // LED 2
    0.100, // LED 3
    0.158, // LED 4
    0.194, // LED 5 (região mais provável)
    0.194, // LED 6 (região mais provável)
    0.158, // LED 7
    0.100, // LED 8
    0.042, // LED 9
    0.006 // LED 10 (extremo direito da caixa)
};

void setup() {

    // Inicializa a comunicação serial (para envio do LED sorteado ao computador)
    Serial.begin(9600);

    // Configura todos os pinos dos LEDs como saída
    // e garante que todos iniciem apagados
    for (int i = 0; i < numLEDs; i++) {
        pinMode(ledPins[i], OUTPUT);
        digitalWrite(ledPins[i], LOW);
    }
}

```

```
// Configura o botão como entrada com resistor de pull-up interno
// (o botão estará em HIGH quando solto e LOW quando pressionado)
pinMode(botaoPin, INPUT_PULLUP);

// Inicializa o gerador de números aleatórios
// usando um pino analógico "flutuando" como semente
randomSeed(analogRead(A0));
}

void loop() {
    // Verifica se o botão foi pressionado (nível LOW)
    if (digitalRead(botaoPin) == LOW) {
        delay(50); // Pequeno atraso para evitar efeito de "rebote" do botão (debounce)
        // Confirma se o botão continua pressionado
        if (digitalRead(botaoPin) == LOW) {
            // Sorteia um LED de acordo com as probabilidades
            int ledEscolhido = escolherLED();
            // Envia para o computador o número do LED sorteado (1 a 10)
            Serial.println(ledEscolhido + 1);

            // Acende o LED correspondente
            digitalWrite(ledPins[ledEscolhido], HIGH);

            // Mantém o LED aceso por 2 segundos
            delay(2000);

            // Apaga o LED
```

```

        digitalWrite(ledPins[ledEscolhido], LOW);
// Caso queira impedir múltiplos acionamentos com um único toque,
// pode-se usar este trecho:
// while (digitalRead(botaoPin) == LOW);
// delay(100);
    }
}
}
// =====
// FUNÇÃO QUE ESCOLHE O LED
// BASEADO NAS PROBABILIDADES
// =====
int escolherLED() {

    while (true) {
// Sorteia um LED aleatoriamente entre 0 e 9

        int led = random(0, numLEDs);

// Sorteia um número real entre 0 e 1

        float r = random(0, 10000) / 10000.0;
// Se o número sorteado for menor ou igual
// à probabilidade desse LED, ele é aceito

        if (r <= probabilidades[led]) return led;
    }
}

```

O código desenvolvido para o Arduino Uno simula a medida da posição do elétron confinado em uma caixa unidimensional em seu nível fundamental de energia. Na prática, o aluno aciona o experimento por meio de um botão; a cada aperto no botão, o Arduino realiza um sorteio baseado em um conjunto de valores previamente calculados, que representam a densidade de probabilidade ao longo da caixa, determinando qual LED deve acender. Cada LED simulada uma região específica do espaço onde o elétron pode ser detectado.

Os valores de probabilidade implementados no código fundamentam-se na interpretação probabilística da função de onda proposta por Born, segundo a qual o módulo ao quadrado da função de onda, $|\psi_{(x)}|^2$, fornece a densidade de probabilidade de se detectar a partícula em uma determinada posição. Considerou-se o modelo da partícula confinada em uma caixa unidimensional no estado fundamental ($n=1$), cuja solução da equação de Schrödinger é dada por

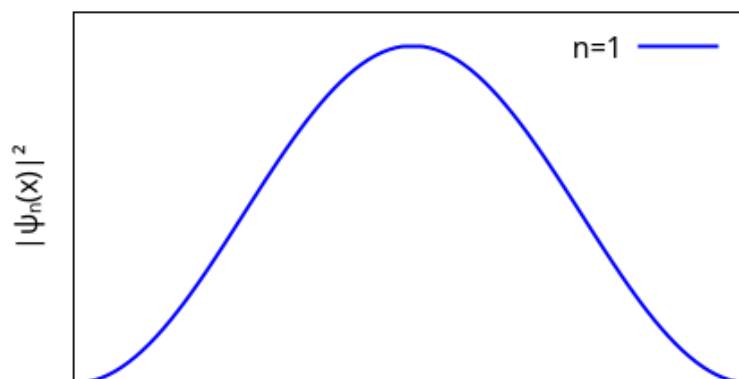
$$\psi_{(x)} = \sqrt{\frac{2}{L}} \operatorname{sen} \frac{\pi x}{L}$$

definida no intervalo $0 < x < L$. A densidade de probabilidade associada a esse estado é, portanto,

$$|\psi_{(x)}|^2 = \frac{2}{L} \operatorname{sen}^2 \left(\frac{\pi x}{L} \right)$$

a qual se anula nas extremidades da caixa e apresenta valores máximos na região central. A Figura 6 abaixo ilustra a densidade de probabilidades para $n = 1$.

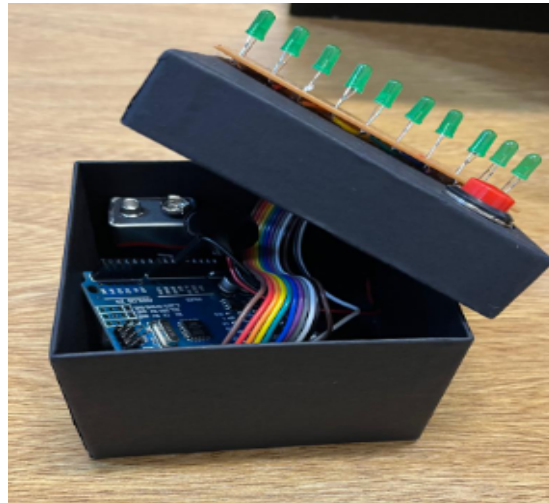
Figura 6: Densidade de probabilidade para um elétron preso em uma caixa de comprimento L no estado fundamental de energia. A maior probabilidade de se encontrar o elétron é na região central da caixa.



Fonte: A autora.

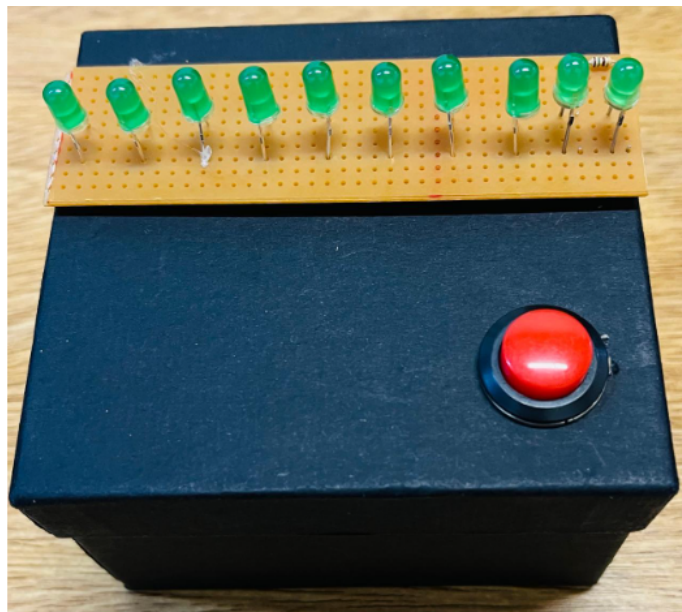
6º passo: Instalação na Caixa Quântica. O furo para encaixe do botão e dos fios, foram feitos manualmente, Figura 7. Os fios, a bateria 9V (para alimentação) e o Arduino ficam acomodados no interior da caixa, de modo que apenas o botão fique acessível, permitindo ao usuário acioná-lo e observar o acendimento dos LEDs, figura 8.

Figura 7: Montagem final instalada na Caixa Quântica, com o botão acessível e os componentes internos organizados no interior.



Fonte: A autora.

Figura 8: Caixa Quântica finalizada.

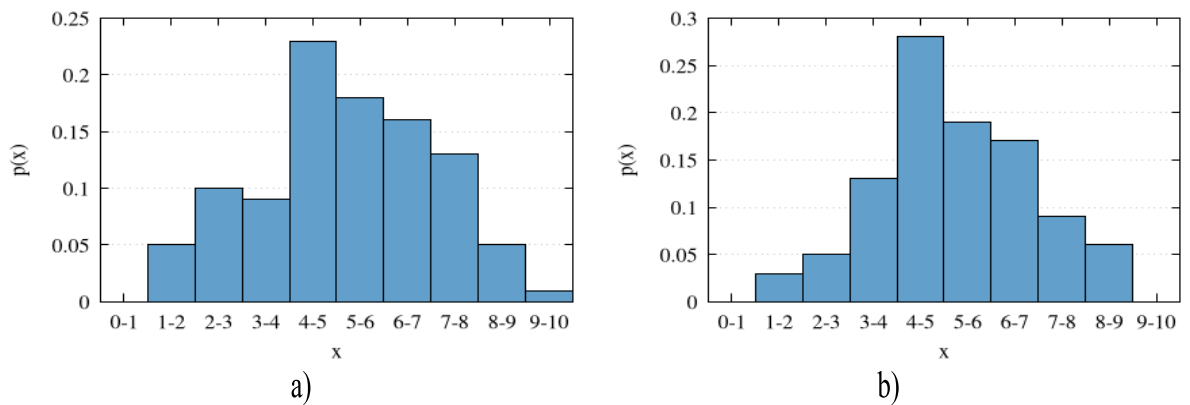


Fonte: A autora.

As figuras 9a e 9b mostram o resultado de duas simulações de experimentos realizados com a Caixa Quântica. Para cada uma delas foram feitas 100 medidas de posições

para o elétron. Quanto maior o número de LEDs utilizados na construção da Caixa Quântica, maior será a resolução da densidade de probabilidades encontrada a partir do experimento, mas também, maior será o número de medidas de posição do elétron necessárias para a construção do histograma. No caso do estado fundamental de energia, acreditamos que 10 LEDs são suficientes para a realização do experimento.

Figura 9: Probabilidade $p(x)$ de se encontrar o elétron em uma determinada região da Caixa Quântica. Os resultados a) e b) foram experimentalmente simulados usando-se para cada um 100 medidas de posição do elétron.



Fonte: A autora.

APÊNDICE B MONTAGEM DO EXPERIMENTO - DIODO TÚNEL

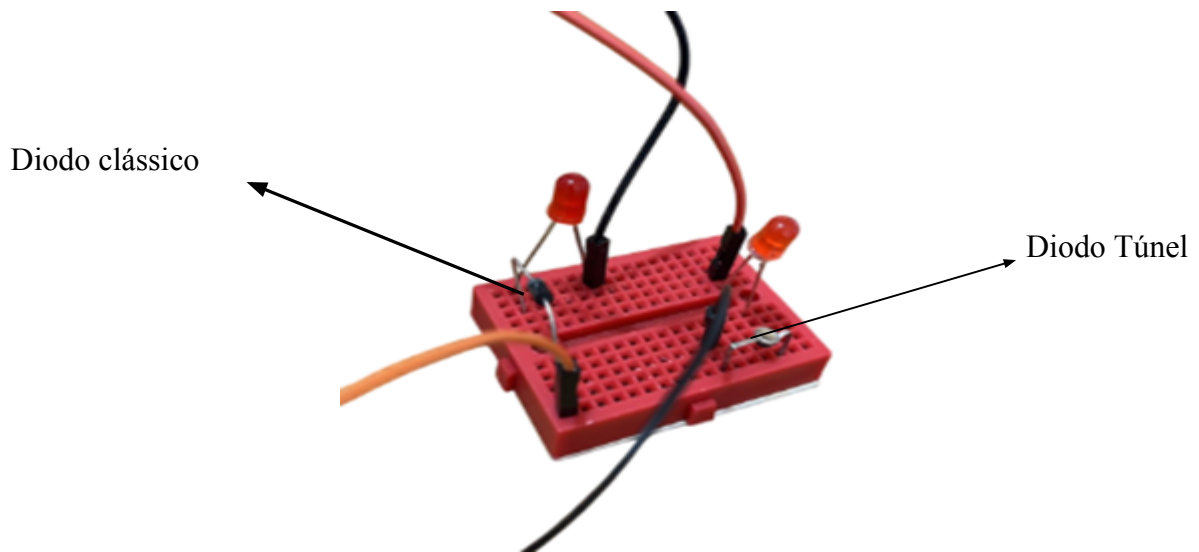
Para a realização do experimento para medida da curva de corrente (I) versus tensão (V) em um diodo túnel e em um diodo semicondutor convencional, foram utilizados os seguintes materiais:

- Diodo túnel (AU301A);
- Diodo Convencional (1N4007);
- Fonte de alimentação contínua;
- Protoboard;
- Cabos com garra “jacaré”;
- Fios *jumper*;
- LED;
- Multímetro digital.

Os componentes utilizados na montagem do experimento do diodo túnel, também apresentam custo relativamente baixo, reforçando a viabilidade de sua aplicação em atividades didáticas. Desconsiderando-se a fonte de alimentação e o multímetro, por se tratarem de equipamentos geralmente disponíveis em laboratórios de ensino, o custo médio dos demais materiais pode ser estimado com base em valores praticados no mercado, estando o custo total entre R\$ 40,00 e R\$ 75,00. O diodo túnel (AU301A) apresenta custo médio da ordem de R\$ 15,00 a R\$ 30,00, mas precisa ser, geralmente, importado. O ideal é que a montagem do experimento seja feita com antecedência, o nosso exemplar foi importado da Ucrânia via Amazon.

1º passo: Inicialmente, procedeu-se à montagem dos circuitos na protoboard. O diodo túnel e o diodo convencional foram conectados separadamente, cada um associado em série a um LED, Figura 1. A inclusão do LED no circuito teve como finalidade fornecer uma indicação visual qualitativa da passagem de corrente elétrica pelo diodo durante a aplicação da tensão. Na falta de um multímetro para realizar a leitura da corrente elétrica, pode-se usar a indicação visual do LED. A correta orientação dos terminais dos diodos (ânodo e cátodo) foi cuidadosamente verificada, de modo a garantir a polarização direta durante as medições. A Figura 1 ilustra a conexão dos dispositivos na protoboard, destacando os arranjos correspondentes ao diodo convencional e ao diodo túnel.

Figura 1: Conexão dos dispositivos a protoboard.

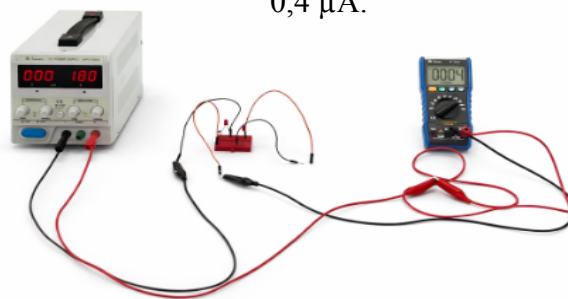


Fonte: A autora.

2º passo: Em seguida, a fonte de alimentação foi conectada ao circuito, permitindo a variação controlada da tensão aplicada aos diodos. Um multímetro foi inserido em série com o circuito, configurado para a medição de corrente elétrica, possibilitando a leitura de correntes da ordem de microamperes. Esse procedimento foi realizado inicialmente para o diodo túnel e, posteriormente, repetido de forma análoga para o diodo convencional.

As tensões aplicadas foram previamente estabelecidas no roteiro experimental, assumindo os valores de 1,2V; 1,5V; 1,8V; 2,1V; 2,4V; 2,7V e 3V. Para cada valor de tensão, ajustou-se a fonte de alimentação e registrou-se a corrente correspondente indicada pelo multímetro. O aparato experimental completo, durante uma das medições realizadas com o diodo convencional sob tensão de 1,8 V e corrente de 0,4 μA , é apresentado na Figura 2.

Figura 2: Circuito completo conectado ao diodo clássico, com tensão de 1,8 V e corrente de 0,4 μA .



Fonte: A autora.

3º passo: Após a realização de todas as medições de corrente para os valores de tensão previamente definidos, tanto para o diodo túnel quanto para o diodo convencional, os dados obtidos pelos estudantes são organizados em tabelas. Com base nesses resultados, são construídos os gráficos da corrente (I) em função da tensão (V), permitindo a análise comparativa do comportamento elétrico dos dois dispositivos, bem como a identificação das características típicas do diodo convencional e do diodo túnel.

APÊNDICE C - ROTEIRO DOS EXPERIMENTOS

Apresenta-se agora os roteiros utilizados em sala de aula para a realização dos experimentos da *Caixa Quântica* e do *diodo túnel*. Esses roteiros foram elaborados com o objetivo de orientar os estudantes durante as atividades experimentais, descrevendo os procedimentos, os materiais utilizados e as questões propostas para reflexão e registro dos resultados. Além de servirem como suporte à execução das práticas, os roteiros tiveram papel fundamental na mediação do processo de aprendizagem, auxiliando na compreensão dos conceitos discutidos ao longo da sequência didática e na sistematização das observações realizadas pelos alunos.

Roteiro do Experimento - Caixa Quântica

Introdução

Na mecânica quântica, não é possível prever com exatidão a posição ($x(t)$) de uma partícula. Diferentemente do que aprendemos na mecânica de Newton, a posição de uma partícula é descrita de forma probabilística. Isso significa que podemos apenas conhecer as regiões onde há uma maior probabilidade de se encontrar uma partícula. Um bom exemplo, simples, muito utilizado para fins de aprendizagem é o estudo do elétron confinado em uma caixa. Em uma caixa de comprimento L , a probabilidade de se encontrar o elétron em uma determinada posição segue uma densidade de probabilidade característica de cada nível de energia, como ilustrado na figura abaixo, sendo soluções da chamada equação de Schrödinger. Quanto maior a altura da função, maior será a probabilidade de se encontrar um elétron naquela posição da caixa.

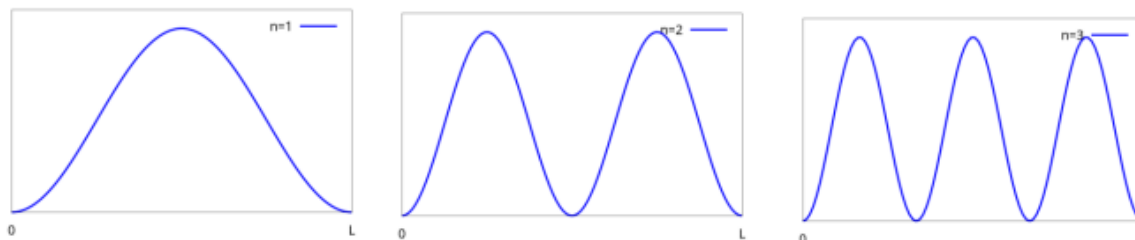


Figura 1: Densidade de probabilidade para um elétron confinado em uma caixa para os três primeiros níveis de energia: $n = 1$, $n = 2$ ou $n = 3$.

O experimento da Caixa Quântica foi desenvolvido para representar de forma visual e interativa, utilizando um conjunto de 10 LEDs, as posições de medida do elétron. No experimento da Caixa Quântica (figura 2), apresentado a seguir:



Figura 2: Montagem do experimento - Caixa Quântica.

cada LED representa uma possível região onde o elétron poderia ser encontrado dentro da caixa. Ao apertar o botão, um dos LEDs acende de acordo com a distribuição de probabilidades do elétron na caixa, simbolizando uma medida de posição. Após diversas medidas, o número de vezes com que cada LED acende permite construir um histograma, que se assemelha ao comportamento quântico dado pela densidade de probabilidades, previsto teoricamente.

Materiais Utilizados

1 placa perfurada universal, 10 LEDs, emissores de luz verde (pode ser também emissor de outra cor)
 1 botão (R-13-507) do tipo *push button*;
 1 Arduino Uno;
 1 bateria de 9v;
 2 resistores de 150 Ω ;
 cabo flexível;
 1 caixa de papel, do tipo joalheria.

Objetivo

Demonstrar, por meio da coleta de dados, como um conjunto de medidas evidencia a natureza probabilística da mecânica quântica e da previsão estatísticas da posição de uma partícula.

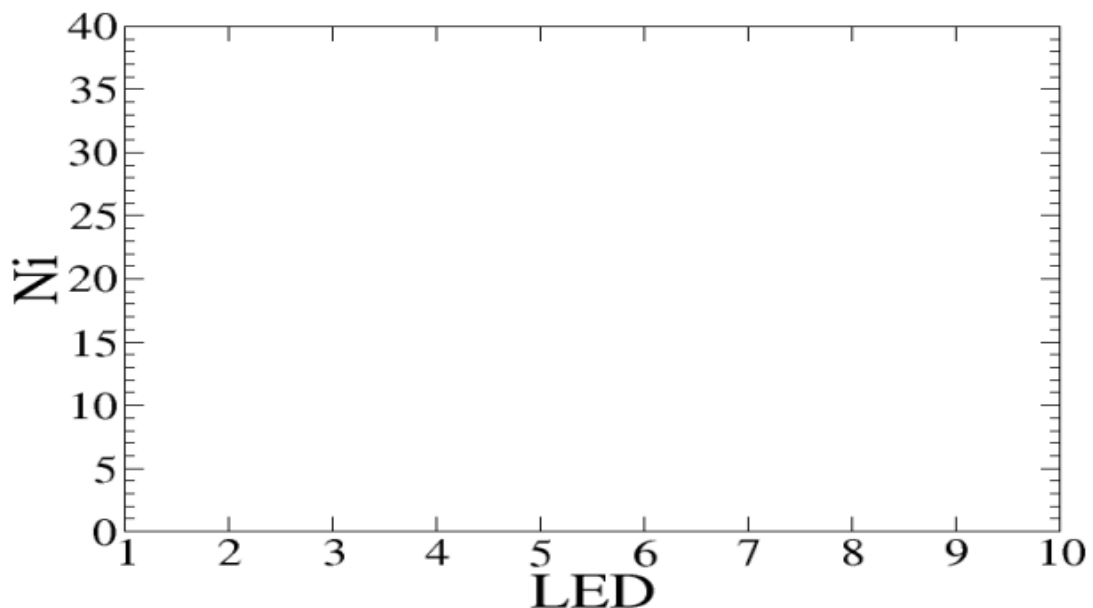
Procedimento

1. Aperte o botão vermelho da caixa $N = 100$ vezes. Ao apertar o botão um LED acende. Espere o LED apagar para apertar o botão novamente.
2. A cada LED aceso, registrar com o “X” na coluna 2, da tabela 1.

Tabela 1: LED e o número de vezes que acendeu.

LED_i	Registre com um o “X” a cada vez que o LED correspondente se acende.	N_i
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

3. Ao final das 100 medições, anote o número de vezes N_i que cada LED acendeu. Anote na coluna 3 da tabela 1.
4. Construa o histograma: o eixo x representa o número i do LED e o eixo y representa o número de vezes N_i que cada LED acendeu.



5. Calcule probabilidade pi para o LED i acender ao se apertar o botão. Para calcular a probabilidade pi , do LED i acender, é necessário dividir o número de vezes (N_i) que o LED i acendeu, pelo número total de vezes (N), que o botão foi apertado, ou seja, pelo número de medidas.

$$pi = \frac{N_i}{N}, \text{ onde } i=[1,10]$$

Questionário

1. O histograma que vocês encontraram, se assemelha a densidade de probabilidades do elétron na caixa em qual estado quântico (nível de energia)? $n = 1$, $n = 2$ ou $n = 3$? Veja a figura 1.
2. As medidas sugerem: comportamento determinista ou probabilístico? Explique.
3. Em qual região seria mais provável de encontrar o elétron, de acordo com seu histograma?
4. Em qual(is) posição(ões) é menos provável encontrar o elétron, de acordo com seu histograma?
5. De acordo com o experimento da Caixa - Quântica, qual a probabilidade de se encontrar o “elétron” na posição do LED 3?
6. Se aumentássemos o número de medições, o que aconteceria com o histograma?
7. O que significa dizer que a mecânica quântica é não determinística, segundo este experimento?

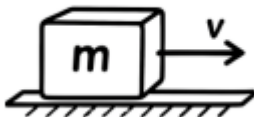
Referência

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV: ótica e física moderna**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

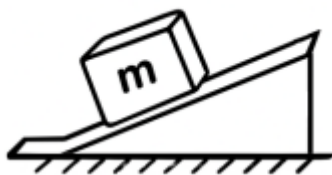
Roteiro do Experimento - Diodo Túnel

Introdução

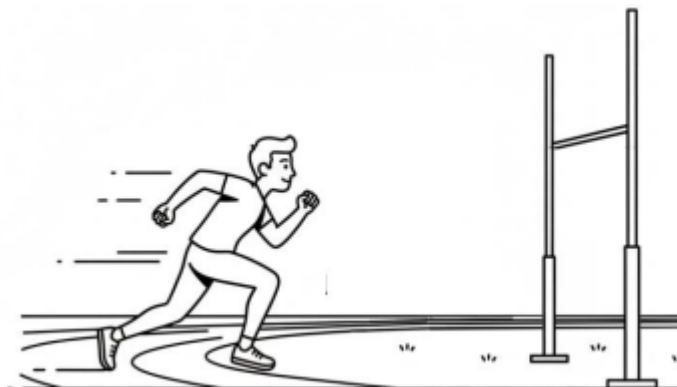
Introdução Imagine um bloco de massa m deslizando por uma superfície horizontal sem atrito com uma velocidade v :



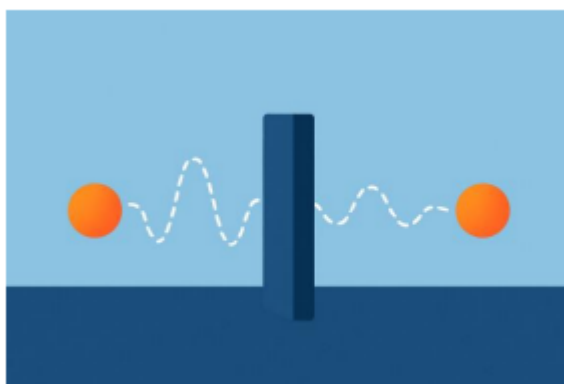
O bloco tem uma energia cinética, dada por $E_c = \frac{1}{2} m v^2$. Sabemos que ao subir por um plano inclinado, o bloco perde velocidade, ou seja, perde energia cinética e ao mesmo tempo ganha energia potencial gravitacional $U = mgy$.



Quanto maior a energia cinética do bloco maior, maior a altura que o bloco pode atingir no plano inclinado. Da mesma forma um atleta de salto em altura, precisa ter energia cinética suficiente, para ganhar energia potencial gravitacional e transpor o sarrafo.



No experimento anterior, da Caixa Quântica, vimos que o elétron, partícula quântica, é descrito em termos de probabilidades. Uma das previsões mais importantes da mecânica quântica é o chamado tunelamento quântico. Se o elétron fosse um atleta, mesmo não tendo energia cinética suficiente para transpor uma barreira de potencial, ainda assim ele teria uma probabilidade diferente de zero de atravessá-la. O tunelamento quântico não viola o princípio de conservação de energia e não tem paralelo direto no mundo macroscópico, sendo uma característica exclusivamente quântica. Na eletrônica, um importante dispositivo é o diodo túnel, um dispositivo semiconductor no qual os elétrons tunelam através de uma barreira de potencial. A corrente pode ser ligada ou desligada rapidamente (em um intervalo de poucos picossegundos) ao variar a altura da barreira. O diodo túnel é um componente semiconductor formado por uma junção PN extremamente dopada, o que faz com que apareça uma região de depleção muito estreita. Essa característica permite que os elétrons atravessem a barreira de potencial por tunelamento quântico, mesmo quando não possuem energia suficiente para ultrapassá-la um fenômeno puramente quântico.



À medida que a tensão aplicada ao diodo túnel aumenta, inicialmente os elétrons conseguem atravessar a barreira fina por tunelamento quântico, mesmo sem energia suficiente para superá-la, fazendo com que a corrente cresça rapidamente. Quando a tensão atinge valores médios, muitas lacunas na banda de valência do lado P já estão ocupadas, restando poucos estados disponíveis para o tunelamento, e a corrente diminui, formando a região de resistência negativa. Em tensões ainda mais altas, os elétrons passam a ter energia suficiente para superar a barreira de forma clássica, e o diodo passa a conduzir como um diodo comum. Este experimento permite visualizar a curva característica corrente (I) $\times$ tensão (V) do diodo túnel e compreender o efeito túnel quântico envolvido em seu funcionamento.

Objetivo

Construir as curvas características $I \times V$ de um diodo túnel e de um diodo convencional, identificando no diodo túnel a região de resistência negativa e o efeito de tunelamento quântico. Em seguida, comparar as duas curvas, destacando as diferenças entre seus comportamentos elétricos.

Materiais Utilizados

Diodo túnel (AU301A);

Diodo Convencional (1N4007);

Fonte de alimentação contínua;

Protoboard;

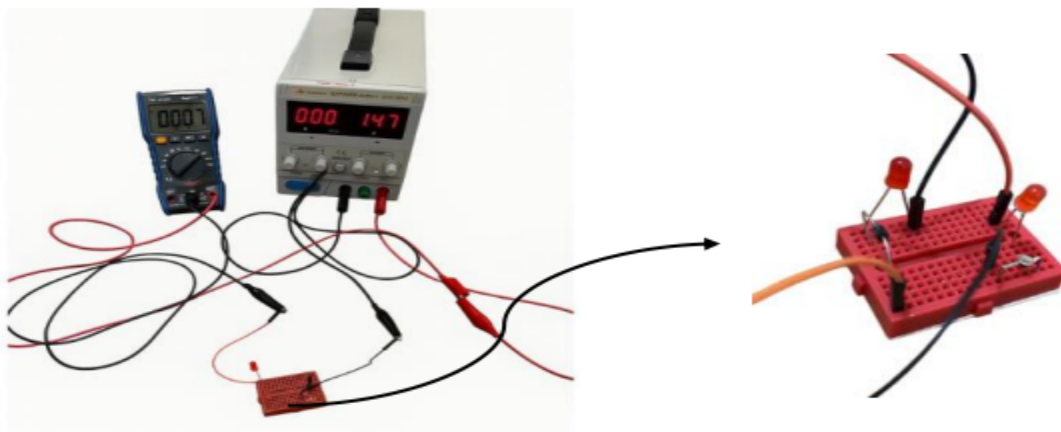
Cabos com garra “jacaré”;

Fios *jumper*;

LED;

Multímetro digital.

Aparato experimental



1. A fonte de alimentação é utilizada para variar a quantidade de tensão fornecida ao diodo túnel e ao diodo convencional.
2. A protoboard é a base para conexão dos dispositivos.
3. Os jumpers e os cabos com garras jacaré são utilizados para conectar a fonte aos dispositivos e para realizar as conexões necessárias com o multímetro.
4. A fonte e multímetro fornecem os dados para montagem do gráfico.

5. O LED permite visualizar o aumento e diminuição da corrente.

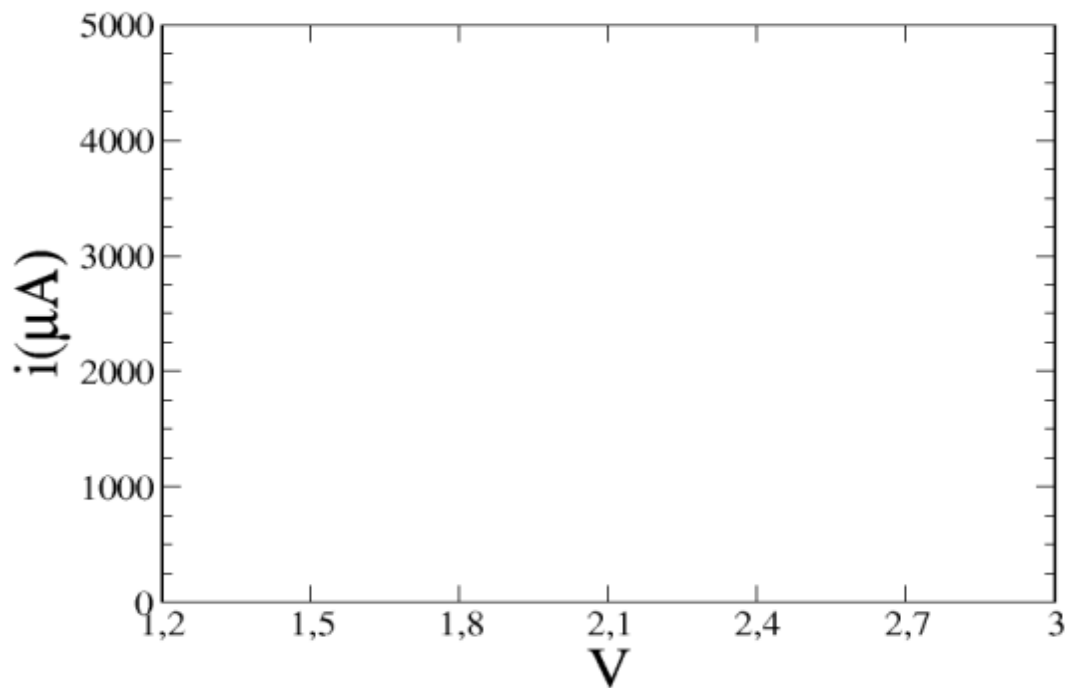
Procedimento

1. Para construir o gráfico, é necessário variar a tensão de forma gradual, identificar os valores indicados na Tabela 1 e medir a corrente correspondente a cada tensão aplicada. Registre todas as medições na Tabela 1.

Tabela 1. Tabela 1: Dados da corrente x tensão.

tensão (v)	corrente (μA) - diodo e LED	corrente (μA) - diodo túnel e LED
1,2		
1,5		
1,8		
2,1		
2,4		
2,7		
3,0		

2. Com esses dados construa o gráfico para o diodo túnel e o diodo comum.



Questionário

1. O que é um diodo túnel e como o seu funcionamento difere de um diodo comum?
2. Explique, com suas palavras, o comportamento dos elétrons em um diodo túnel quando a tensão aplicada é baixa.
3. O que se entende por região de resistência negativa em um diodo túnel? Explique porque esse fenômeno ocorre.
4. Como o tunelamento quântico permite a passagem dos elétrons através da junção mesmo sem energia suficiente para ultrapassar a barreira de potencial?
5. O que ocorre com o fluxo de elétrons quando a tensão aplicada ao diodo túnel é alta o suficiente? Como a condução muda?
6. Porque a análise da curva característica $I \times V$ é importante para entender o comportamento do diodo túnel?

Referência

EISBERG, M.; RESNICK, R. **Física Quântica**: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1994.

APÊNDICE D - PRODUTO EDUCACIONAL



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA/DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA POLO
14

PRODUTO EDUCACIONAL

**DO TEÓRICO AO EXPERIMENTAL: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA
INTRODUÇÃO A CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA QUÂNTICA**

AUTORES: Eliza Andrade Oliveira Pinto e Hallan Souza e Silva

APRESENTAÇÃO

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: DO TEÓRICO AO EXPERIMENTAL: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA INTRODUÇÃO A CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA QUÂNTICA, desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 14 – UFV/Viçosa-MG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

O produto educacional foi desenvolvido a partir das exigências do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física e é resultado de uma pesquisa cujo propósito foi aplicar uma sequência didática voltada ao ensino de temas de física quântica, de forma acessível ao contexto do Ensino Médio. O material apresentado tem como objetivo auxiliar professores no planejamento de aulas, além de oferecer suporte para a montagem e a aplicação dos experimentos.

A proposta didática foi organizada em aulas teóricas e aulas experimentais, visando articular a fundamentação conceitual com a prática experimental. Para o desenvolvimento das aulas, foram utilizados diferentes recursos didáticos, como apresentações em slides, experimentos, roteiros orientadores e o uso de analogias, com o objetivo de favorecer a compreensão dos conteúdos abordados.

As analogias foram elaboradas e aplicadas à luz do Guia FAR, cujo propósito é auxiliar o professor a potencializar o uso pedagógico das analogias no processo de ensino e aprendizagem. O Guia FAR organiza o uso das analogias em três etapas: Foco, Ação e Reflexão, possibilitando que o aluno identifique o domínio de referência, estabeleça correspondências com o conceito científico e reflita sobre os limites da analogia (Treagust, Harrison e Venville, 1998).

As aulas fundamentam-se na teoria da mediação de Vygotsky, segundo a qual o indivíduo internaliza os conceitos por meio da mediação e das interações sociais (Moreira, 1999). Dessa forma, a organização das atividades foi planejada para favorecer a interação entre os estudantes e o professor.

Dessa forma, a seção a seguir apresenta a descrição detalhada das aulas que compõem a sequência didática, explicitando a organização das atividades, os recursos didáticos utilizados, objetivos e as orientações para sua aplicação em sala de aula.

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

Sumário

Aula 1.....	111
Aula 2.....	119
Aula 3.....	129
Aula 4.....	135
Considerações finais.....	139
Referências.....	140
Apêndice D1.....	141
Apêndice D2.....	145

Aula 1

Tempo estimado

Duas aulas de 50 minutos.

Objetivos

- Reconhecer as limitações da física clássica na explicação da estabilidade do átomo.
- Analisar a evolução histórica dos modelos atômicos, de Thomson a Rutherford e Bohr, identificando os avanços conceituais de cada proposta.
- Compreender a quantização da energia a partir dos estudos de Planck e sua relação com os espectros atômicos.
- Explicar os postulados do modelo atômico de Bohr e sua importância para o átomo de hidrogênio.
- Entender a hipótese de De Broglie e a natureza dual da matéria.
- Compreender o significado da função de onda de Schrödinger e a interpretação probabilística proposta por Born.
- Diferenciar a visão determinística da física clássica da abordagem probabilística da mecânica quântica.
- Identificar o conceito de orbitais atômicos e relacioná-los às regiões de maior probabilidade de encontrar o elétron.

Recurso didático

Data show

Procedimentos

Aconselha-se que a aula 1 seja iniciada com uma pergunta problematizadora, com o objetivo de evidenciar as limitações da física clássica na explicação da estrutura atômica e promover o engajamento dos estudantes. Conforme destacam Sasseron e Carvalho (2011), o uso de questões problematizadoras no início da aula estimula o levantamento de hipóteses e a construção de explicações pelos alunos.

Em seguida, recomenda-se realizar uma retomada histórica dos modelos atômicos, abordando inicialmente o modelo de Thomson, seguido pelo modelo de Rutherford. Antes da introdução do modelo de Bohr, é importante contextualizar os experimentos e as descobertas que motivaram sua proposição, como os espectros descontínuos de emissão, a quantização da energia proposta por Max Planck e o conceito de fóton. Para facilitar a compreensão desses conceitos, sugere-se o uso de recursos visuais e analogias.

Na sequência, o professor pode conduzir a aula para a transição entre os modelos semiclassicos e a mecânica quântica, abordando a hipótese de De Broglie, a dualidade onda-partícula e o experimento de difração de elétrons, que fornece evidências experimentais do caráter ondulatório da matéria. Posteriormente, deve-se discutir o princípio da incerteza de Heisenberg, enfatizando a impossibilidade de se determinar simultaneamente a posição e o momento do elétron. Esse contexto permite introduzir a equação de Schrödinger e o conceito de função de onda, destacando a interpretação probabilística proposta por Max Born.

Para trabalhar essa interpretação de forma conceitual, recomenda-se o uso de gráficos e representações visuais, que auxiliem na compreensão da densidade de probabilidade de encontrar o elétron em uma determinada região do espaço, bem como do conceito de colapso da função de onda associado ao processo de medição.

Por fim, é apresentado o modelo atômico quântico, discutindo-se a organização dos elétrons em camadas, subníveis e orbitais. Sugere-se dar ênfase às formas geométricas dos orbitais *s* e *p*, relacionando-as às regiões de maior probabilidade de localização do elétron no átomo, de modo a consolidar a compreensão do caráter probabilístico da descrição quântica da matéria.

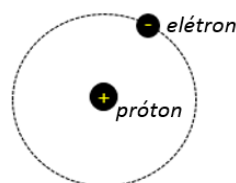
A sequência de 18 *slides* utilizados para o desenvolvimento da aula 1 são apresentados a seguir:

Figura 1: *Slides* usados na apresentação da aula 1. A aula 1 é sobre modelos atômicos e a origem da função de onda.

Modelos atômicos e a origem da Função de onda: *uma viagem pela evolução do pensamento científico sobre a matéria.*

Professora : Eliza Andrade

Por que os elétrons não caem no núcleo atômico?



Modelo para o átomo de hidrogênio.

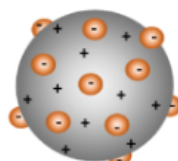
2

- De acordo, com a física clássica os átomos deveriam ser instáveis.
- Segundo a teoria eletromagnética clássica qualquer carga elétrica acelerada irradia ondas eletromagnéticas.
- Os elétrons orbitando o núcleo atômico possuem uma aceleração centrípeta, portanto deveria emitir radiação todo tempo.
- Assim a energia do elétron orbitando deveria diminuir continuamente e ele deveria se chocar com o núcleo em fração de segundos levando ao colapso atômico.

3

O que era conhecido sobre os átomos?

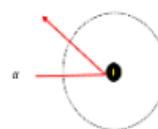
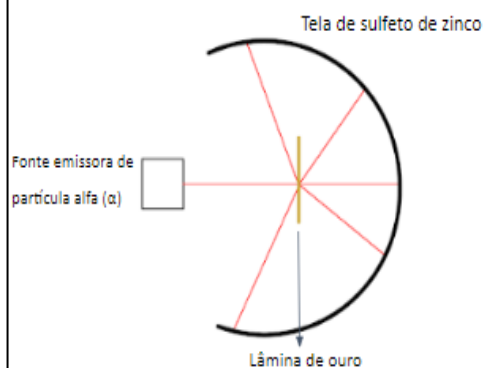
- Em 1897, Thomson descobriu o elétron.
- Para ele o átomo era como uma esfera de alguma substância positivamente carregada, ainda desconhecida, e dentro dela estava os elétrons.



Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/hadrex/particulas/>
Modelo de Thomson - pudim de passas.

4

- Ernest Rutherford e dois de seus alunos na tentativa de investigar o modelo de Thomson elaborou um experimento que consistia em emitir partículas alfas em direção a uma lâmina de ouro cercada por uma tela de sulfeto de zinco.

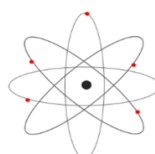


Os resultados foram totalmente diferentes do esperado, pois algumas partículas sofreram deflexões completas. Isso não seria possível se a carga positiva estivesse distribuída uniformemente pelo átomo, no caso, a partícula α sofreria pequenos desvios.

Esquema da montagem do experimento de Rutherford.

5

- O experimento resultou na descoberta de um núcleo atômico positivamente carregado contendo pelo menos 99,95% da massa do átomo.
- Rutherford sugeriu que os elétrons orbitavam o núcleo de modo semelhante aos planetas em torno do Sol.
- Porém, o modelo de Rutherford era instável, de acordo com a mecânica clássica o elétron deveria atingir o núcleo em fração de segundo.



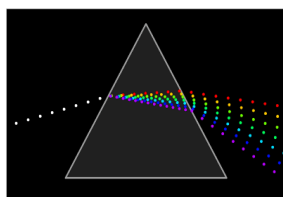
Modelo do átomo de Rutherford.

Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/hadrex/particulas/>

6

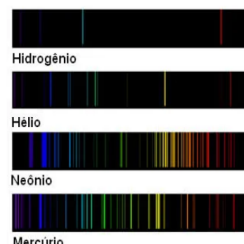
Modelo de Bohr: uma breve contextualização dos experimentos que motivaram seu modelo

Robert Bunsen observou que, ao serem aquecidos, os elementos químicos emitem luz, de forma semelhante ao que ocorre com o carvão em brasa. Quando essa luz é analisada por meio de um prisma, ela se decompõe em diferentes cores. No entanto, quando a luz emitida é proveniente de um gás aquecido, observa-se a formação de um espectro descontínuo, composto por linhas características de cada elemento.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Light_dispersion_conceptual.gif

Decomposição da luz branca.



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/espectros-eletronicos-estrutura-atomo.htm>

Espectro descontínuo.

7

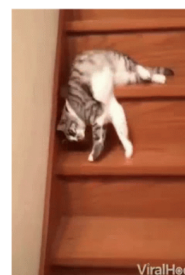
- Em 1900, o físico Max Planck estudou a radiação de corpos aquecidos e percebeu que a energia não era emitida ou absorvida de forma contínua, como se pensava, mas em **pacotes discretos**, chamados **quanta de energia**. Ou seja, a energia só podia assumir certos valores específicos.



Fonte: <https://tenor.com/view/gatinho-eskorregando-gif-26774940>

O Gato 1 pode estar em qualquer ponto do escorregador, o que significa que sua energia potencial pode assumir **qualquer valor** entre o topo e a base. Essa situação representa a ideia da física clássica, na qual a energia pode variar de forma **contínua**, sem restrições.

8



Fonte: <https://br.pinterest.com/pin/cat-stairs-gif-cat-stairs-going-down-discover-share-gifs--713328028486720418/>

O Gato 2 só pode descer a escada por degraus específicos, sem passar por posições intermediárias. Isso significa que ele só pode ter **determinados valores de energia**, representando a **quantização da energia** no modelo da física quântica.

- Niels Bohr usou as observações feitas através dos espectros descontínuos e a teoria de Planck para criar um novo modelo atômico.

O que é o fóton?

A radiação eletromagnética apresenta natureza dual, comportando-se tanto como onda quanto como partícula. Sua energia é transportada em pacotes denominados fótons.

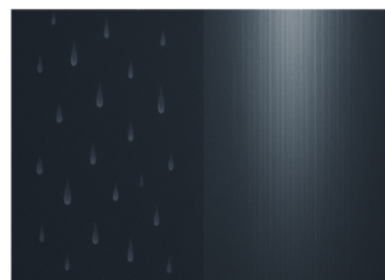
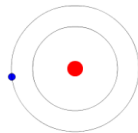


Imagem da chuva gerada por IA - Chatgpt.

9

→ O pensando de Bohr para o átomo era:

- Os elétrons só podem ocupar níveis de energia permitidos (órbitas quantizadas/ valores só podem ser múltiplos de uma unidade menor).
- Enquanto o elétron está em um nível permitido ele não emite energia (mesmo acelerado não emite energia).
- O elétron só absorve ou emite valores específicos de energia em forma de fóton quando muda de nível.



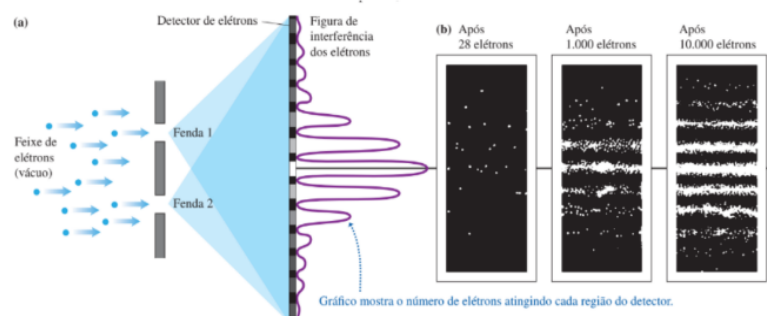
Fonte: <https://sites.ifi.unicamp.br/hadrex/particula> 10

Os postulados de Bohr explicou a instabilidade dos átomos e forneceu base para o entendimento para dos espectros. Mas o seu modelo explicou melhor o **átomo de hidrogênio**.

- Mas agora em vez de imaginar o elétron como uma partícula orbitando ao redor do núcleo, vamos considerar, conforme a hipótese de De Broglie, que ele se comporta também como uma **onda**.
- Segundo De Broglie os elétrons formam ondas estacionárias em torno do núcleo, o que explica o fato dos elétrons manterem órbitas bem definidas e não emitirem energia continuamente.
- Sua proposta foi muito inovadora para época levando em consideração que não havia nenhuma comprovação experimental para sua ideia.

11

- Anos mais tarde sua teoria foi comprovada pelo experimento da interferência de elétrons por uma fenda dupla.



Fonte: Young e Freedman 2016.
Difração de elétrons.

12

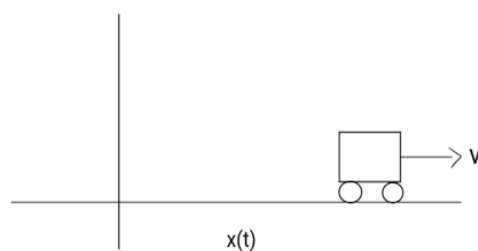
- De Broglie propôs que o elétron se comporta tanto como partícula quanto como onda, misturando conceitos clássicos e quânticos.
- Essa natureza ondulatória implica que não podemos determinar simultaneamente a posição e o momento do elétron, conforme estabelece o princípio da incerteza de Heisenberg.
- Portanto, ele não possui órbitas bem definidas. Para descrevê-lo de forma precisa, usamos sua função de onda, que indica as regiões onde é mais provável encontrá-lo.

13

- Baseado nessa falta de precisão de se encontrar a posição e o momento simultaneamente do elétron o cientista Schrödinger desenvolveu a função de onda (ψ), que representa matematicamente o comportamento da partícula como uma onda de matéria e contém as informações sobre o sistema quântico, como posição, energia e momento.
- Dando continuidade ao estudo da função de onda Max Born, interpretou que o quadrado do módulo da função de onda, $|\psi|^2$, indica a densidade de probabilidade de encontrar a partícula em uma determinada região do espaço num instante de tempo t .

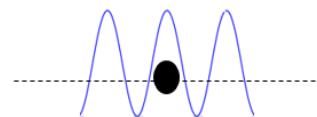
14

Partícula Clássica



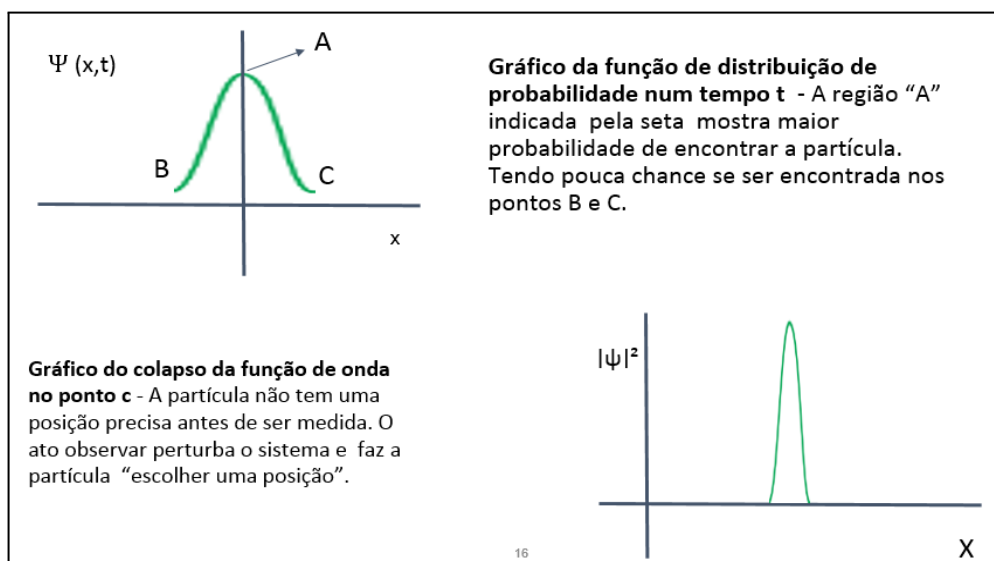
A física clássica é determinística - Uma vez que conhecida a sua posição e sua velocidade em um instante t podemos calcular com precisão no futuro por exemplo; sua velocidade, posição, momento, energia cinética dentre outras grandezas.

Partícula Quântica



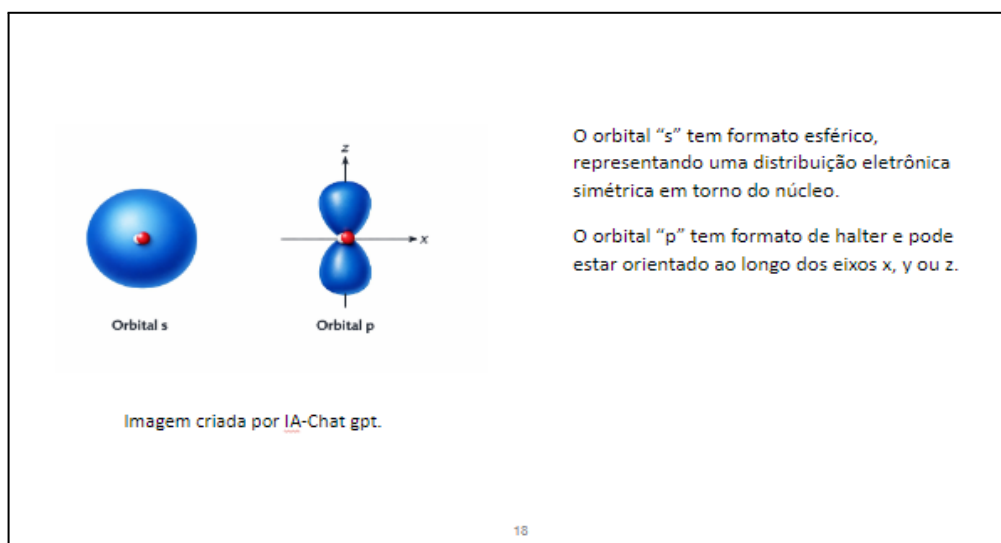
A mecânica quântica é indeterminística - mesmo conhecendo a função de onda em um instante t tudo que podemos determinar, é uma probabilidade de possíveis resultados.

15



- A dificuldade de prever com precisão a posição de elétron também se aplica ao átomo.
- O modelo atômico mais aceito atualmente se baseia na mecânica quântica.
- Em um átomo podem haver até 7 camadas (K, L, M, N, O, P, Q). As camadas contêm os subníveis (s, p, d, f) e esse contém os orbitais.
- A partir na resolução da equação de Schrödinger é possível encontrar maiores regiões de probabilidade de se encontrar o elétron no átomo (orbitais).
- Ao marcar cada ponto de maior probabilidade de encontrar um elétron um desenho tridimensional é formado que caracteriza a forma geométrica de cada orbital.

17



Aula 2

Tempo estimado

Duas aulas de 50 minutos.

Objetivo

-Demonstrar por meio da simulação experimental o caráter probabilístico da função de onda.

Recurso didático

Experimento

Roteiro orientador

Procedimentos

Recomenda-se iniciar a aula com uma orientação sobre como a prática será desenvolvida e, em seguida, realizar a entrega do experimento denominado “*Caixa Quântica*”. cujo objetivo é simular o caso do elétron confinado em uma caixa. Para esta sequência didática, foram construídos três kits idênticos, diferindo apenas na cor dos LEDs; dessa forma, a turma deve ser organizada em grupos, sendo entregue a cada grupo um kit do experimento.

O experimento é de simples manipulação e é acompanhado de um roteiro experimental, apresentado no Apêndice D1, cujo objetivo é nortear o desenvolvimento da atividade. O roteiro contém ainda um questionário orientador, com o propósito de conduzir os alunos à compreensão da natureza probabilística da mecânica quântica, por meio da coleta e análise de dados.

Para a realização da prática, orienta-se que o grupo pressione o botão da caixa 100 vezes, observando e registrando, a cada acionamento, a posição em que o LED acende. As diferentes posições dos LEDs podem ser interpretadas como possíveis posições da partícula no interior da caixa.

Os 10 LEDs são conectados a uma placa Arduino Uno, programada com o código apresentado no (5º passo) da montagem do experimento da Caixa Quântica. O código realiza

um sorteio a partir de um conjunto de valores previamente calculados, determinando qual LED deve acender a cada acionamento do botão.

A partir dos dados coletados, os alunos devem organizar as frequências de ocorrência de cada posição e construir um histograma, o qual permite simular a densidade de probabilidade do elétron no primeiro nível de energia. Em seguida, os alunos respondem às questões propostas no roteiro experimental, evidenciando que a previsão do comportamento da partícula ocorre de forma estatística, e não determinística.

O custo total estimado para a construção do experimento é relativamente baixo, situando-se entre aproximadamente R\$ 80,00 e R\$ 150,00, dependendo dos fornecedores e das marcas dos componentes utilizados. Ressalta-se que parte dos materiais necessários, como a placa Arduino Uno, os LEDs e a bateria, já estavam disponível na escola, reduzindo os custos de implementação.

A seguir, são apresentados os materiais necessários para a construção do kit, bem como os passos para sua montagem.

Montagem do experimento - Caixa Quântica

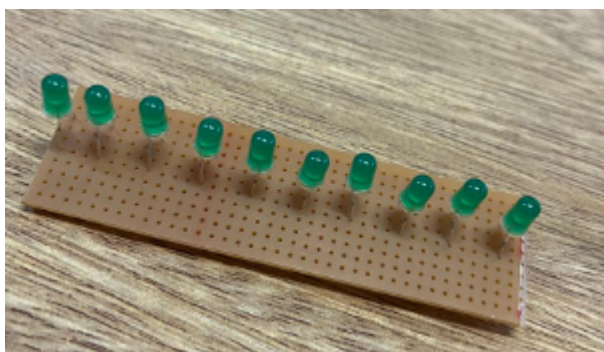
Para o montagem do experimento foram utilizados:

- 1 placa perfurada universal, 10 LEDs, emissores de luz verde (pode ser também emissor de outra cor),
- 1 botão (R-13-507) do tipo *push button*,
- 1 Arduino Uno,
- 1 bateria de 9v,
- 2 resistores de 150 Ω ,
- cabo flexível,
- 1 caixa de papel, do tipo joalheria.

1º passo: Inicialmente, os 10 LEDs são posicionados de maneira uniforme sobre a placa perfurada, respeitando a orientação correta de polaridade de cada componente. Em seguida, procedeu-se à soldagem dos terminais negativos (cátodos) de todos os LEDs à placa, formando uma conexão comum, como indicado na Figura 2a. Para facilitar o trabalho foi utilizado um suporte com garras, visto pela Figura 2b. Essa etapa é fundamental para garantir

a referência elétrica adequada do circuito, assegurando o correto acionamento individual de cada LED nas etapas posteriores da montagem.

Figura 2: Soldagem do LEDS à placa perfurada, utilizada no experimento da Caixa Quântica. a) leds soldados na placa e b) suporte utilizado no processo.



a)

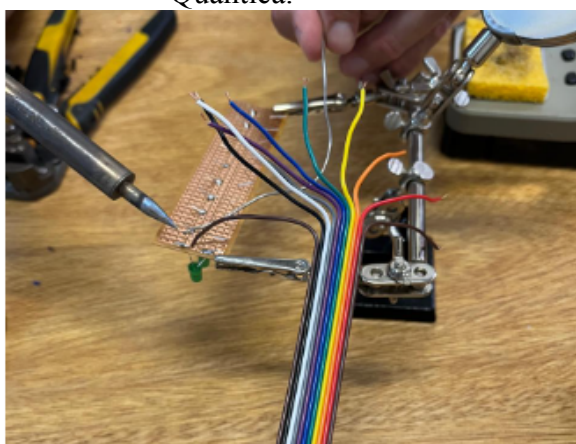


b)

Fonte: A autora.

2º passo: Após a fixação dos terminais negativos dos LEDs à placa perfurada, realiza-se a soldagem individual dos terminais positivos (ânodos) de cada LED a cabos flexíveis, Figura 3. Cada cabo foi conectado de forma independente, permitindo que os LEDs fossem posteriormente ligados a portas digitais distintas do Arduino. Essa configuração possibilita o controle individual do acionamento de cada LED por meio da programação do microcontrolador, assegurando que cada LED represente, de maneira independente, uma região específica do espaço discretizado no experimento.

Figura 3: Soldagem dos fios ao terminal ânodo do LED utilizado no experimento da Caixa Quântica.



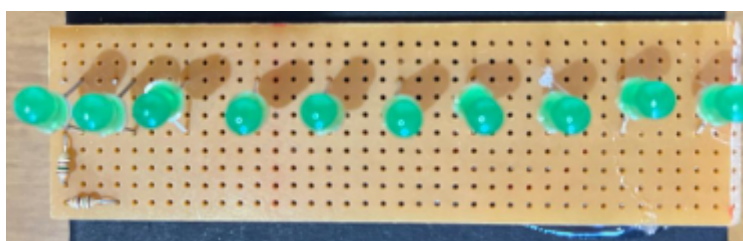
Fonte: A autora.

3° passo: Os LEDs utilizados no experimento são emissores de luz verde, os quais requerem a utilização de resistores limitadores de corrente para garantir seu funcionamento seguro. Para esse propósito, foram empregados dois resistores de $150\ \Omega$ soldados em série diretamente na placa perfurada, uma vez que não se dispunha de um resistor único com valor de resistência mais elevado, Figura 4. O conjunto equivalente, com resistência total de $300\ \Omega$, foi conectado à trilha comum que interliga os terminais negativos (cátodos) dos dez LEDs, enquanto a extremidade oposta será ligada, posteriormente por meio de um cabo flexível, ao terminal GND do Arduino.

A escolha do valor da resistência pode ser escolhida a partir da Lei de Ohm. Considerando uma tensão de alimentação de $V_{fonte} = 5,0V$, fornecida pelas portas digitais do Arduino, e uma queda de tensão típica de aproximadamente $V_{LED} = 2,0V$ a $V_{LED} = 2,2V$ para LEDs que emitem luz verde, a tensão efetiva sobre o resistor é da ordem de $2,8V$ a . Admitindo-se uma corrente nominal segura de aproximadamente $I = 10mA$ a $I = 20mA$, obtém-se um valor de resistência mínimo entre $R = 140\Omega$ e $R = 300\Omega$, conforme:

$$R = \frac{V_{fonte} - V_{LED}}{I}$$

Figura 4: Resistores soldados no canto inferior esquerdo da placa perfurada para o experimento da Caixa Quântica.



Fonte: A autora.

3° passo: Soldagem de cabos flexíveis aos terminais do botão do tipo *push button*, Figura 5. A soldagem assegura conexões elétricas firmes e mecanicamente estáveis. Os cabos soldados ao botão servirão para posterior ligação com as portas do Arduino, permitindo sua utilização como dispositivo de entrada do sistema. O botão foi configurado via programação no modo INPUT_PULLUP, no qual o microcontrolador utiliza um resistor de pull-up interno, mantendo o nível lógico alto quando o botão se encontra em repouso e nível lógico baixo quando pressionado. Essa configuração é interessante, pois dispensa o uso de resistores externos adicionais e garante uma leitura confiável do estado do botão, possibilitando que

cada acionamento controle, de forma precisa, o sorteio e o acendimento individual dos LEDs conforme definido no código implementado.

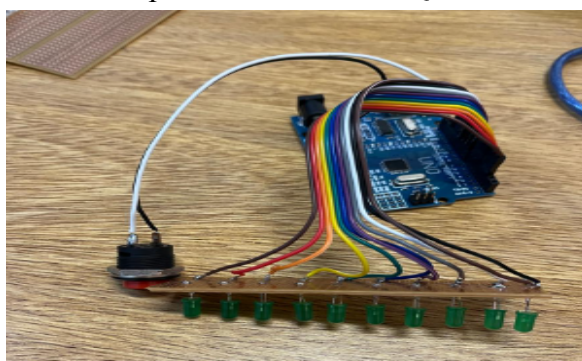
Figura 5: Conexão dos fios ao botão do tipo *push button* utilizado no experimento da caixa quântica.



Fonte: A autora.

4º passo: Conexão dos LEDs e do botão ao microcontrolador Arduino, Figura 6. Os terminais positivos (ânodos) dos dez LEDs foram conectados individualmente às portas digitais 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 do Arduino, via os cabos soldados no 2º passo, possibilitando o acionamento independente de cada LED por meio da programação. O botão do tipo *push button* é conectado à porta digital 12 e a porta GND, sendo configurado como entrada no modo INPUT_PULLUP, de modo que o Arduino pudesse detectar o acionamento do botão a partir da variação do nível lógico. Essa etapa conclui a integração elétrica entre os componentes do circuito e o microcontrolador, permitindo a implementação do controle lógico e probabilístico do experimento conforme descrito no código desenvolvido.

Figura 6: Conexão dos LEDs e do botão ao microcontrolador Arduino Uno utilizados no experimento da Caixa Quântica.



Fonte: A autora.

5º passo: Definição do código.

```
// =====
// SIMULAÇÃO DE CAIXA QUÂNTICA COM LEDs
// Cada LED representa uma possível posição do elétron
// O LED aceso é escolhido com base em uma distribuição de probabilidades
// =====

// Número total de LEDs
const int numLEDs = 10;

// Pinos onde os LEDs estão conectados
const int ledPins[numLEDs] = {2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11};

// Pino do botão de acionamento
const int botaoPin = 12;

// Vetor com as probabilidades de cada LED acender
// Esses valores simulam a densidade de probabilidade  $|\psi(x)|^2$ 
// para o estado fundamental ( $n = 1$ ) da partícula na caixa
float probabilidades[numLEDs] = {

    // n = 1
    0.006, // LED 1 (extremo esquerdo da caixa)
    0.042, // LED 2
    0.100, // LED 3
    0.158, // LED 4
    0.194, // LED 5 (região mais provável)
    0.194, // LED 6 (região mais provável)
    0.158, // LED 7
    0.100, // LED 8
    0.042, // LED 9
    0.006 // LED 10 (extremo direito da caixa)
};

void setup() {

    // Inicializa a comunicação serial (para envio do LED sorteado ao computador)
    Serial.begin(9600);

    // Configura todos os pinos dos LEDs como saída
    // e garante que todos iniciem apagados
    for (int i = 0; i < numLEDs; i++) {
        pinMode(ledPins[i], OUTPUT);
        digitalWrite(ledPins[i], LOW);
    }

    // Configura o botão como entrada com resistor de pull-up interno
    // (o botão estará em HIGH quando solto e LOW quando pressionado)
    pinMode(botaoPin, INPUT_PULLUP);
}
```

```

// Inicializa o gerador de números aleatórios
// usando um pino analógico "flutuando" como semente
randomSeed(analogRead(A0));
}

void loop() {

// Verifica se o botão foi pressionado (nível LOW)
if (digitalRead(botaoPin) == LOW) {

    delay(50); // Pequeno atraso para evitar efeito de "rebote" do botão (debounce)

    // Confirma se o botão continua pressionado
    if (digitalRead(botaoPin) == LOW) {

        // Sorteia um LED de acordo com as probabilidades
        int ledEscolhido = escolherLED();

        // Envia para o computador o número do LED sorteado (1 a 10)
        Serial.println(ledEscolhido + 1);

        // Acende o LED correspondente
        digitalWrite(ledPins[ledEscolhido], HIGH);

        // Mantém o LED aceso por 2 segundos
        delay(2000);

        // Apaga o LED
        digitalWrite(ledPins[ledEscolhido], LOW);

        // Caso queira impedir múltiplos acionamentos com um único toque,
        // pode-se usar este trecho:
        // while (digitalRead(botaoPin) == LOW);
        // delay(100);
    }
}

}

// =====
// FUNÇÃO QUE ESCOLHE O LED
// BASEADO NAS PROBABILIDADES
// =====
int escolherLED() {

    while (true) {

        // Sorteia um LED aleatoriamente entre 0 e 9
        int led = random(0, numLEDs);

```

```

// Sorteia um número real entre 0 e 1
float r = random(0, 10000) / 10000.0;

// Se o número sorteado for menor ou igual
// à probabilidade desse LED, ele é aceito
if (r <= probabilidades[led]) return led;
}

```

O código desenvolvido para o Arduino Uno simula a medida da posição do elétron confinado em uma caixa unidimensional em seu nível fundamental de energia. Na prática, o aluno aciona o experimento por meio de um botão; a cada aperto no botão, o Arduino realiza um sorteio baseado em um conjunto de valores previamente calculados, que representam a densidade de probabilidade ao longo da caixa, determinando qual LED deve acender. Cada LED simulada uma região específica do espaço onde o elétron pode ser detectado.

Os valores de probabilidade implementados no código fundamentam-se na interpretação probabilística da função de onda proposta por Born, segundo a qual o módulo ao quadrado da função de onda, $|\psi_{(x)}|^2$, fornece a densidade de probabilidade de se detectar a partícula em uma determinada posição. Considerou-se o modelo da partícula confinada em uma caixa unidimensional no estado fundamental ($n=1$), cuja solução da equação de Schrödinger é dada por

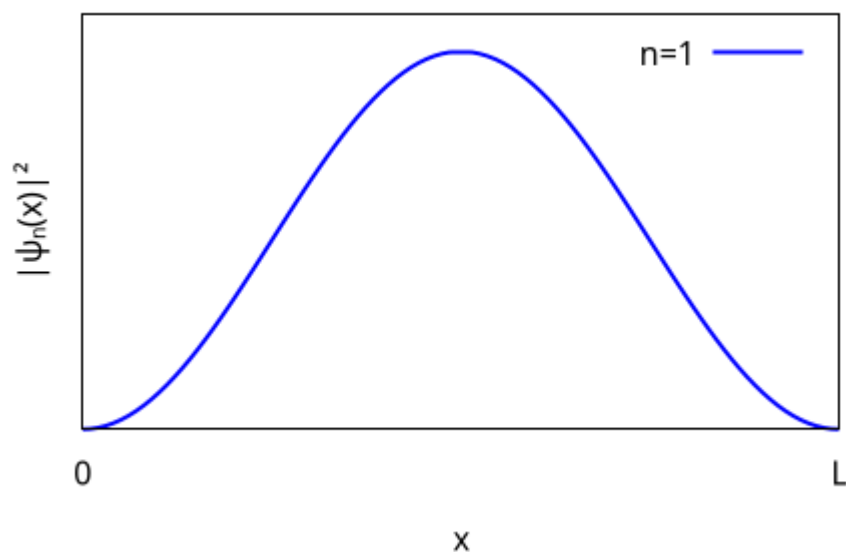
$$\psi_{(x)} = \sqrt{\frac{2}{L}} \operatorname{sen} \frac{\pi x}{L}$$

definida no intervalo $0 < x < L$. A densidade de probabilidade associada a esse estado é, portanto,

$$|\psi_{(x)}|^2 = \frac{2}{L} \operatorname{sen}^2 \left(\frac{\pi x}{L} \right)$$

a qual se anula nas extremidades da caixa e apresenta valores máximos na região central. A Figura 7 abaixo ilustra a densidade de probabilidades para $n = 1$.

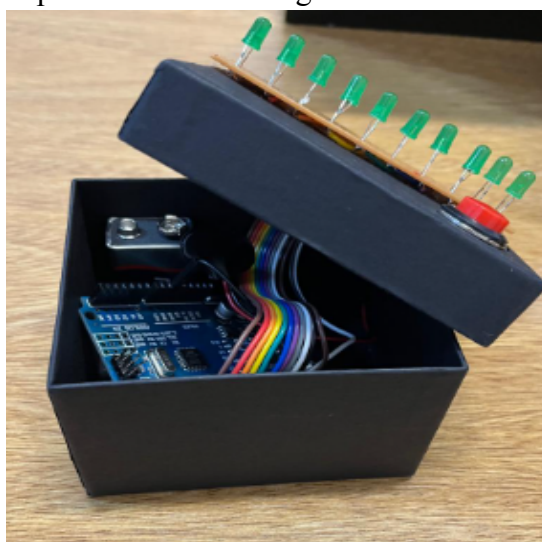
Figura 7: Densidade de probabilidade para um elétron preso em uma caixa de comprimento L no estado fundamental de energia. A maior probabilidade de se encontrar o elétron é na região central da caixa.



Fonte: A autora.

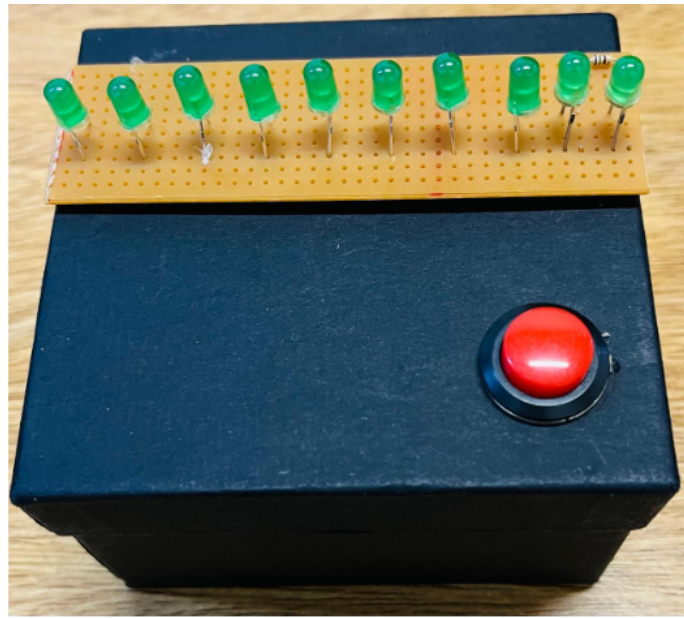
6º passo: Instalação na Caixa Quântica. O furo para encaixe do botão e dos fios, foram feitos manualmente, Figura 8. Os fios, a bateria 9V (para alimentação) e o Arduino ficam acomodados no interior da caixa, de modo que apenas o botão fique acessível, permitindo ao usuário acioná-lo e observar o acendimento dos LEDs, Figura 9.

Figura 8: Montagem final instalada na Caixa Quântica, com o botão acessível e os componentes internos organizados no interior.



Fonte: A autora.

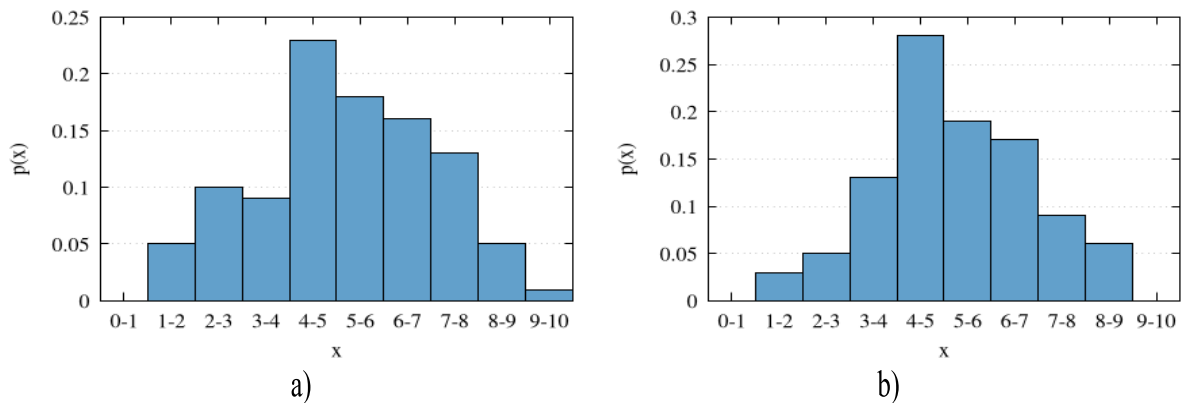
Figura 9: Caixa Quântica finalizada.



Fonte: A autora.

As figuras 10a e 10b mostram o resultado de duas simulações de experimentos realizados com a Caixa Quântica. Para cada uma delas foram feitas 100 medidas de posições para o elétron. Quanto maior o número de LEDs utilizados na construção da Caixa Quântica, maior será a resolução da densidade de probabilidades encontrada a partir do experimento, mas também, maior será o número de medidas de posição do elétron necessárias para a construção do histograma. No caso do estado fundamental de energia, acreditamos que 10 LEDs são suficientes para a realização do experimento.

Figura 10: Probabilidade $p(x)$ de se encontrar o elétron em uma determinada região da Caixa Quântica. Os resultados a) e b) foram experimentalmente simulados usando-se para cada um 100 medidas de posição do elétron.



Fonte: A autora.

Aula 3

Tempo estimado

Uma aula de 50 minutos

Objetivo

-Compreender o fenômeno do tunelamento quântico e reconhecer suas principais aplicações tecnológicas.

Recurso didático

Data show

Procedimentos

Recomenda-se iniciar a aula com uma analogia envolvendo um carrinho em uma montanha-russa. A representação visual desta aula considera uma situação em que o carrinho possui energia suficiente para superar a montanha, interpretada como uma barreira de energia. Em seguida, sugere-se apresentar aos alunos um contraexemplo, no qual o carrinho, ao não adquirir energia suficiente, não consegue completar o percurso, permanecendo antes da barreira.

A analogia é utilizada para auxiliar os alunos na compreensão de que, na física clássica, uma partícula somente ultrapassa uma barreira se possuir energia maior ou igual à energia potencial associada a ela. Recomenda-se estabelecer a comparação com a mecânica quântica, destacando que, mesmo sem energia suficiente, uma partícula, como o elétron, apresenta uma probabilidade não nula de ser encontrada do outro lado da barreira, caracterizando tunelamento, fenômeno puramente quântico.

Na sequência, sugere-se apresentar algumas aplicações tecnológicas associadas ao tunelamento quântico, com destaque para o diodo túnel. Esse dispositivo semicondutor foi desenvolvido por Leo Esaki em 1958, constituindo uma evidência experimental do fenômeno de tunelamento quântico. Uma de suas características mais notáveis é a curva característica corrente por tensão, que apresenta uma região de “resistência elétrica negativa”, na qual o aumento da tensão resulta na diminuição da corrente (Eisberg.; Resnick, 1994).

Antes da introdução desse componente, recomenda-se realizar uma breve contextualização sobre semicondutores, abordando seus conceitos gerais. Podem ser apresentados também o diodo comum e o LED, considerando que ambos são utilizados no experimento que complementa e consolida os conceitos trabalhados ao longo da aula.

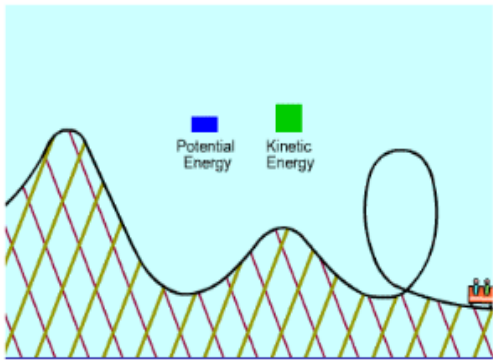
A seguir, são apresentados a sequência 12 *slides* utilizados para o desenvolvimento da aula.

Figura 11 : *Slides* usados na apresentação da aula 3. A aula 3 trabalha os conceitos de tunelamento e os semicondutores.

Tunelamento através de uma barreira

Professora : Eliza Andrade

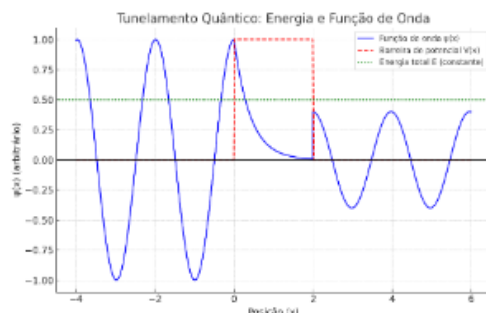
Na mecânica newtoniana, se uma partícula (como um carrinho) está inicialmente no lado esquerdo de uma barreira (montanha), ela só conseguirá atingir o lado direito se sua energia total for suficiente para superar a energia potencial máxima da barreira.



Fonte: <https://www.blogs.unicamp.br/ciencianerd/2017/02/06/montanha-russa-fisica-e-adrenalina/>

1

- Já na mecânica quântica uma partícula se comporta de maneira diferente mesmo que ela tenha uma energia menor ela pode aparecer do outro lado da barreira.



2

Aplicações do Tunelamento

- **Microscópio eletrônico de tunelamento** – usa o tunelamento de elétrons da amostra com a ponta do microscópio para obter imagens das superfícies das amostras em níveis atômicos.
- **Fusão nuclear** – no sol fusão ocorre quando dois núcleos tunelam pela barreira de potencial formada pela repulsão elétrica dos dois núcleos carregados positivamente. Ao se aproximarem o suficiente a força nuclear forte passa a agir e cause a fusão dos núcleos.
- **Semicondutor (Diodo túnel)** – um semicondutor no qual os elétrons podem tunelar por uma barreira de potencial. A corrente pode ser ligada e desligada em poucos segundos.

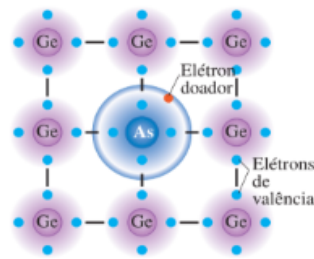
3

Semicondutores

- Um semicondutor possui uma resistividade intermediária entre um condutor e um isolante.
- Sua banda de valência estaria cheia e sua banda de condução é completamente vazia a zero absoluto. Com a excitação térmica um número significativa de elétrons migram da banda de valência para a banda de condução.
- A condutividade dos semicondutores proveniente da excitação térmica é chamada de condutividade intrínseca. Porém, existem, outras maneiras de reforçar a condutividade e uma delas é pela dopagem.
- Um exemplo disso, é quando uma pequena quantidade de arsênio é adicionada ao germânio. Ou quando o gálio é adicionado ao germânio.

4

Semicondutores do tipo n

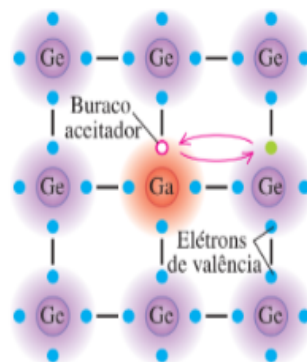


O arsênio tem 5 elétrons na banda de valência e o germânio 4 elétrons. Os 4 elétrons do arsênio serão usados na ligação covalente o quinto elétron pode ir facilmente para a banda de condução. A impureza que fornece elétrons é conhecida como *tipo n*.

Fonte: Young e Freedman 2016.

5

Semicondutores do tipo p



O gálio, pois possui três elétrons de valência e ao ser adicionado ao germânio deixa uma ligação covalente incompleta. Essa ausência de elétron gera buracos na banda de valência, responsáveis pela condução elétrica. Caracterizando o material como um semicondutor *tipo p*.

Fonte: Young e Freedman 2016.

6

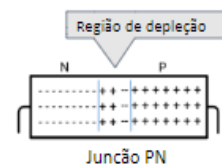
Dispositivos semicondutores - Diodo Retificador

- O diodo retificador permite a passagem de corrente elétrica em apenas um sentido.
- Ele é formado pela junção de um semicondutor do tipo p com o tipo n.
- Onde eles se encontram forma uma barreira de potencial na região de depleção que age como uma barreira para o fluxo dos elétrons.

Diodo retificador 1N4007.



Fonte: A autora.

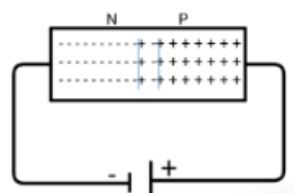


Junção PN

7

Dispositivos semicondutores - Diodo Retificador

- Quando o diodo é ligado de forma direta, polo positivo conectado ao tipo p e polo negativo conectado ao tipo n, ocorre uma diminuição na barreira de potencial e a corrente flui facilmente.

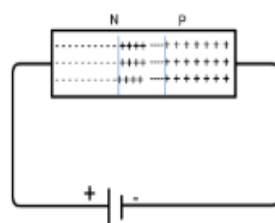


Ligação direta de uma fonte de tensão a um diodo.

8

Dispositivos semicondutores - Diodo Retificador

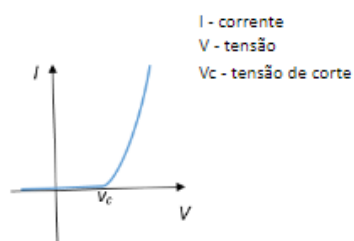
- Quando o diodo é ligado de forma inversa, polo negativo conectado ao tipo p e polo positivo no tipo n, a barreira de potencial da junção P-N aumenta, dificultando a passagem da corrente elétrica.



Ligação reversa de uma fonte de tensão a um diodo.

9

Dispositivos semicondutores - Diodo Retificador



Curva característica do diodo - corrente direta.

A principal função do diodo retificador é na alimentação de circuitos onde a rede elétrica precisa ser convertida de corrente alternada para corrente contínua como em carregadores de celular, computadores e demais eletrodomésticos.

10

Dispositivos semicondutores - Diodo emissor de luz (LED)

- O LED é um diodo constituído por uma junção PN capaz de emitir luz.
- Quando submetido a uma tensão direta, as lacunas são atraídas para a junção pelo lado P e os elétrons pelo lado N.
- Na região de junção, ocorre a recombinação entre elétrons e lacunas, liberando energia na forma de luz.



fonte: <https://www.smartkits.com.br/led-difuso-3mm-vermelho?srsltid=AfmBOopJ-144leS3agc-5uDTHdsG6lZHAAgs-ZtaWH4SMgd4GN3vH8E>

11

Dispositivos semicondutores - Diodo túnel

- O diodo túnel possui uma junção PN extremamente dopada, o que torna a barreira de potencial muito estreita.
- Por isso, mesmo com uma tensão baixa, os elétrons atravessam a barreira por tunelamento quântico, fazendo a corrente aumentar rapidamente.
- Quando a tensão aumenta um pouco mais, não há mais estados disponíveis (lacunas) para os elétrons tunelarem, então o tunelamento diminui e a corrente elétrica cai. Caracterizando a região de resistência elétrica negativa do diodo túnel.
- Com tensões ainda maiores, os elétrons ganham energia suficiente para ultrapassar a barreira, e o diodo passa a conduzir como um diodo comum.

diodo túnel (AU301A).

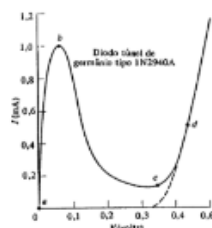


Fonte: A autora..

O diodo túnel pode ser usado em transmissores de rádio e amplificadores de micro-ondas.

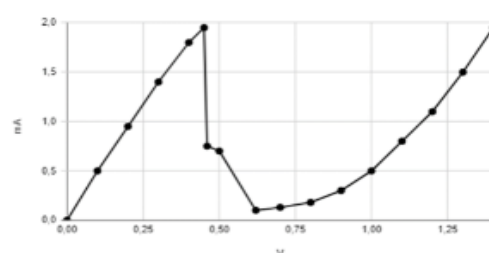
12

Dispositivos semicondutores - Diodo túnel



Fonte: Eisberg e Resnick, 1994.

Gráfico da corrente x tensão para o diodo túnel, prevista pela teoria.



Fonte: A autora.

Gráfico da corrente x tensão para o diodo túnel, obtido por meio do experimento.

13

Aula 4

Tempo estimado

Duas aulas de 50 minutos.

Objetivo

-Reforçar o entendimento, por meio do experimento, o fenômeno do tunelamento quântico e construir a curva característica corrente por tensão do diodo túnel, comparando-a com a do diodo comum.

Recurso didático

Experimentação

Roteiro orientador

Procedimentos

Recomenda-se a utilização deste experimento com o objetivo de trabalhar o conceito de tunelamento quântico por meio do semicondutor diodo túnel, possibilitando a abordagem do fenômeno de forma prática e compatível com o contexto da sala de aula. A partir da construção e da análise da curva característica corrente por tensão, os alunos podem identificar comportamentos que não são explicados pela física clássica, como a presença de uma região de resistência negativa, evidenciando a atuação de efeitos quânticos em dispositivos tecnológicos.

Para o desenvolvimento da prática, orienta-se que o aparato experimental seja disponibilizado previamente montado. Recomenda-se, ainda, que os valores de tensão a serem utilizados estejam previamente definidos no roteiro experimental, o qual deve ser apresentado aos alunos após a montagem do experimento. Dessa forma, basta ajustar os valores de tensão na fonte de alimentação e realizar a leitura da corrente por meio do multímetro. Essa organização permite otimizar o tempo destinado à atividade, direcionando a atenção dos alunos para a construção da curva característica e para a análise dos resultados experimentais.

Ademais, os componentes utilizados na montagem do experimento do diodo túnel apresentam custo relativamente baixo. Desconsiderando-se a fonte de alimentação e o multímetro, por se tratarem de equipamentos geralmente disponíveis em laboratórios de

ensino, o custo médio dos demais materiais pode ser estimado com base nos valores praticados no mercado, situando-se entre aproximadamente R\$ 40,00 e R\$ 75,00. O diodo túnel (AU301A) apresenta custo médio entre R\$ 15,00 e R\$ 30,00, sendo, em geral, um componente importado. Dessa forma, recomenda-se que a aquisição do diodo e a montagem do experimento sejam realizadas com antecedência.

Na sequência, são apresentados o guia orientador para a montagem do aparato experimental e o roteiro utilizado durante a prática é apresentado no Apêndice D2.

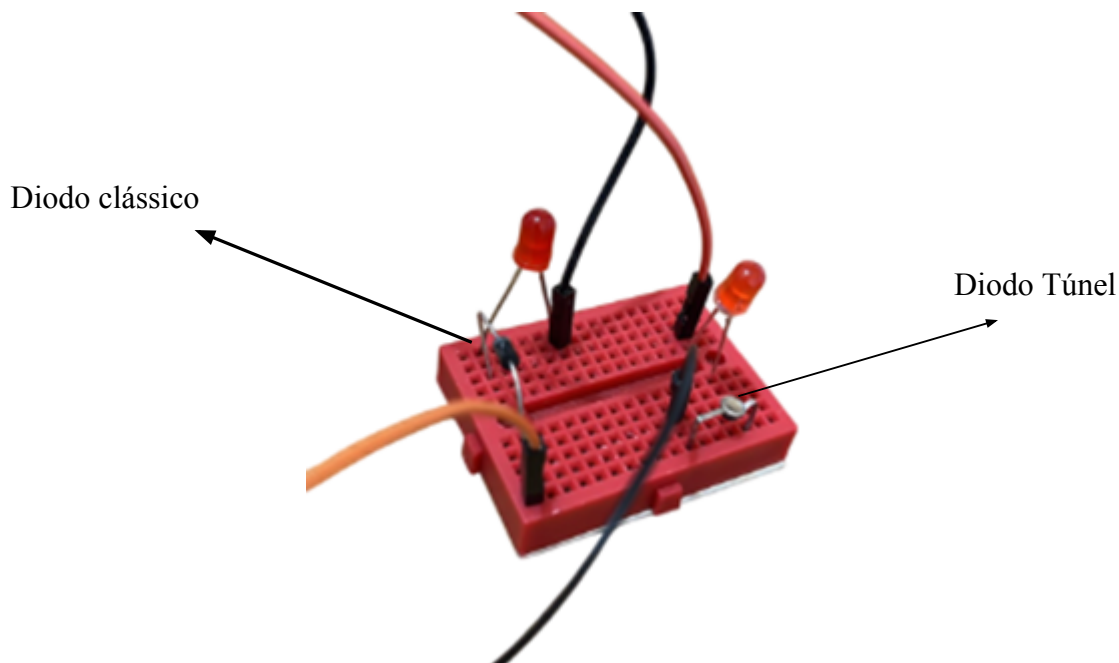
Montagem do experimento - Diodo Túnel

Para a realização do experimento para medida da curva de corrente (I) versus tensão (V) em um diodo túnel e em um diodo semicondutor convencional, foram utilizados os seguintes materiais:

- Diodo túnel (AU301A);
- Diodo Convencional (1N4007);
- Fonte de alimentação contínua;
- Protoboard;
- Cabos com garra “jacaré”;
- Fios *jumper*;
- LED;
- Multímetro digital.

1º passo: Inicialmente, procedeu-se à montagem dos circuitos na protoboard. O diodo túnel e o diodo convencional foram conectados separadamente, cada um associado em série a um LED, Figura 12. A inclusão do LED no circuito teve como finalidade fornecer uma indicação visual qualitativa da passagem de corrente elétrica pelo diodo durante a aplicação da tensão. Na falta de um multímetro para realizar a leitura da corrente elétrica, pode-se usar a indicação visual do LED. A correta orientação dos terminais dos diodos (ânodo e cátodo) foi cuidadosamente verificada, de modo a garantir a polarização direta durante as medições. A Figura 12 também ilustra a conexão dos dispositivos na protoboard, destacando os arranjos correspondentes ao diodo convencional e ao diodo túnel.

Figura 12: Conexão dos dispositivos a protoboard.

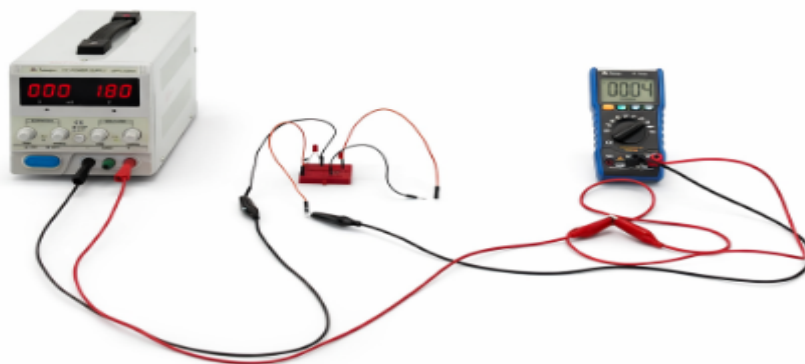


Fonte: A autora.

2º passo: Em seguida, a fonte de alimentação foi conectada ao circuito, permitindo a variação controlada da tensão aplicada aos diodos. Um multímetro foi inserido em série com o circuito, configurado para a medição de corrente elétrica, possibilitando a leitura de correntes da ordem de microamperes. Esse procedimento foi realizado inicialmente para o diodo túnel e, posteriormente, repetido de forma análoga para o diodo convencional.

As tensões aplicadas foram previamente estabelecidas no roteiro experimental, assumindo os valores de 1,2V; 1,5V; 1,8V; 2,1V; 2,4V; 2,7V e 3V. Para cada valor de tensão, ajustou-se a fonte de alimentação e registrou-se a corrente correspondente indicada pelo multímetro. O aparato experimental completo, durante uma das medições realizadas com o diodo convencional sob tensão de 1,8 V e corrente de 0,4 μA , é apresentado na Figura 13.

Figura 13: Circuito completo conectado ao diodo clássico, com tensão de 1,8 V e corrente de $0,4 \mu\text{A}$.



Fonte: A autora.

3º passo: Após a realização de todas as medições de corrente para os valores de tensão previamente definidos, tanto para o diodo túnel quanto para o diodo convencional, os dados obtidos pelos estudantes são organizados em tabelas. Com base nesses resultados, são construídos os gráficos da corrente (I) em função da tensão (V), permitindo a análise comparativa do comportamento elétrico dos dois dispositivos, bem como a identificação das características típicas do diodo convencional e do diodo túnel

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sequência didática apresentada busca favorecer o primeiro contato dos estudantes com ideias centrais da mecânica quântica, como o caráter probabilístico associado à função de onda e o fenômeno do tunelamento quântico, explorado a partir da análise do diodo túnel. Não se espera, com esse material, a consolidação plena desses conceitos, mas sim a aproximação inicial e o despertar do interesse dos alunos por temas da física moderna e contemporânea.

Durante a aplicação, observaram-se desafios relacionados às ausências dos alunos, em função da preparação e realização de vestibulares, à falta de interesse de parte dos estudantes e às dificuldades em articular conceitos abstratos. Esses aspectos reforçam a importância de retomadas frequentes, de maior tempo de exposição aos conteúdos e de mediação docente constante. Ainda assim, foram identificados indícios de uma compreensão inicial, indicando o potencial da proposta para favorecer processos de aprendizagem.

O produto foi concebido de forma flexível, permitindo adaptações conforme o contexto escolar, o perfil da turma e a carga horária disponível. O professor pode selecionar, reorganizar ou aprofundar as atividades conforme seus objetivos pedagógicos. Assim, este Produto Educacional se apresenta como um material de apoio, oferecendo caminhos possíveis para a inserção da física quântica no Ensino Médio e contribuindo para a ampliação do repertório didático do professor.

REFERÊNCIAS

ARDUINO. Arduino Uno Rev3. **Ivrea**: Arduino, 2024. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Acesso em: 19 jan. 2026.

EISBERG, M.; RESNICK, R. **Física Quântica**: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1994.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Construindo argumentação na sala de aula: a presença do ciclo argumentativo, os indicadores de alfabetização científica e o padrão de Toulmin. **Revista Ciência e Educação**, v. 17, n. 1, p. 97-114, 2011.

MOREIRA, Marco Antônio. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1999.

OpenAI. ChatGPT, versão GPT-4. Inteligência Artificial. Disponível em: <https://openai.com/>. Acesso em: 27 de maio de 2026.

TREAGUST, David; HARRISON, Allan; VENVILLE Grady. Teaching science effectively with analogies: an approach for preservice and inservice teacher education. **Journal of Science Teacher Education**, v. 9, p. 85–101, 1998.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV**: ótica e física moderna. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

APÊNDICE D1 ROTEIRO DO EXPERIMENTO - CAIXA QUÂNTICA

Introdução

Na mecânica quântica, não é possível prever com exatidão a posição ($x(t)$) de uma partícula. Diferentemente do que aprendemos na mecânica de Newton, a posição de uma partícula é descrita de forma probabilística. Isso significa que podemos apenas conhecer as regiões onde há uma maior probabilidade de se encontrar uma partícula. Um bom exemplo, simples, muito utilizado para fins de aprendizagem é o estudo do elétron confinado em uma caixa. Em uma caixa de comprimento L , a probabilidade de se encontrar o elétron em uma determinada posição segue uma densidade de probabilidade característica de cada nível de energia, como ilustrado na figura abaixo, sendo soluções da chamada equação de Schrödinger. Quanto maior a altura da função, maior será a probabilidade de se encontrar um elétron naquela posição da caixa.

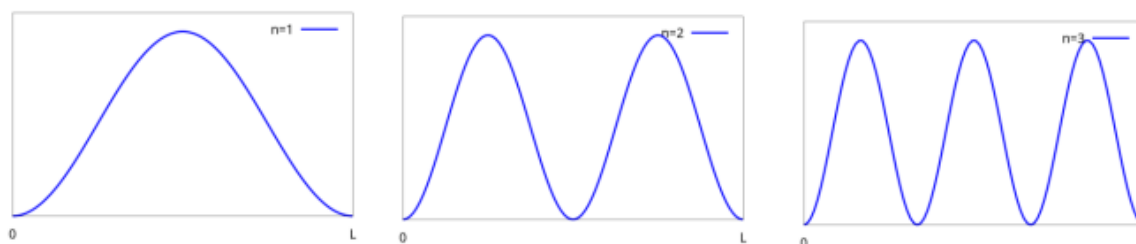


Figura 1: Densidade de probabilidade para um elétron confinado em uma caixa para os três primeiros níveis de energia: $n = 1$, $n = 2$ ou $n = 3$.

O experimento da Caixa Quântica foi desenvolvido para representar de forma visual e interativa, utilizando um conjunto de 10 LEDs, as posições de medida do elétron. No experimento da Caixa Quântica (figura 2), apresentado a seguir:

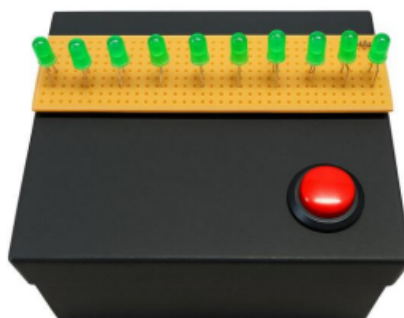


Figura 2: Montagem do experimento - Caixa Quântica.

cada LED representa uma possível região onde o elétron poderia ser encontrado dentro da caixa. Ao apertar o botão, um dos LEDs acende de acordo com a distribuição de probabilidades do elétron na caixa, simbolizando uma medida de posição. Após diversas medidas, o número de vezes com que cada LED acende permite construir um histograma, que se assemelha ao comportamento quântico dado pela densidade de probabilidades, previsto teoricamente.

Materiais Utilizados

- 1 placa de circuito impresso onde os LEDs estão conectados.
- 10 LEDs numerados de 1 até 10.
- 1 botão que, ao ser apertado, acende um entre os 10 LEDs (via programação).
- 1 arduino uno.
- 1 bateria de 9v.
- 1 a 2 resistores para adequação da tensão do arduino ao LED.
- Fios para conexão do botão e para conexões dos LEDs com o arduino.

Objetivo

Demonstrar, por meio da coleta de dados, como um conjunto de medidas evidencia a natureza probabilística da mecânica quântica e da previsão estatísticas da posição de uma partícula.

Procedimento

1. Aperte o botão vermelho da caixa $N = 100$ vezes. Ao apertar o botão um LED acende. Espere o LED apagar para apertar o botão novamente.
2. A cada LED aceso, registrar com o “X” na coluna 2, da tabela 1.

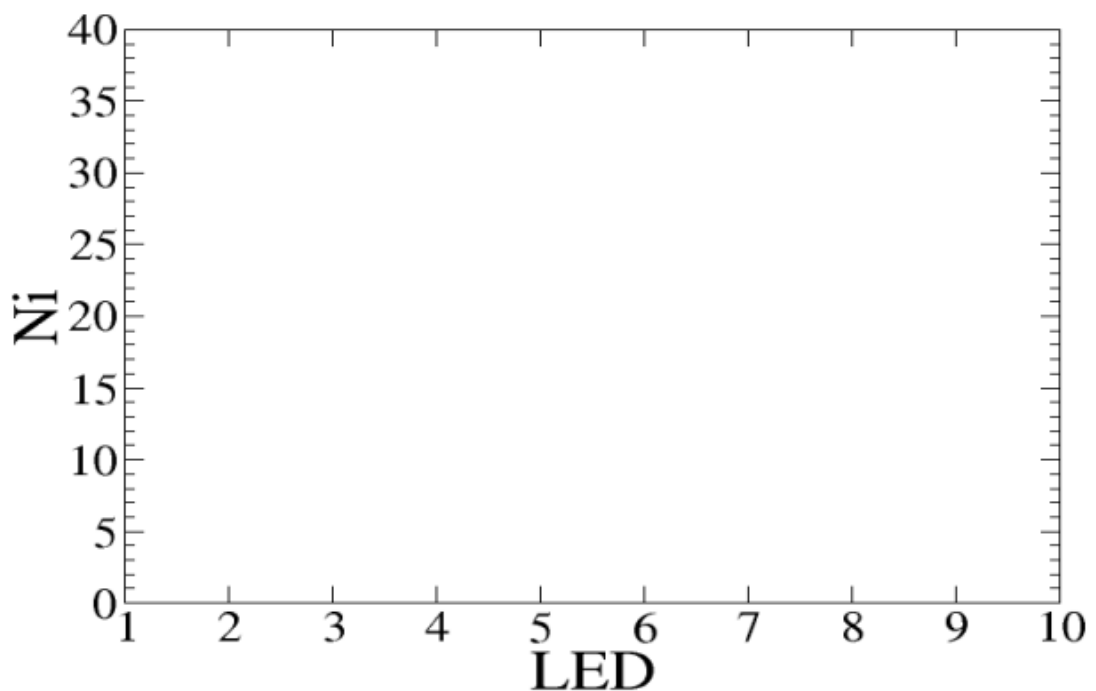
Tabela 1: LED e número de vezes que acendeu.

LED_i	Registre com um o “X” a cada vez que o LED correspondente se acende.	N_i
1		
2		

3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

3. Ao final das 100 medições, anote o número de vezes N_i que cada LED acendeu. Anote na coluna 3 da tabela 1.

4. Construa o histograma: o eixo x representa o número i do LED e o eixo y representa o número de vezes N_i que cada LED acendeu.



5. Calcule a probabilidade pi para o LED i acender ao se apertar o botão. Para calcular a probabilidade pi , do LED i acender, é necessário dividir o número de vezes (N_i) que o LED i acendeu, pelo número total de vezes (N), que o botão foi apertado, ou seja, pelo número de medidas.

$$pi = \frac{N_i}{N}, \text{ onde } i=[1,10]$$

Questionário

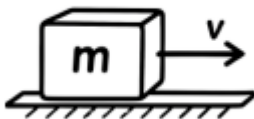
1. O histograma que vocês encontraram, se assemelha a densidade de probabilidades do elétron na caixa em qual estado quântico (nível de energia)? $n = 1$, $n = 2$ ou $n = 3$? Veja a figura 1.
2. As medidas sugerem: comportamento determinista ou probabilístico? Explique.
3. Em qual região seria mais provável de encontrar o elétron, de acordo com seu histograma?
4. Em qual(is) posição(ões) é menos provável encontrar o elétron, de acordo com seu histograma?
5. De acordo com o experimento da Caixa - Preta, qual a probabilidade de se encontrar o “elétron” na posição do LED 3?
6. Se aumentássemos o número de medições, o que aconteceria com o histograma?
7. O que significa dizer que a mecânica quântica é não determinística, segundo este experimento?

Referência

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física IV**: ótica e física moderna. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

APÊNDICE D2 ROTEIRO DO EXPERIMENTO - DIODO TÚNEL

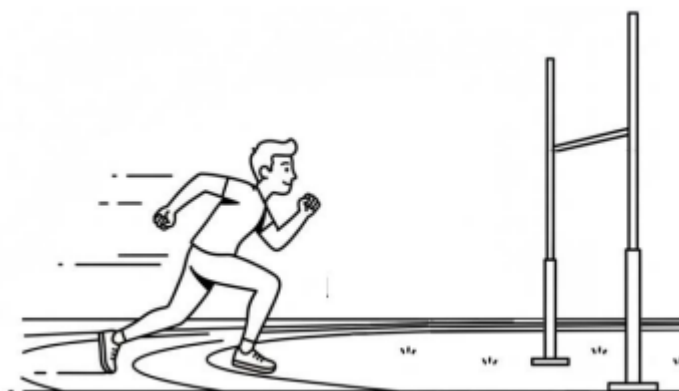
Introdução Imagine um bloco de massa m deslizando por uma superfície horizontal sem atrito com uma velocidade v :



O bloco tem uma energia cinética, dada por $E_c = \frac{1}{2} m v^2$. Sabemos que ao subir por um plano inclinado, o bloco perde velocidade, ou seja, perde energia cinética e ao mesmo tempo ganha energia potencial gravitacional $U = mgy$.

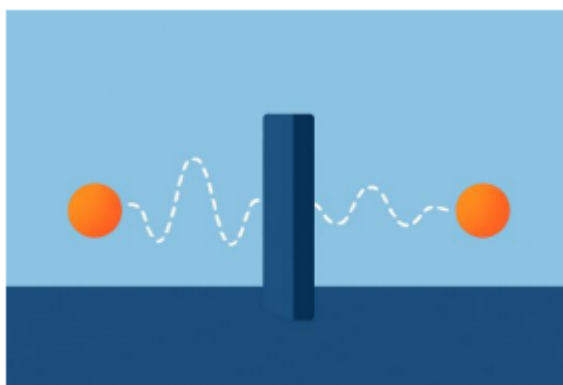


Quanto maior a energia cinética do bloco maior, maior a altura que o bloco pode atingir no plano inclinado. Da mesma forma um atleta de salto em altura, precisa ter energia cinética suficiente, para ganhar energia potencial gravitacional e transpor o sarrafo.



No experimento anterior, da Caixa Quântica, vimos que o elétron, partícula quântica, é descrito em termos de probabilidades. Uma das previsões mais importantes da mecânica

quântica é o chamado tunelamento quântico. Se o elétron fosse um atleta, mesmo não tendo energia cinética suficiente para transpor uma barreira de potencial, ainda assim ele teria uma probabilidade diferente de zero de atravessá-la. O tunelamento quântico não viola o princípio de conservação de energia e não tem paralelo direto no mundo macroscópico, sendo uma característica exclusivamente quântica. Na eletrônica, um importante dispositivo é o diodo túnel, um dispositivo semiconductor no qual os elétrons tunelam através de uma barreira de potencial. A corrente pode ser ligada ou desligada rapidamente (em um intervalo de poucos picossegundos) ao variar a altura da barreira. O diodo túnel é um componente semiconductor formado por uma junção PN extremamente dopada, o que faz com que apareça uma região de depleção muito estreita. Essa característica permite que os elétrons atravessem a barreira de potencial por tunelamento quântico, mesmo quando não possuem energia suficiente para ultrapassá-la um fenômeno puramente quântico.



À medida que a tensão aplicada ao diodo túnel aumenta, inicialmente os elétrons conseguem atravessar a barreira fina por tunelamento quântico, mesmo sem energia suficiente para superá-la, fazendo com que a corrente cresça rapidamente. Quando a tensão atinge valores médios, muitas lacunas na banda de valência do lado P já estão ocupadas, restando poucos estados disponíveis para o tunelamento, e a corrente diminui, formando a região de resistência negativa. Em tensões ainda mais altas, os elétrons passam a ter energia suficiente para superar a barreira de forma clássica, e o diodo passa a conduzir como um diodo comum. Este experimento permite visualizar a curva característica corrente (I) $\times$ tensão (V) do diodo túnel e compreender o efeito túnel quântico envolvido em seu funcionamento.

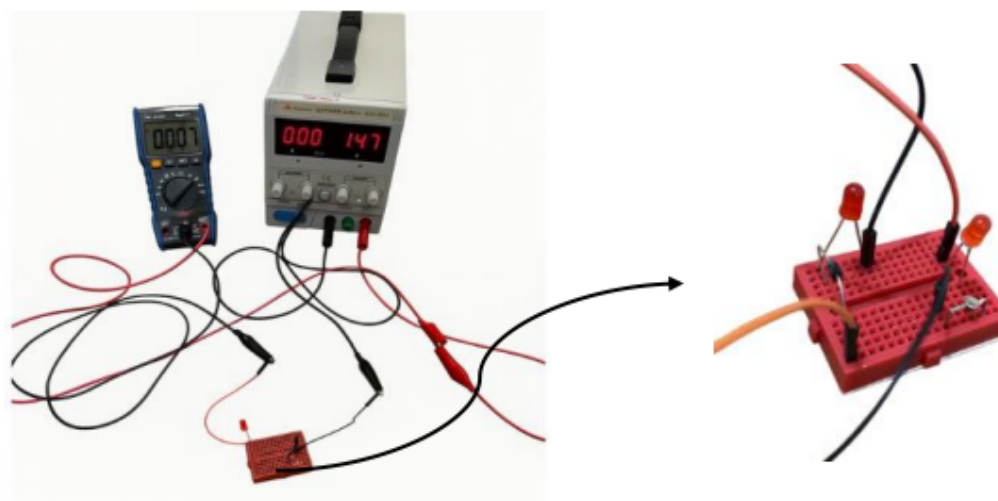
Objetivo

Construir as curvas características $I \times V$ de um diodo túnel e de um diodo convencional, identificando no diodo túnel a região de resistência negativa e o efeito de tunelamento quântico. Em seguida, comparar as duas curvas, destacando as diferenças entre seus comportamentos elétricos.

Materiais Utilizados

1. Diodo túnel (AU301A);
2. Diodo Convencional (1N4007);
3. Fonte de alimentação;
4. Protoboard;
5. Cabos com garra jacaré;
6. Jumper;
7. LED;
8. Multímetro.

Aparato experimental



1. A fonte de alimentação é utilizada para variar a quantidade de tensão fornecida ao diodo túnel e ao diodo convencional.
2. A protoboard é a base para conexão dos dispositivos.
3. Os jumpers e os cabos com garras jacaré são utilizados para conectar a fonte aos dispositivos e para realizar as conexões necessárias com o multímetro.

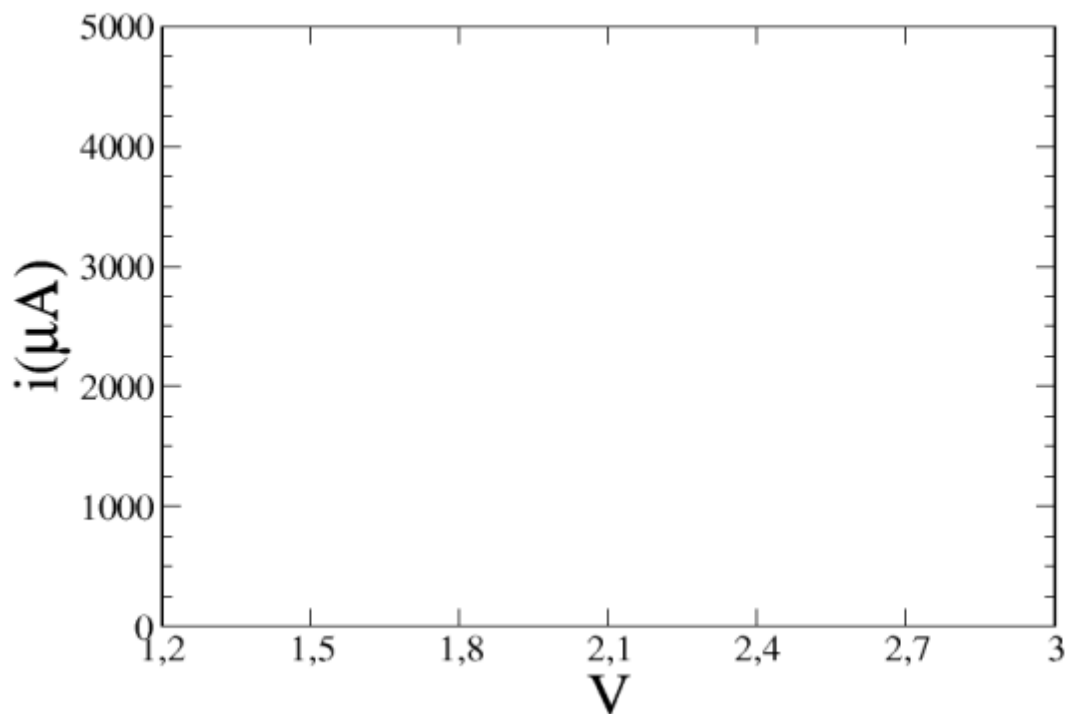
4. A fonte e multímetro fornecem os dados para montagem do gráfico.
5. O LED permite visualizar o aumento e diminuição da corrente.

Procedimento

1. Para construir o gráfico, é necessário variar a tensão de forma gradual, identificar os valores indicados na Tabela 1 e medir a corrente correspondente a cada tensão aplicada. Registre todas as medições na tabela 1.

Tabela 1: Dados da corrente x tensão.

tensão (v)	corrente (μA) - diodo e LED	corrente (μA) - diodo túnel e LED
1,2		
1,5		
1,8		
2,1		
2,4		
2,7		
3,0		



Questionário

1. O que é um diodo túnel e como o seu funcionamento difere de um diodo comum?
2. Explique, com suas palavras, o comportamento dos elétrons em um diodo túnel quando a tensão aplicada é baixa.
3. O que se entende por região de resistência negativa em um diodo túnel. Explique porque esse fenômeno ocorre.
4. Como o tunelamento quântico permite a passagem dos elétrons através da junção mesmo sem energia suficiente para ultrapassar a barreira de potencial?
5. O que ocorre com o fluxo de elétrons quando a tensão aplicada ao diodo túnel é alta o suficiente? Como a condução muda?
6. Porque a análise da curva característica $I \times V$ é importante para entender o comportamento do diodo túnel?

Referência

EISBERG, M.; RESNICK, R. **Física Quântica**: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1994.