

Universidade Federal do Maranhão
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede Nacional
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Gabriel Serrão Penha

INVESTIGANDO A CONSTANTE DE PLANCK POR MEIO DE UMA ABORDAGEM
EXPERIMENTAL: uma proposta construcionista para o ensino de Física

São Luís - MA

2025

Penha, Gabriel Serrão

**Explorando a constante de Planck através de um kit experimental:
uma abordagem pela teoria da aprendizagem construcionista** / Gabriel
Serrão Penha. – São Luís, MA, 2025.

156 f.

Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal do
Maranhão, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Ensino de Física em Rede Nacional, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Edson Firmino Viana de Carvalho.

Gabriel Serrão Penha

INVESTIGANDO A CONSTANTE DE PLANCK POR MEIO DE UMA ABORDAGEM
EXPERIMENTAL: uma proposta construcionista para o ensino de Física

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede Nacional da UFMA como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Edson Firmino Viana de Carvalho.

São Luís - MA

2025

INVESTIGANDO A CONSTANTE DE PLANCK POR MEIO DE UMA ABORDAGEM
EXPERIMENTAL: uma proposta construcionista para o ensino de Física

Gabriel Serrão Penha

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede
Nacional da UFMA como requisito para obten-
ção do título de Mestre em Ensino de Física.

Linha de Pesquisa: Processos de ensino e
aprendizagem e tecnologias de informação e
comunicação no ensino de Física.

Banca Examinadora

Aprovada em 27 de julho de 2025.

Prof. Dr. Edson Firmino Viana de Carvalho
Doutor em Física - Universidade Federal do Maranhão
(Presidente)

Prof. Karl Marx Silva Garcez
Doutor em Física - Universidade Federal do Maranhão
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Tiago Destéffani Admiral
Doutor em Ciências Naturais - Instituto Federal Fluminense
(Examinador Externo)

O verdadeiro conhecimento vem de dentro

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Fabiane Barros, e aos meus pais, Emanuel de Jesus e Rosana Campos, pela dedicação, apoio incondicional e suporte emocional ao longo desta jornada. Um agradecimento especial à minha avó, Socorro Diniz, pelo carinho, incentivo e por sempre acreditar em meu potencial.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Firmino Viana de Carvalho, pela orientação precisa, paciência e compromisso em me guiar neste mestrado.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede Nacional (PROFIS), cuja orientação e apoio foram essenciais ao longo da minha trajetória acadêmica. O compromisso de cada um em compartilhar conhecimento, estimular o pensamento crítico e promover uma educação inovadora contribuiu significativamente para meu crescimento.

À Sociedade Brasileira de Física, pela criação do MNPEF, que possibilitou a concretização deste sonho.

Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*"Quando a educação não  libertadora,
o sonho do oprimido  ser o opressor"*
(Paulo Freire)

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma proposta pedagógica para o ensino de Física Moderna, com foco na constante de Planck, por meio da construção e implementação de dois experimentos didáticos aplicados a estudantes do terceiro ano do ensino médio. O primeiro experimento utiliza materiais de baixo custo e fácil acesso, enquanto o segundo incorpora tecnologias educacionais, como a robótica com Arduino. A proposta fundamenta-se nas teorias construtivista de Jean Piaget e construcionista de Seymour Papert, priorizando a aprendizagem ativa, a experimentação e a construção do conhecimento por meio da resolução de problemas em contextos reais. A proposta didática desenvolvida articula teoria e prática, envolvendo desde a contextualização histórica e conceitual da constante de Planck e da radiação de corpo negro até a realização dos experimentos e a análise dos dados obtidos. Os alunos foram incentivados a formular hipóteses, planejar e executar experimentos, coletar e interpretar dados com base na lei de Stefan-Boltzmann e estimar a constante de Planck a partir da análise da radiação emitida por lâmpadas incandescentes em diferentes temperaturas. Os resultados apontam que a inclusão de práticas experimentais com diferentes níveis de complexidade tecnológica favorece o engajamento dos estudantes e contribui para a compreensão mais significativa de conceitos abstratos da Física Moderna. Ao integrar metodologias ativas e tecnologias acessíveis, a pesquisa demonstra o potencial de estratégias pedagógicas baseadas na experimentação para tornar o ensino de física mais dinâmico, contextualizado e eficaz.

Palavras-chave: Ensino de Física. Experimentos Didáticos. Constante de Planck. Teoria construcionista.

ABSTRACT

This dissertation presents a pedagogical proposal for the teaching of Modern Physics, focusing on Planck's constant, through the design and implementation of two didactic experiments applied to third-year high school students. The first experiment employs low-cost and easily accessible materials, while the second incorporates educational technologies such as Arduino-based robotics. The proposal is grounded in Jean Piaget's constructivist theory and Seymour Papert's constructionist approach, prioritizing active learning, experimentation, and the construction of knowledge through problem-solving in real contexts.

The didactic proposal developed articulates theory and practice, ranging from the historical and conceptual contextualization of Planck's constant and blackbody radiation to the execution of experiments and the analysis of the data obtained. Students were encouraged to formulate hypotheses, plan and carry out experiments, collect and interpret data based on Stefan-Boltzmann's law, and estimate Planck's constant from the analysis of radiation emitted by incandescent lamps at different temperatures.

The results indicate that the inclusion of experimental practices with different levels of technological complexity fosters student engagement and contributes to a more meaningful understanding of abstract concepts in Modern Physics. By integrating active methodologies and accessible technologies, the research demonstrates the potential of experimentation-based pedagogical strategies to make physics teaching more dynamic, contextualized, and effective.

Keywords: Physics Education. Didactic Experiments. Planck Constant. Constructionist Theory.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção de liga metálica através do processo de fundição do aço . . .	18
Figura 2 – Relação de energia cinética e temperatura em um gás monoatômico . .	21
Figura 3 – Estrutura em Rede dos Sólidos	22
Figura 4 – Representação de um campo elétrico de um dipolo.	22
Figura 5 – Harmônicos em uma corda vibrando	23
Figura 6 – Gráfico da intensidade de radiação em função da temperatura e comprimento de onda.	24
Figura 7 – Representação de uma cavidade cúbica	25
Figura 8 – Representação bidimensional dos modos harmônicos por frequência . .	28
Figura 9 – Acrecimento infinitesimal de Nós	29
Figura 10 – Fenda dupla	33
Figura 11 – Intensidade luminosa no ponto P gerado pela interferência construtiva de duas frentes de ondas em fase	34
Figura 12 – Representação esquemática dos feixes de luz sendo difratados por dois orifícios	35
Figura 13 – Seguintes de retas mostrando as posições de Máximos e Mínimos. .	38
Figura 14 – Placa Arduino uno	40
Figura 15 – Sensor de temperatura LM35.	42
Figura 16 – Sensor de temperatura BME280.	43
Figura 17 – Filtro Resistor Capacitor	45
Figura 18 – Diagrama do circuito eletrônico para análise da curva característica de um laser semiconductor controlado via Arduino.	48
Figura 19 – Distribuição etária dos estudantes participantes	61
Figura 20 – Abordagem do conceito de corpo negro	63
Figura 21 – Prática experimental sobre o comportamento de um corpo negro . . .	63
Figura 22 – Montagem da rede de difração utilizando um CD	64
Figura 23 – Circuito para difração com CD	65
Figura 24 – Exposição de feixes luminosos a partir do fenômeno de difração . . .	66
Figura 25 – Molde do banco óptico artesanal	67
Figura 26 – Preparação da rede de difração com CD	68
Figura 27 – Maquete artesanal com CD	69
Figura 28 – Imagem obtida	69
Figura 29 – Banco Ótico	71
Figura 30 – Ajustes para medição dos máximos	71
Figura 31 – Tabela com o valor da tensão limiar do laser semiconductor	72

Figura 32 – Curva característica da tensão versus corrente do laser	73
Figura 33 – Medição com a rede de difração laboratorial	75
Figura 34 – Avaliação sobre a abordagem do conceito de difração	77
Figura 35 – Maquete artesal com CD	87
Figura 36 – maquete artesenal com CD	87
Figura 37 – Rede de difração produzido pela empresa AZEHEB.	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	AS ORIGENS DA FÍSICA QUÂNTICA E SEUS DESAFIOS INICIAIS	18
2.1	Breve revisão da formulação de Planck para a radiação do corpo negro	20
2.1.1	Aspectos teóricos da quantização da energia na reformulação de Planck	20
2.2	Formulação da lei de Planck	21
2.3	A natureza ondulatória da luz e suas implicações na física quântica	32
2.3.1	Difração da luz	33
3	FUNDAMENTAÇÃO CONSTRUCIONISTA E O USO DO ARDUINO NO ENSINO DE FÍSICA	39
3.1	Arduino: Uma Ferramenta Versátil para o Ensino de Física Moderna	40
3.1.1	Principais componentes e recursos	41
3.1.2	Filtros RC	44
3.1.3	Modulação do Laser	45
3.1.3.1	Relação com o experimento de difração	47
3.1.4	Circuito Eletrônico para Controle de Laser Semicondutor com Filtro LPF e Modulação PWM via Arduino	48
3.1.5	Código do Arduino	48
3.2	Construção automática das tabelas	52
3.2.1	Registro de dados no Excel	53
3.2.2	Organização dos dados no Excel	53
4	METODOLOGIA	54
4.1	Planejamento e desenvolvimento do roteiro de aprendizagem ativa	55
4.1.1	Objetivo do roteiro de aprendizagem ativa	55
4.1.2	Universo da pesquisa	55
4.1.3	Planejamento das aulas	56
4.1.4	Abordagem construcionista	58
5	APLICAÇÃO DO RECURSO EDUCACIONAL	59
5.1	PROCESSO DIAGNOSTICO	59
5.1.1	Análise da intervenção didática por meio de questionários	60
5.2	Aplicação dos conceitos teóricos em sala de aula	61
5.2.1	Aula 1: Introdução ao Corpo Negro e Radiação Térmica	62

5.2.2	Aula 2: Fundamentos do Arduino e Circuitos Experimentais	64
5.2.3	Aula 3: Conceito de Difração e Determinação de λ	65
5.3	Descrição dos experimentos (aulas 4, 5 6)	66
5.3.1	Aula 4: construção da rede de difração de baixo custo	66
5.3.2	Aula 5: coleta e organização dos dados: comparação entre redes de difração comercial e caseira	69
5.3.2.1	Configuração do sistema óptico com rede comercial	69
5.3.2.2	Rede de difração de baixo custo com disco óptico	70
5.3.2.3	Coleta automatizada e determinação da constante de Planck	71
5.3.3	Aula 6: Análise dos resultados e cálculo da constante de Planck	72
5.3.4	Aula 7 Reflexão, discussão e apresentação de resultados	78
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICES	84
A	BANCO ÓPTICO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO	85
A.1	Introdução	85
A.2	Construção de rede de difração de baixo custo	85
A.2.1	Materiais necessários	85
A.2.2	Preparo do CD	85
A.2.3	Preparo da estrutura de suporte	86
A.3	Construção do banco óptico linear	86
A.3.1	Materiais necessários	86
A.3.2	Montagem	86
A.4	Considerações	86
B	MAQUETE EXPERIMENTAL COM REDE DE DIFRAÇÃO LABORATORIAL	89
B.1	Redes de difração: comercial vs. de baixo custo	89
B.2	Estrutura da maquete experimental	90
B.3	Montagem do experimento	90
B.4	Papel do Arduino na coleta de dados	90
B.5	Análise e discussão dos resultados	91
C	QUESTIONÁRIO DE VERIFICAÇÃO DOS CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA	92
D	QUESTIONÁRIO SOBRE COMPONENTES ELETRÔNICOS DOS CIRCUITOS	93

E	QUESTIONÁRIO SOBRE OS CONCEITOS DE DIFRAÇÃO	. . . 94
F	AUTOAVALIAÇÃO INDIVIDUAL	 95
G	COAVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO GRUPO	 96
H	MODELO DE DIÁRIO DE BORDO / PORTIFÓLIO DO GRUPO	97
I	QUESTIONÁRIO PÓS-TESTE	 98
J	AVALIAÇÃO DA APRESENTAÇÃO FINAL DO EXPERIMENTO	100
K	CÓDIGO	 101
L	PRODUTO EDUCACIONAL	 104

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos conceitos pedagógicos no ensino de Física tem sido marcada por uma transição significativa: de métodos lineares e conteudistas para práticas mais contextualizadas, interativas e integradas. Historicamente, a disciplina era ensinada de maneira centrada no professor, com forte ênfase na memorização de fórmulas e na exposição de conceitos abstratos. No entanto, o reconhecimento crescente da necessidade de tornar o ensino mais acessível e envolvente impulsionou a modernização curricular, incorporando elementos como a valorização da história da ciência e a humanização dos conteúdos (NEVES, 1998). Essa abordagem favorece não apenas a compreensão dos conceitos científicos, mas também o desenvolvimento de habilidades críticas e a capacidade de aplicar o conhecimento à realidade.

Apesar dos avanços, o ensino de Física ainda enfrenta desafios consideráveis, principalmente no que tange à superação de práticas pedagógicas obsoletas. É urgente aprimorar estratégias de ensino que promovam uma aprendizagem mais significativa. Nesse cenário, a teoria construtivista de Jean Piaget oferece uma base transformadora. Piaget defende que a aprendizagem ocorre de forma ativa, mediante a interação do sujeito com o ambiente e com suas próprias experiências (NEVES, 1998). Segundo ele, o ensino deve respeitar os estágios de desenvolvimento cognitivo dos alunos, sendo a experimentação e o erro elementos centrais no processo de construção do conhecimento.

A presente pesquisa adota a metodologia construtivista com ênfase na teoria construcionista de Seymour Papert. Enquanto o construtivismo piagetiano destaca a construção ativa do conhecimento por meio de interações cognitivas, o construcionismo papertiano amplia essa perspectiva ao enfatizar a aprendizagem por meio da criação de projetos, resolução de problemas e uso de tecnologias digitais (MOREIRA, 2021). Papert propõe que os estudantes aprendem melhor quando estão engajados na construção de produtos significativos, utilizando, por exemplo, a robótica como recurso de aprendizagem ativa e colaborativa.

A aplicação da robótica educacional na sala de aula materializa os princípios do construcionismo. Ao desenvolver projetos de robótica, os alunos são desafiados a resolver problemas concretos, interagindo diretamente com conceitos físicos e computacionais, o que os leva a experimentar, testar e corrigir suas ações em um contexto real (MOREIRA, 2018). Essa abordagem torna o ensino mais dinâmico e interativo, favorecendo a assimilação de conceitos complexos e incentivando o desenvolvimento da criatividade e do pensamento crítico.

A integração das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) ao processo

educativo e ensino através do uso de projetos reforça ainda mais esse potencial. As TIC oferecem ferramentas que tornam os ambientes de aprendizagem mais interativos e colaborativos, alinhando-se aos princípios construcionistas que valorizam a prática, a experimentação e a construção do conhecimento em contextos significativos.

Dessa forma, a transformação metodológica no ensino, impulsionada pelas inovações tecnológicas e pela necessidade de preparar os estudantes para um mundo em constante mudança, demanda uma reestruturação das práticas pedagógicas. O construtivismo e o construcionismo constituem bases teóricas sólidas para essa mudança, promovendo ambientes de aprendizagem interativos, adaptativos e centrados no aluno. A utilização de projetos com robótica e das TIC exemplifica a aplicação eficaz desses princípios no ensino de Física, tornando-o mais atual, envolvente e significativo na formação de estudantes críticos e criativos. Nesse sentido, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) Segundo a BNCC (BRASIL, 2018), tem como competências específicas da área de Ciências da Natureza, “investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo contemporâneo”, o que abre espaço para a inserção da Física Moderna no ensino médio algo que pode ser feito integrando tecnologias digitais ao processo educativo, incentivando práticas que favoreçam a resolução de problemas, a autonomia intelectual e o pensamento crítico saciando as demandas da sociedade contemporânea. Especificamente, no componente curricular de Física do Ensino Médio, a BNCC recomenda a abordagem de temas de Física Moderna e Contemporânea — como a teoria quântica, a relatividade e a física de partículas — de modo articulado a situações reais e a contextos interdisciplinares, promovendo a compreensão de fenômenos e aplicações tecnológicas presentes no cotidiano (Educação, 2017)

As recentes mudanças curriculares, como a inserção de conteúdos de Física Moderna e a integração à Base Nacional Comum Curricular (BNCC), refletem um esforço em superar defasagens históricas e preparar os alunos para os desafios do século XXI (Ministério do Desporto, 1999). Nesse contexto, destaca-se a importância da constante de Planck, conceito essencial para a compreensão dos fenômenos quânticos e para o entendimento do conhecimento científico contemporâneo. A constante de Planck (h) é um dos pilares da mecânica quântica, sendo fundamental para a formulação da teoria quântica da radiação e para o entendimento da dualidade onda-partícula (PAIS, 2005).

No âmbito educacional, a introdução de conceitos como a constante de Planck representa uma oportunidade valiosa para conectar os estudantes às fronteiras do conhecimento científico. Quando abordados por meio de metodologias inovadoras, esses conceitos tornam-se mais acessíveis e significativos, inspirando os alunos e preparando-os para um futuro no qual a ciência e a tecnologia exercem papéis centrais. Surge, então, o desafio de como implementar conceitos tão abstratos no ensino médio.

A construção e aplicação de experimentos didáticos voltados à medição da constante

de Planck representam uma estratégia pedagógica inovadora que transcende a simples memorização de fórmulas. Por meio de atividades práticas que utilizam materiais acessíveis e tecnologias como a robótica com Arduino (OLIVEIRA et al., 2020), os estudantes são convidados a formular hipóteses, planejar e realizar experimentos, bem como analisar os resultados. Essas ações não apenas facilitam a compreensão dos conteúdos teóricos, mas também promovem o desenvolvimento de competências como a análise de dados, a resolução de problemas e o trabalho colaborativo.

Tais práticas experimentais dialogam com os princípios construtivistas e construcionistas de Piaget e Papert, ao priorizarem a experiência prática e o protagonismo do estudante no processo de aprendizagem. A exploração de temas como a constante de Planck por meio de atividades experimentais contribui para a construção de um ambiente de sala de aula mais estimulante, preparando os alunos para os desafios acadêmicos futuros e consolidando uma compreensão mais profunda da ciência. Essa abordagem demonstra a eficácia da integração entre conteúdos contemporâneos e metodologias pedagógicas ativas.

Diante disso, o objetivo central desta pesquisa é proporcionar aos estudantes do terceiro ano do ensino médio uma compreensão aprofundada dos conceitos da Física Moderna, com ênfase na constante de Planck, por meio da construção e aplicação de dois experimentos didáticos que articulam teoria e prática, utilizando materiais acessíveis com Arduino. Esses experimentos permitirão aos alunos uma análise comparativa entre metodologias de baixo custo e soluções tecnológicas mais sofisticadas, promovendo uma integração significativa entre Física e Tecnologia. Especificamente, esta pesquisa objetiva:

- Desenvolver um experimento didático acessível para a medição da constante de Planck, utilizando materiais de fácil obtenção;
- Implementar um segundo experimento didático baseada em Arduino, com foco na medição da constante de Planck;
- Integrar conceitos teóricos e práticos por meio de um roteiro de aprendizagem ativa que aborde a introdução, contextualização e experimentação dos temas relacionados à constante de Planck e à radiação do corpo negro;
- Proporcionar aos alunos experiências de formulação de hipóteses, planejamento, execução de experimentos e análise de dados, aplicando a lei de Stefan-Boltzmann;
- Comparar os resultados obtidos nos dois experimentos, a fim de avaliar a eficácia e a aplicabilidade de cada metodologia;
- Demonstrar a relevância da inclusão de experimentos práticos no currículo de Física do ensino médio, como estratégia para aumentar o engajamento dos alunos e aprofundar sua compreensão dos conceitos científicos.

A dissertação está estruturada em cinco capítulos principais. O segundo capítulo trata das origens da Física Quântica, com foco na formulação de Planck para a radiação do corpo negro, discutindo a quantização da energia e os aspectos ondulatórios da luz. O terceiro capítulo apresenta a robótica educacional como estratégia pedagógica inovadora, explorando o uso do Arduino e seus principais componentes em experimentos com difração da luz e controle de laser. O quarto capítulo descreve a metodologia adotada, incluindo o planejamento do roteiro de aprendizagem ativa, os objetivos educacionais e a abordagem construcionista que fundamenta a pesquisa. O quinto capítulo apresenta os resultados da implementação do recurso educacional no ambiente escolar, destacando o desenvolvimento das atividades práticas, a coleta automatizada de dados e o cálculo experimental da constante de Planck. Por fim, analisa-se a percepção dos estudantes quanto ao processo de aprendizagem, permitindo reflexões sobre a eficácia da proposta e seu potencial para promover uma aprendizagem significativa no ensino de Física Moderna.

2 AS ORIGENS DA FÍSICA QUÂNTICA E SEUS DESAFIOS INICIAIS

Embora o termo física quântica possa parecer excessivamente complexo para ser abordado em uma sala de aula do ensino médio, é crucial esclarecer seu verdadeiro significado. A palavra quantum sugere algo que pode ser contado ou medido. Quando Thompson estabeleceu a relação entre massa e carga através de observações em tubos de raios catódicos em 1897, ele introduziu a ideia de que as cargas elétricas poderiam ser quantificadas. Isso significa que as cargas elétricas deixaram de ter um caráter contínuo e passaram a ser discretas, podemos dizer que Thompson quantizou o conceito de cargas elétricas (TIPLER; LLEWELLYN, 2014).

A física quântica surge como resposta a um desafio inicialmente identificado na área da termodinâmica. No final do século XIX, havia a necessidade premente de compreender o fenômeno da emissão de radiação por corpos aquecidos. Enquanto objetos comuns são capazes de refletir a luz que incide sobre eles, à medida que a temperatura desses corpos aumenta, geralmente acima de 600 graus Celsius, dependendo do material, observa-se uma transição na qual eles começam a emitir luz no comprimento do visível, tornando-se progressivamente mais incandescentes, conforme se observa na Figura 1. Outro fator importante que culmina no surgimento da física quântica ocorre devido a uma certa dificuldade de medir temperaturas de fornos extremamente aquecidos, surgindo uma demanda ainda maior nesta área devido à ascensão da indústria (OLIVEIRA, 2023).

Figura 1 – Produção de liga metálica através do processo de fundição do aço



Fonte: Siderurgica. Disponível em: "<https://elperiodicodelaenergia.com/la-industria-siderurgica-mundial-puede-dejar-el-carbon-y-llegar-a-cero-emisiones-netas-a-principios-de-la-decada-de-2040/>". Acessado em: 01 abril de 2024

Em 1850, Gustav Kirchhoff propôs uma ferramenta revolucionária para entender o efeito da temperatura na taxa de emissão de radiação, independentemente da composição ou geometria do material. Ele sugeriu analisar as propriedades térmicas de uma cavidade fechada, como o interior de um forno, aquecida a uma temperatura específica. Quando aquecida, os átomos emitiriam radiação eletromagnética que seria absorvida pelas próprias paredes da estrutura, criando um equilíbrio entre emissão e absorção. Esse equilíbrio resulta no cancelamento do surgimento de linhas espectrais distintas na radiação emitida pelo objeto, tornando-os corpos negros. Nesses corpos, as características espectrais de emissão ou absorção não são discerníveis em seu espectro de radiação.

A proposta de Kirchhoff apresentava desafios teóricos e experimentais significativos (PAIS, 2005). Teoricamente, precisava-se entender como a radiação térmica se comportava dentro da cavidade fechada, especialmente em relação à relação entre temperatura e taxa de emissão de radiação, assim como resolver como essa radiação interagia com as paredes da cavidade. Experimentalmente, era desafiador medir com precisão a radiação emitida por corpos negros em diferentes temperaturas e analisar seu espectro. Isso exigia métodos de medição sensíveis e a capacidade de isolar a radiação emitida pelo corpo negro de outras fontes de radiação. Esses desafios foram fundamentais para o desenvolvimento de uma compreensão mais profunda da radiação do corpo negro e para o avanço subsequente na física quântica.

A investigação do espectro de emissão de corpos negros representou um marco fundamental na física, fornecendo compreensões mais claras sobre a quantização da energia. Para este estudo, Kirchhoff propôs a inserção de um orifício em uma das paredes de um forno a alta temperatura, permitindo que uma fração seletiva da radiação emitida escapasse, facilitando a observação direta das características espectrais. Os resultados experimentais revelaram um padrão notável: a potência irradiada por um corpo negro aumentava proporcionalmente à frequência da radiação até atingir um pico máximo, seguido de uma diminuição, desafiando as previsões da física clássica, que postulavam um aumento indefinido da frequência sob elevações de temperatura.

Essa discrepância nas observações físicas se revelou crucial para o avanço da física, pois implicou na necessidade de revisão dos princípios clássicos de emissão e absorção de energia. Através dessa observação, os cientistas foram compelidos a postular a existência de quanta de energia, estabelecendo assim as bases da teoria quântica. Esse fenômeno, inicialmente paradoxal, foi posteriormente elucidado com a introdução do conceito de quantização de energia, proposto por Max Planck. A quantização implicava que a energia não é emitida de forma contínua, mas sim em pacotes discretos, ou quanta, revelando os princípios fundamentais que governam a interação entre matéria e radiação em níveis quânticos (GLAISER, 1997).

2.1 BREVE REVISÃO DA FORMULAÇÃO DE PLANCK PARA A RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

Max Planck foi influenciado por várias fontes ao reformular a quantização da energia na física. Inspirado pela inadequação das teorias clássicas para explicar a radiação do corpo negro, ele combinou seu conhecimento da termodinâmica e teoria eletromagnética com dados experimentais detalhados. Sua habilidade matemática e a necessidade de resolver esse problema levaram-no a postular a ideia de quantização da energia, rompendo com os conceitos clássicos e lançando as bases para a física quântica.

Além disso, a formulação de Planck não apenas explicou os resultados experimentais observados, mas também estabeleceu as bases para futuras investigações na física quântica, influenciando pensadores como Albert Einstein e Niels Bohr. Assim, revisitar a contribuição de Planck é essencial para entender a transição entre a física clássica e a moderna, e como suas ideias moldaram nosso entendimento sobre a natureza da luz e da matéria.

2.1.1 Aspectos teóricos da quantização da energia na reformulação de Planck

Antes do modelo de Planck, é necessário entender as equações propostas na época por Josef Stefan e Ludwig Eduard Boltzmann, as quais estabelecem que a potência irradiada por unidade de área é proporcional à quarta potência da temperatura, multiplicada por uma constante de proporcionalidade. Esse princípio reflete uma relação profunda e fundamental entre a radiação ϵ e a temperatura de um corpo T , dado por

$$\epsilon = A\sigma T^4 \quad (2.1)$$

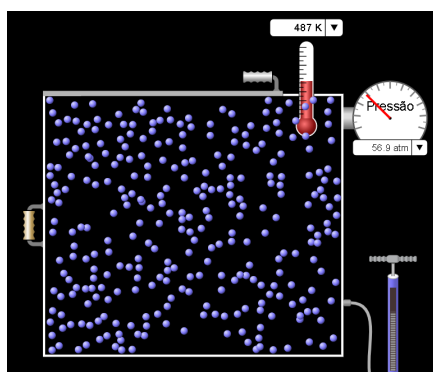
O problema é que essa relação só funcionaria para sistemas aquecidos a temperaturas intermediárias, pois o modelo se baseava apenas em relações termodinâmicas e eletromagnéticas clássicas. Entre os vários desafios enfrentados pela Física Clássica, a incapacidade de fornecer uma explicação convincente para a distribuição energética do espectro de radiação de corpo negro era notória e intensamente estudada através de experimentos realizados na época. Durante esse período, a interpretação clássica da luz, fundamentada nos princípios do eletromagnetismo de Maxwell, que a concebia apenas como ondas eletromagnéticas, dominava o entendimento científico. Contudo, essa abordagem clássica falhava em explicar fenômenos específicos, como a distribuição energética desses corpos, sinalizando a necessidade de uma nova perspectiva que viria a ser fornecida pela física moderna (OLIVEIRA, 2023).

2.2 FORMULAÇÃO DA LEI DE PLANCK

Um corpo pode emitir luz de diversas maneiras possíveis, porém a emissão de radiação que existe apenas pelo fato de o corpo ter temperatura pode ser considerada como emissão térmica. Sabendo da existência dessa relação, é necessário justificar por que corpos com temperatura brilham em diferentes espectros de emissão.

A resposta para esse questionamento tem, primeiramente, um caráter termodinâmico e é oriunda da teoria cinética dos gases, proposta por Ludwig Boltzmann, que associa a temperatura à energia cinética média das partículas. Em um gás, a energia cinética pode se manifestar na forma de translação, rotação e vibração. Ou seja, quanto maior for o valor da energia cinética em uma dessas três formas, maior será o valor da temperatura. Contudo, ao analisar o espectro térmico de um corpo sólido, é importante ter em mente os possíveis graus de liberdade presentes em estruturas cristalinas (KITTEL, 2000). A Figura 2 mostra a agitação das partículas de um gás monoatômico em relação a uma possível variação de temperatura.

Figura 2 – Relação de energia cinetica e temperatura em um gás monoatomico

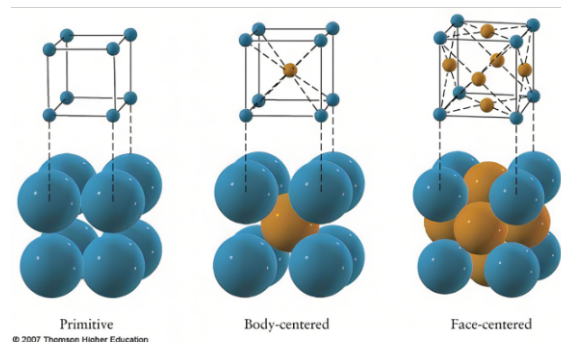


Fonte: PhET Colorado, 2024

Os átomos em estruturas cristalinas, por estarem fixados em redes, não transladam e tão pouco rotacionam, tendo apenas energia cinética de vibração. Também é importante ter em mente que, se um átomo da rede cristalina vibra, pelo fato de estarem conectados, os átomos em seu entorno irão vibrar na mesma frequência. Isso faz com que uma vibração que seria isolada permeie o sólido e, na média, a torne associável à temperatura desse material.

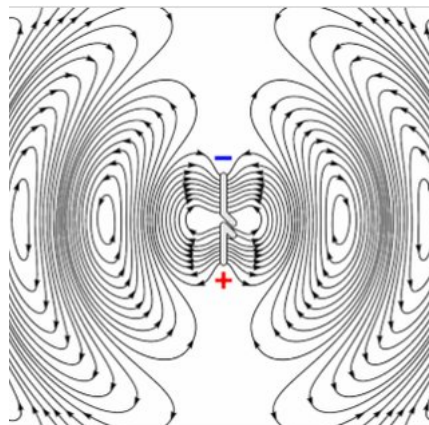
Tendo em vista que átomos são feitos de cargas elétricas, com uma nuvem eletrônica que possui carga negativa, e os núcleos atômicos são compostos por cargas positivas, percebemos o surgimento de um dipolo oscilante que vibra na frequência formada pelas perturbações provenientes da temperatura do corpo. Como as leis do eletromagnetismo de Maxwell preveem que cargas elétricas oscilando em uma determinada frequência geram ondas eletromagnéticas que também variam nessa mesma frequência, podemos estabelecer

Figura 3 – Estrutura em Rede do Sólidos



uma relação de causa e efeito: um corpo, que é formado por uma estrutura em rede constituída de dipolos que oscilam, irá apresentar uma emissão de radiação correspondente à frequência de vibrações desses dipolos, como mostra a Figura 4 (EISBERG; RESNICK, 1979).

Figura 4 – Representação de um campo elétrico de um dipolo.



Fonte: Campo elétrico de dipolo. Disponível em: "<https://www.pasqualeclarizio.it/dipolo-elettrico-oscillante-fisica-ii/>". Acessado em 6 de abril de 2024

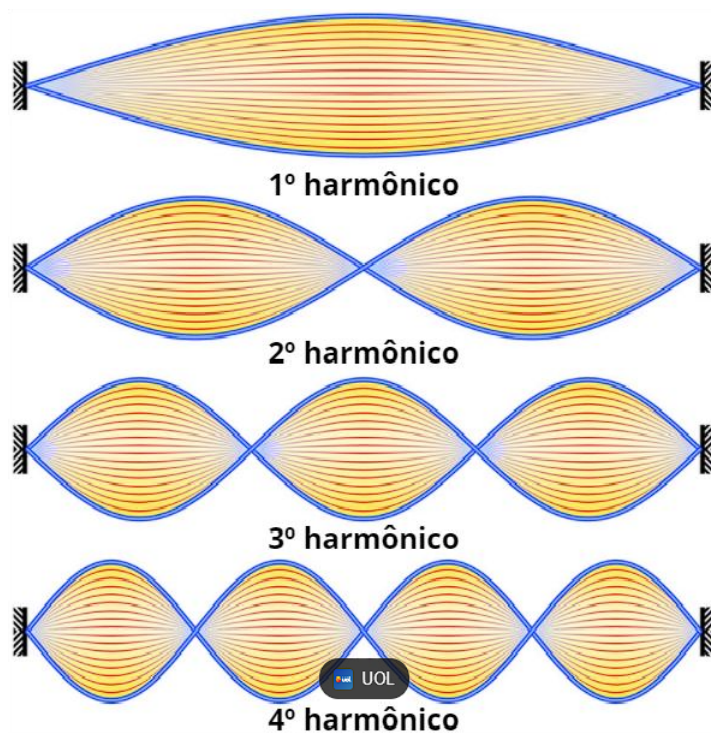
Apesar disso, ainda é necessário entender como ocorrem as vibrações na rede de um sólido para se estabelecer uma relação qualitativa da distribuição térmica. Esse entendimento é crucial, pois permite descrever por que a percepção do espectro de emissão de energia térmica apresenta um aspecto contínuo. A radiação térmica emitida por um corpo não é composta por frequências discretas, mas sim por uma faixa contínua de frequências, o que resulta do comportamento coletivo das vibrações atômicas dentro do sólido.

Todo objeto sólido oscila exclusivamente por meio de seus modos normais de vibração. Esses modos representam as formas mais simples de oscilação que um sistema pode assumir, respeitando as condições de contorno impostas. Para entender melhor, podemos considerar um sistema unidimensional, como uma corda com extremidades fixas vibrando. Nesse sistema, as condições de contorno determinam que as extremidades da corda estejam fixas, limitando os tipos de vibrações permitidos. A corda só pode vibrar

de forma que a onda gerada tenha nós em ambas as extremidades. Isso significa que os modos normais de vibração são as configurações de vibração que satisfazem essa condição de contorno, sendo os mais elementares para descrever o movimento da corda.

No caso da corda, os modos normais são associados a frequências específicas, conhecidas como harmônicos, que correspondem às diferentes formas de vibração possíveis. Esses harmônicos representam múltiplos inteiros da frequência fundamental da corda, sendo que o primeiro harmônico corresponde à vibração de menor frequência e o segundo, ao dobro da frequência fundamental, e assim por diante.

Figura 5 – Harmônicos em uma corda vibrando



Fonte: Harmônicos. Disponível em: "<https://brasilescola.uol.com.br/fisica/ondas-estacionarias.htm>". Acessado em 6 de abril de 2024

A Figura 5 ilustra os primeiros harmônicos de uma corda vibrando. Se atribuirmos à corda um comprimento de um metro e uma velocidade de propagação de 1 m/s, podemos utilizar a equação a seguir para calcular as frequências de vibração permitidas:

$$f_n = \frac{nv}{2L}, \quad (2.2)$$

em que f_n é a frequência do n -ésimo harmônico, n é o número do harmônico ($n = 1, 2, 3, \dots$), v é a velocidade de propagação da onda (neste caso, 1 m/s) e L é o comprimento da corda (1 metro). A relação entre o número de harmônicos esféricos e a frequência é exemplificada na Tabela 1.

Observe que as frequências permitidas são aquelas que são múltiplas de 0,5 Hz. Para baixas frequências, faz sentido observarmos uma variação discreta. O incremento percentual

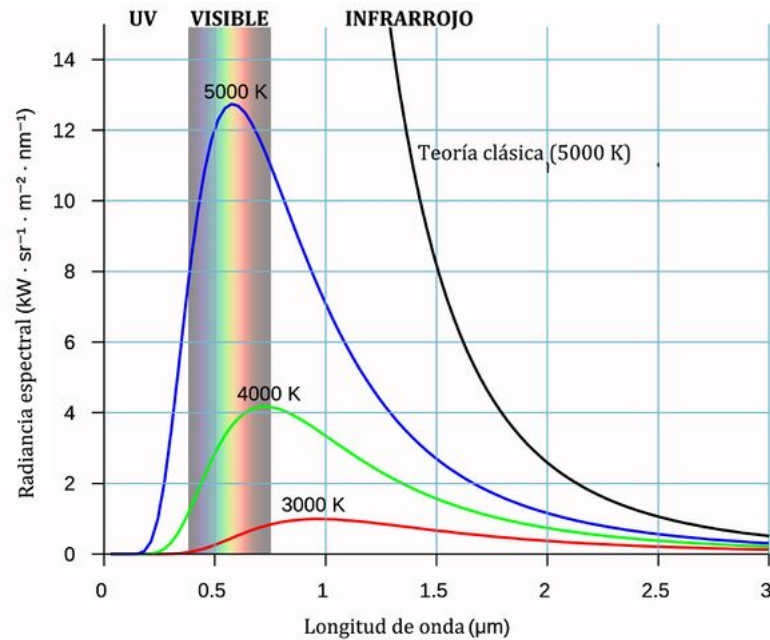
Tabela 1 – Relação entre o número de harmônicos esféricos e a frequência de vibração.

Harmônico	Frequência (hz)
1	0,5
2	1,0
3	1,5
4	2

do primeiro para o segundo harmônico corresponde a 100%, enquanto os incrementos do segundo para o terceiro e do terceiro para o quarto harmônico correspondem a 50%, 33% e 25%, respectivamente. Note que, para uma frequência de 400 trilhões de hertz, uma frequência permitida em uma corda correspondente à luz vermelha, um acréscimo de 0,5 Hz não resultaria em uma percepção de descontinuidade visível.

A Figura 6 mostra que, para cada temperatura, há um espectro característico de emissão. A potência da energia irradiada atinge um valor médio característico que diminui à medida que o comprimento de onda se torna menor.

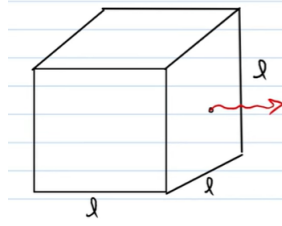
Figura 6 – Gráfico da intensidade de radiação em função da temperatura e comprimento de onda.



A conclusão que podemos tirar é a seguinte: materiais aquecidos emitem radiação em uma ampla gama de comprimentos de onda. No entanto, a intensidade da radiação em altas frequências diminui, porque, estatisticamente, essas oscilações se tornam menos prováveis de ocorrer. Isso explica por que, historicamente, associar o aumento de energia ao aumento da frequência foi um grande desafio, conhecido como o "problema da catástrofe do ultravioleta".

Considere uma cavidade cúbica com um orifício, como ilustrado na Figura 7. Esse modelo é importante para descrever a radiação de corpo negro, pois permite uma representação precisa das ondas eletromagnéticas estacionárias que podem existir dentro da cavidade. A radiação emitida por essa cavidade, através do orifício, é analisada para entender o comportamento da radiação térmica, levando ao desenvolvimento da Lei de Planck, que resolve o problema mencionado e descreve como a intensidade da radiação varia com a frequência e a temperatura.

Figura 7 – Representação de uma cavidade cubica



Fonte: Próprio autor.

Dado

$$L_x = \frac{n_x \lambda_x}{2}, L_y = \frac{n_y \lambda_y}{2}, L_z = \frac{n_z \lambda_z}{2}. \quad (2.3)$$

Essas equações surgem do estudo dos *modos normais de vibração* em sistemas tridimensionais, como no caso de partículas confinadas em uma caixa retangular. A ideia central é que, para que haja ondas estacionárias no interior do sistema, os comprimentos das arestas L_x, L_y, L_z devem ser múltiplos inteiros de metade do comprimento de onda associado a cada direção. Assim, impõem-se condições de contorno que garantem que a onda se anule nas fronteiras, levando às relações $L_x = \frac{n_x \lambda_x}{2}$, $L_y = \frac{n_y \lambda_y}{2}$ e $L_z = \frac{n_z \lambda_z}{2}$, onde n_x, n_y, n_z são números inteiros positivos que indicam os modos possíveis em cada dimensão. Esse formalismo expressa como a geometria do confinamento determina os comprimentos de onda permitidos e, consequentemente, as frequências discretas do sistema vibracional.

Podemos obter o valor da frequência relacionando-a com a velocidade da luz c :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.4)$$

multiplicando a ambos os lados da equação pela velocidade da luz, obtém-se as seguintes relações:

$$\frac{1}{\lambda_x} = \frac{n_x}{2l} \rightarrow \frac{c}{\lambda_x} = \frac{n_x c}{2l} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{\lambda_y} = \frac{n_y}{2l} \rightarrow \frac{c}{\lambda_y} = \frac{n_y c}{2l} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{\lambda_z} = \frac{n_z}{2l} \rightarrow \frac{c}{\lambda_z} = \frac{n_z c}{2l} \quad (2.7)$$

Possibilitando assim, relacionar a frequência com as dimensões e o número de nós nas três dimensões.

$$\nu_x = \frac{n_x c}{2l}; \nu_y = \frac{n_y c}{2l}; \nu_z = \frac{n_z c}{2l} \quad (2.8)$$

Este resultado é interessante, pois representa as frequências permitidas na cavidade. Essas equações satisfazem a condição de que os nós devem sempre estar nas extremidades da cavidade, garantindo que ocorra a formação de ondas estacionárias. No entanto, ainda é necessário entender como ocorre a combinação linear das frequências ν nos eixos x , y e z , o que está relacionado à forma geométrica da cavidade e às suas condições de contorno.

Como λ será uma combinação de λ_x , λ_y e λ_z a prementação mais apropriada seria:

$$\lambda_x = \frac{\lambda}{\sin \theta \cos \phi} : \lambda_y = \frac{\lambda}{\sin \theta \sin \phi} : \lambda_z = \frac{\lambda}{\cos \theta} \quad (2.9)$$

Substituindo as equações (2.5), (2.6) e (2.7) em (2.9), tem-se que:

$$\frac{n_x c}{2l} = \frac{\sin \theta \cos \phi}{\lambda} \quad (2.10)$$

$$\frac{n_y c}{2l} = \frac{\sin \theta \sin \phi}{\lambda} \quad (2.11)$$

$$\frac{n_z c}{2l} = \frac{\cos \theta}{\lambda} \quad (2.12)$$

Se somarmos cada termo e elevarmos ao quadrado, teremos a seguinte expressão:

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{(2l)^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2). \quad (2.13)$$

Multiplicando por c^2 em ambos os lados

$$\frac{c^2}{\lambda^2} = \frac{c^2}{(2l)^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \rightarrow \nu = \frac{c}{2l} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.14)$$

em que ν corresponde as frequências emitidas pela cavidade.

Após detalhar o comportamento das ondas eletromagnéticas em um corpo negro, torna-se essencial estabelecer uma conexão entre essas ondas e a energia térmica associada. Podemos começar fazendo isso ao voltar à analogia dos harmônicos, lembrando que os átomos podem vibrar em diferentes frequências, algumas de maneira mais intensa que outras. Portanto, é necessário determinar um valor médio para a energia associada a essas vibrações.

Além disso, é crucial estabelecer quantos modos harmônicos existem para cada intervalo de frequência. Por exemplo, se considerarmos a frequência de 1 Hz, podemos ter os seguintes harmônicos:

$$n_x = 1, n_y = 0, n_z = 0 \quad (2.15)$$

$$n_x = 0, n_y = 1, n_z = 0 \quad (2.16)$$

$$n_x = 1, n_y = 0, n_z = 1 \quad (2.17)$$

Esses são três modos distintos de vibração. No entanto, à medida que aumentamos as frequências, o número de harmônicos que podem existir para uma mesma frequência se torna muito grande, dando a impressão de uma transição contínua em vez de discreta. Isso é uma consequência da distribuição dos modos de vibração nos diferentes eixos espaciais, e da densidade de estados permitidos para cada frequência.

Para descrever o número de harmônicos em função da frequência, introduzimos a função $N(\nu)$, que representa o número de modos de vibração por frequência ν . Assim, ao escolher uma frequência específica ν e adicionar um infinitésimo de frequência d , podemos determinar quantos harmônicos estão presentes nesse intervalo de frequências. A densidade de energia pode ser descrita como sendo

$$\rho = N(\nu)\bar{E}(\nu). \quad (2.18)$$

O ρ refere-se à densidade de energia espectral, ou seja, à quantidade de energia que cada frequência pode fornecer em um dado sistema. É importante observar que a integral de ρ ao longo de todas as frequências nos dá a energia total irradiada pelo sistema, e essa integral deve obedecer à Lei de Stefan-Boltzmann:

$$\int \rho(\nu)d\nu = \sigma T^4 \quad (2.19)$$

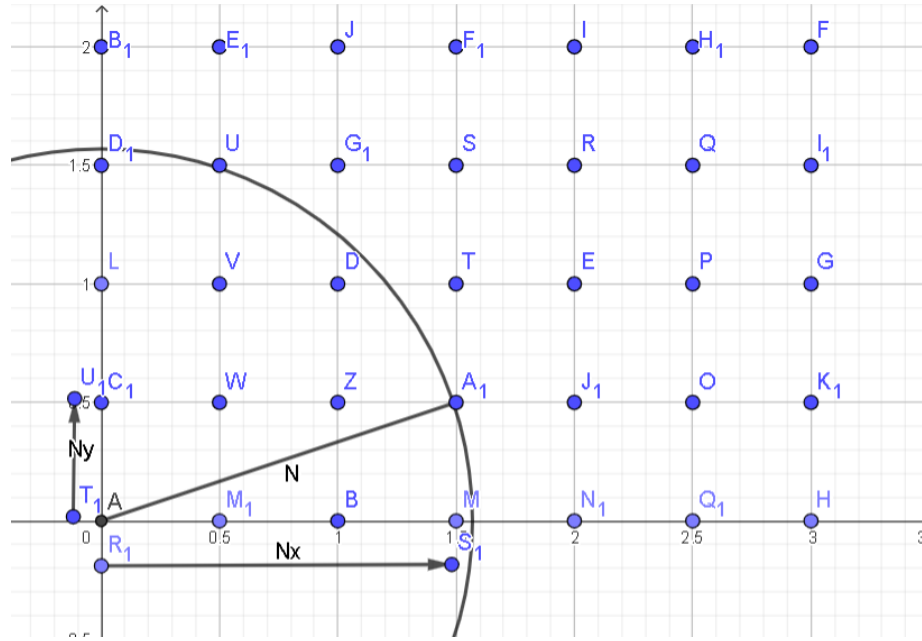
Nesta equação, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura absoluta do sistema. A equação expressa que a energia total irradiada por um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura.

Além disso, é necessário compreender como se dá a construção do número de modos harmônicos por frequência, $N(\nu)$. Isso pode ser descrito pelas combinações dos números quânticos n_x , n_y e n_z , que definem os estados possíveis de oscilação em um sistema tridimensional. A Figura 8 demonstra um modelo bidimensional que ilustra como esses nós (ou modos) podem se configurar para uma determinada frequência. Em um modelo tridimensional, esses modos correspondem às diferentes maneiras pelas quais ondas estacionárias podem se formar em um determinado volume, cada uma associada a uma frequência específica.

Cada ponto em azul na Figura 8 representa um nó. A frequência pode ser determinada pela relação trigonométrica baseada no Teorema de Pitágoras:

$$\nu = \frac{c}{2l} \left(n_x^2 + n_y^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

Figura 8 – Representação bidimensional dos modos harmônicos por frequência



Fonte: (KITTEL 2005) (Adaptada)

Nesta equação, ν é a frequência do modo normal, c é a velocidade da onda no meio, l é o comprimento da corda ou cavidade ressonante, e n_x e n_y são os números inteiros que representam os modos harmônicos nas direções x e y , respectivamente.

A frequência de um modo normal específico pode ser visualizada geometricamente como a distância do vetor $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ até a origem no espaço dos modos. Além disso, é possível observar que uma determinada frequência corresponde a todos os pontos equidistantes da origem, pois:

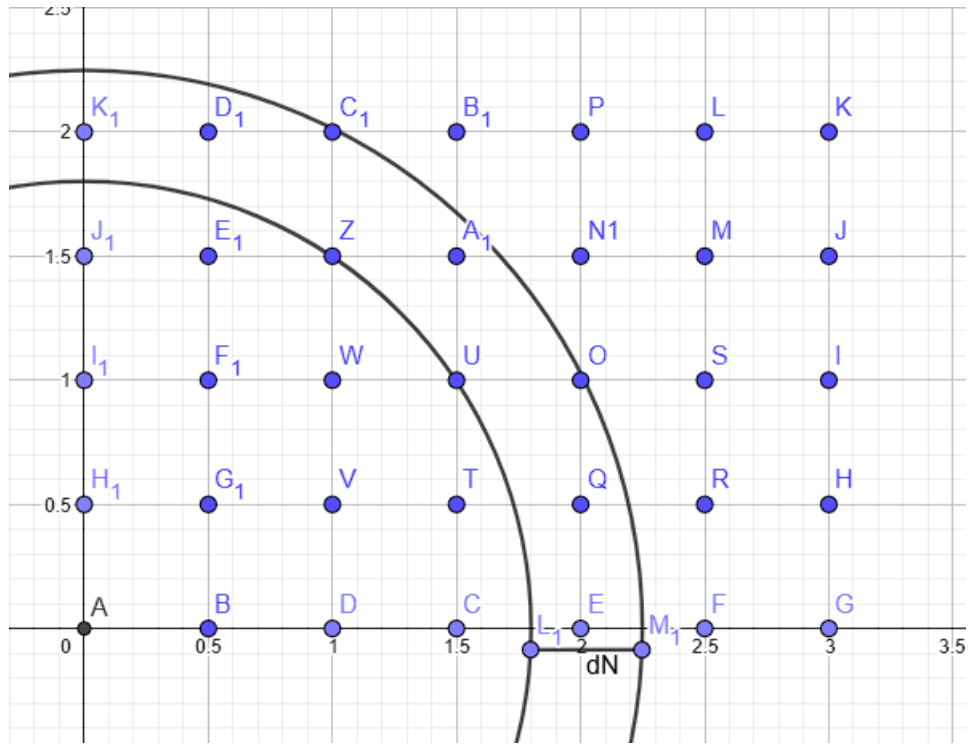
$$n_x^2 + n_y^2 = n^2, \quad (2.21)$$

em que n representa a magnitude do vetor de modo, ou seja, a distância da origem ao modo harmônico correspondente. A Figura 8 ilustra que para cada região no espaço onde se encontram esses nós, há uma frequência associada àquela distância da origem.

Ao pensar em acrescentar um infinitésimo de frequência $d\nu$, estamos, na verdade, falando em aumentar infinitesimalmente essa distância da origem no espaço dos modos Figura (9). Esse conceito está relacionado à quantização dos modos normais, em que pequenos incrementos na frequência correspondem a deslocamentos adicionais na posição dos nós no espaço dos modos.

Portanto, $N(\nu)$ representa a quantidade de nós (pontos de interferência) existentes dentro da região formada. Em duas dimensões, essa região corresponde a uma área; ao estendermos esse modelo para três dimensões, obtemos uma casca esférica.

Figura 9 – Acrecimo infinitesimal de Nós



Fonte: (KITTEL, 2005) (Adaptada)

O volume de uma casca esférica é dado por:

$$V = 4\pi r^2 dr \quad (2.22)$$

na qual r é o raio da casca e dr é a espessura infinitesimal da casca esférica. Como a frequência ν está relacionada com o número de nós n , temos:

$$\nu = \frac{c}{2l} n \quad (2.23)$$

Substituindo essa relação na equação anterior, obtemos:

$$4\pi \left(\frac{2l}{c}\right)^3 \nu^2 d\nu. \quad (2.24)$$

Isto é, o número de harmônicos produzidos com frequências entre ν e $\nu + d\nu$ será proporcional a:

$$N(\nu) \propto 4\pi \frac{8V}{c^3} \nu^2 \quad (2.25)$$

Através dessa equação podemos agora equacionar a energia média por frequência.

Sabemos que a energia média de um corpo pode ser calculada pelo produto da constante de Boltzmann k pela temperatura T , de acordo com o teorema da equipartição de energia

$$\overline{E}(\nu) = kT \quad (2.26)$$

Fazendo uma análise da equação anterior, concluímos que a densidade de energia emitida por frequência é proporcional a ν^2

$$\rho(\nu) \sim \nu^2 \quad (2.27)$$

O gráfico dessa função tem um caráter divergente, mostrando que a energia emitida aumenta indefinidamente. Isso ocorre porque, se a densidade de energia cresce com ν^2 , e não há uma frequência limite, podemos sempre aumentar os valores dos números de onda (n_x, n_y, n_z) .

À medida que a temperatura aumenta, o número de harmônicos também aumenta, o que eleva a probabilidade de aparecimento de frequências maiores.

Se integrarmos a densidade de energia para todas as frequências possíveis, obtemos:

$$\int \rho(\nu) d\nu = \infty \quad (2.28)$$

Esse resultado reflete o problema conhecido como "catástrofe do ultravioleta". Para resolver essa questão, Max Planck postulou que a energia emitida em uma frequência ν seria um múltiplo inteiro de uma quantidade fundamental, que ele chamou de $h\nu$, em que h é a constante de Planck:

$$E = nh\nu. \quad (2.29)$$

Com esse postulado, Planck evitou a catástrofe do ultravioleta, pois agora a energia emitida por um corpo negro não tende ao infinito. Isso acontece porque a energia depende linearmente de ν , em vez de ν^2 .

Sabendo que a energia média $\bar{E}$ é calculada pela probabilidade de que uma agitação térmica produza uma onda eletromagnética de uma determinada frequência nos constituintes da cavidade, podemos concluir que, ao introduzir a ideia de quantização de Planck, como a energia média está relacionada à temperatura, a probabilidade de surgirem frequências mais altas diminui à medida que a energia associada a essas frequências aumenta.

A probabilidade de uma frequência ν ocorrer é dada por:

$$P(\nu) = \frac{e^{-\frac{E}{kT}}}{\sum e^{\frac{E_n}{kT}}}. \quad (2.30)$$

Apesar de não ter inicialmente uma visão clara sobre a física envolvida na quantização da energia, Planck conhecia o comportamento experimental da radiação de corpo negro. Nesse contexto, ele introduziu esse conceito como um artifício matemático.

A energia média $\bar{E}$ é dada por:

$$\bar{E} = \sum P(E)E. \quad (2.31)$$

Substituindo a equação anterior, temos:

$$\overline{E} = \frac{\sum_E E e^{-\frac{E}{kT}}}{\sum_E e^{-\frac{E}{kT}}}. \quad (2.32)$$

Substituindo o valor da energia E por $nh\nu$, obtemos:

$$\overline{E} = \frac{h\nu \sum_n n e^{-\frac{nh\nu}{kT}}}{\sum_n (e^{-\frac{h\nu}{kT}})^n}. \quad (2.33)$$

O denominador representa uma progressão geométrica com razão $e^{-\frac{h\nu}{kT}}$, e como n vai de zero ao infinito, podemos escrevê-lo da seguinte forma:

$$\left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}}} \right). \quad (2.34)$$

É possível fazer o mesmo para o numerador. Para transformá-lo em uma progressão geométrica, é necessário reescrever o termo exponencial, de modo que a derivação produza um termo proporcional a uma progressão geométrica:

$$h\nu \sum_n n e^{-n\alpha}. \quad (2.35)$$

Agora, podemos reescrever a energia média como:

$$\overline{E} = \frac{h\nu \sum_n -\frac{\partial}{\partial \alpha} n e^{-n\alpha}}{\left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}}} \right)}. \quad (2.36)$$

Ao derivar a função exponencial, o coeficiente $-n$ é trazido para frente, tornando todo o numerador positivo. Segundo o princípio da linearidade da diferenciação, a derivada de uma soma equivale à soma das derivadas. Dessa forma, a equação pode ser reescrita como:

$$\overline{E} = \frac{-h\nu \frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_n e^{-n\alpha}}{\left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}}} \right)}. \quad (2.37)$$

Resolvendo a derivada em função de α , chegamos ao seguinte resultado:

$$\overline{E} = h\nu \left[\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}}} \right) \right] \left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}}} \right). \quad (2.38)$$

Simplificando, obtemos:

$$\overline{E} = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (2.39)$$

A densidade de energia emitida por um corpo negro é então dada por:

$$\rho(\nu) = 4\pi \frac{8V}{c^3} \nu^2 \overline{E}. \quad (2.40)$$

Assim, substituindo o valor de $\bar{E}$, tem-se que

$$\rho(\nu) = 4\pi \frac{8V}{c^3} \nu^2 \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (2.41)$$

Ao analisar os termos dessa equação, observa-se que a densidade espectral de energia depende criticamente da frequência ν , da constante de Planck h e da temperatura T . Isso reflete a natureza quantizada da energia dos fótons e a influência exponencial da temperatura na emissão de radiação. Esses fatores explicam a distribuição observada experimentalmente e fornecem uma compreensão profunda da interação entre matéria e radiação.

A integração da densidade espectral de energia ao longo de todas as frequências fornece a potência total radiada por um corpo negro. Esse valor é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo, conforme estabelecido pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$P = \sigma T^4, \quad (2.42)$$

em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor experimental é aproximadamente $5,670 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Este resultado não apenas valida a formulação de Planck para a radiação do corpo negro, mas também estabelece uma conexão fundamental entre a análise espectral detalhada da radiação térmica e a descrição macroscópica da emissão total de energia. A Lei de Planck, ao corrigir as previsões divergentes da física clássica — como a catástrofe do ultravioleta prevista pela lei de Rayleigh-Jeans —, foi essencial para a formulação da teoria quântica.

Ao introduzir o conceito de quantização da energia, a teoria de Planck marcou uma revolução no entendimento dos fenômenos físicos, estabelecendo as bases para o desenvolvimento da mecânica quântica e influenciando profundamente áreas como a física de semicondutores, a astrofísica e a termodinâmica estatística.

2.3 A NATUREZA ONDULATÓRIA DA LUZ E SUAS IMPLICAÇÕES NA FÍSICA QUÂNTICA

A difração das ondas eletromagnéticas é um fenômeno fundamental que revela a natureza ondulatória da luz e de outras formas de radiação eletromagnética. Esse fenômeno ocorre quando uma onda encontra um obstáculo ou uma abertura cujo tamanho é comparável ao comprimento de onda da radiação. Ao passar por essa abertura ou contornar o obstáculo, a onda se espalha, desviando-se de sua trajetória original. Essa capacidade de contornar obstáculos e se espalhar ao redor de bordas é uma característica intrínseca das ondas, distinta das partículas.

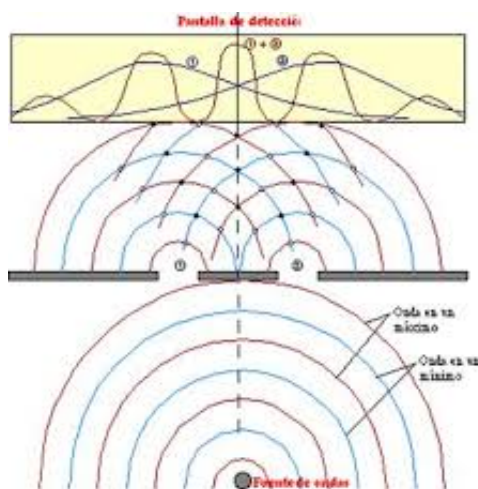
Ao explorar a difração, é possível observar como a luz se comporta de maneira diferente em comparação com as previsões da física clássica, abrindo caminho para a compreensão de fenômenos quânticos.

Além disso, a difração está intimamente relacionada à formulação de Planck para a radiação do corpo negro, pois este fenômeno foi um dos pontos de partida que levou Planck a questionar as ideias clássicas sobre a luz e a energia. A radiação do corpo negro, que apresenta um espectro contínuo de frequências, só pôde ser explicada adequadamente com a introdução da quantização da energia. A análise da difração ajuda a compreender como as ondas eletromagnéticas interagem com a matéria e como esses princípios estão entrelaçados com a teoria da quantização proposta por Planck.

2.3.1 Difração da luz

A história da difração das ondas eletromagnéticas remonta aos trabalhos de Thomas Young no início do século XIX. Young demonstrou, por meio de seu famoso experimento da fenda dupla, que a luz exibe padrões de interferência, evidenciando sua natureza ondulatória. Quando a luz passa por duas fendas próximas, as ondas emergentes interferem umas com as outras, criando um padrão de franjas claras e escuras em uma tela (Figura 10). Esse padrão não poderia ser explicado se a luz fosse composta apenas de partículas, como anteriormente proposto pela teoria corpuscular de Newton.

Figura 10 – Fenda dupla



O experimento de Young não apenas forneceu uma prova decisiva da natureza ondulatória da luz, mas também estabeleceu as bases para a compreensão da interferência e da difração, fenômenos que são centrais na ótica moderna. A difração é observada em diversas aplicações, desde a formação de imagens em telescópios até o funcionamento de dispositivos como fendas e redes de difração, e é crucial para a tecnologia de comunicações ópticas, incluindo fibras ópticas e lasers.

A reprodução do experimento da fenda dupla feito por Thomas Young deve-se seguir alguns requisitos, para que a luz de uma fonte possa fazer uma trajetória síncrona a luz precisa passar primeiramente por um orifício A o qual fará com que os feixes se propaguem de forma sincronizada, isso permite que adotemos a luz que sai de A como sendo uma fonte de emissão mais conveniente. Fazendo uma análise quantitativa podemos adotar o modelo de onda tridimensional cujo campo elétrico é descrito por:

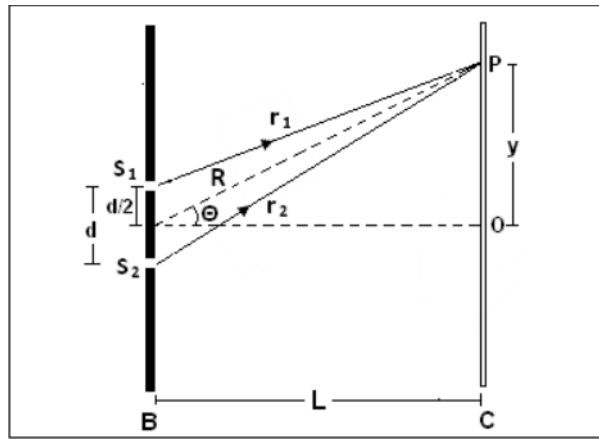
$$E(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{r} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t), \quad (2.43)$$

em que E corresponde a intensidade do campo elétrico, E_0 a amplitude máxima do campo, ω é a frequência e k o vetor de onda. Observe que a intensidade da onda cai a medida que ela se propaga, ou seja, a medida que $\vec{r}$ aumenta. A amplitude do campo também pode ser descrita em sua forma exponencial:

$$E(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{r} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}. \quad (2.44)$$

Sendo a intensidade luminosa é definida pela interferência gerada pela interação de duas frentes de ondas esféricas em um determinado ponto P em um anteparo, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Intensidade luminosa no ponto P gerado pela interferência construtiva de duas frentes de ondas em fase



Fonte: (SANTOS, 2014)

Considerando os campos elétricos oscilantes E_1 e E_2 , podemos descrevê-los por:

$$E_1(P, t) = \frac{E_0}{r} e^{i(kr - \omega t)} \quad (2.45)$$

$$E_2(P, t) = \frac{E_0}{r} e^{i(kr - \omega t)} \quad (2.46)$$

Supondo que as distâncias entre S_1 e S_2 sejam muito próximas, podemos considerar que r_1 é aproximadamente igual a r_2 . Além disso, R é muito maior que d . Por último, como

ambas as ondas foram geradas pela mesma fonte, isso contribui para que as duas ondas, apesar de percorrerem caminhos ópticos diferentes, permaneçam em fase. Para facilitar os cálculos, faremos a seguinte substituição:

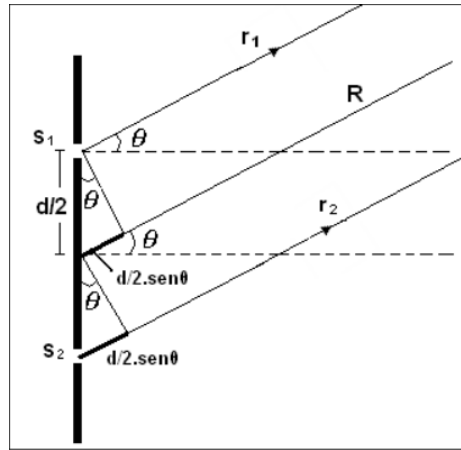
$$\psi(P, t) = \frac{E_0}{r} e^{ikr} \quad (2.47)$$

A análise das distâncias r_1 e r_2 fica assim:

$$r_1 = R - \left(\frac{d}{2}\right) \sin \theta \quad (2.48)$$

A Figura 14 ilustra como esses feixes de luz se difratam ao passar por S_1 e S_2 .

Figura 12 – Representação esquemática dos feixes de luz sendo difratados por dois orifícios



Fonte: (SANTOS, 2014)

$$r_2 = R + \left(\frac{d}{2}\right) \sin \theta \quad (2.49)$$

Ambos os termos podem ser expandidos em séries de Taylor, que ficam escritas como:

$$r = r(d) + \frac{r'(d)d}{1!} + \frac{r''(d)d^2}{2!} + \frac{r'''(d)d^3}{3!} + \dots \quad (2.50)$$

Portanto, r pode ser expresso como

$$r = R \left(1 + \frac{d}{R} \sin \theta \right) \quad (2.51)$$

As funções de onda podem ser aproximadas por:

$$\psi_1(P) = \frac{E_0}{r} e^{ikr_1} \quad (2.52)$$

$$\psi_2(P) = \frac{E_0}{r} e^{ikr_2} \quad (2.53)$$

O campo elétrico $E(\vec{r}, t)$ dada onda resultante no anteparo é o resultado da superposição dos campos no ponto P :

$$E(\vec{r}, t) = E_1(P, t) + E_2(P, t) \quad (2.54)$$

Substituindo os valores dos campos, obtemos:

$$E(\vec{r}, t) = [\psi_1(P) + \psi_2(P)]e^{-i\omega t} \quad (2.55)$$

A luz visível oscila com uma frequência em torno de 10^{15} Hz. Devido a essa alta frequência, é impraticável realizar uma medição precisa utilizando a frequência como parâmetro. Portanto, utilizamos o conceito de intensidade I de uma onda eletromagnética, que representa a média do vetor de Poynting ao longo da direção de propagação da onda:

$$I = \langle S \rangle \vec{k}. \quad (2.56)$$

A intensidade de uma onda plana monocromática é dada por:

$$I = \epsilon v \langle \vec{E}^2 \rangle t, \quad (2.57)$$

em que ϵ é a permissividade elétrica do meio e v é a velocidade de propagação da onda, enquanto $\langle \vec{E}^2 \rangle t$ representa um fator de média temporal da intensidade do campo elétrico. Assim, podemos reescrever I como

$$I = \frac{1}{2} \epsilon v |E(\vec{P}, t)|^2. \quad (2.58)$$

Como as intensidades relevantes para a observação serão obtidas no mesmo meio, faz sentido ignorar as constantes, resultando em:

$$I = |E(\vec{P}, t)|^2 \quad (2.59)$$

Ao utilizarmos a equação anterior, podemos escrever a intensidade luminosa em função de ψ_1 e ψ_2 .

$$I = |[\psi_1(P) + \psi_2(P)]e^{-i\omega t}|^2. \quad (2.60)$$

Utilizando a propriedade matemática do conjugado complexo $|z|^2 = zz^*$:

$$I = [\psi_1(P) + \psi_2(P)]e^{-i\omega t} [\psi_1^*(P) + \psi_2^*(P)]. \quad (2.61)$$

Com $|\psi(P)|^2 = \psi(P)\psi^*(P)$, podemos expandir:

$$I = [|\psi_1(P)|^2 + |\psi_2(P)|^2 + (\psi_1^*(P)\psi_2(P) + \psi_2^*(P)\psi_1(P))]. \quad (2.62)$$

ou ainda

$$I = [|\psi_1(P)|^2 + |\psi_2(P)|^2 + |\psi_1(P)||\psi_2(P)| (e^{ik(r_2-r_1)} + e^{-ik(r_2-r_1)})]. \quad (2.63)$$

Utilizando a relação:

$$2 \cos \theta = e^{i\theta} + e^{-i\theta}. \quad (2.64)$$

Temos que

$$I = |\psi_1(P)|^2 + |\psi_2(P)|^2 + 2|\psi_1(P)||\psi_2(P)| \cos [k(r_2 - r_1)]. \quad (2.65)$$

Como ψ_1 e ψ_2 correspondem às intensidades I_1 e I_2 , então

$$I = I_1(P) + I_2(P) + 2\sqrt{I_1(P)I_2(P)} \cos \Delta, \quad (2.66)$$

em que Δ equivale a diferença de fase entre os feixes:

$$\Delta = k(r_2 - r_1). \quad (2.67)$$

Qualquer diferença de fase que possa ocorrer no plano do anteparo será gerada pela proporcionalidade existente entre as distâncias das duas fendas propostas pelo experimento. Como $I_1(P) = I_2(P)$, podemos escrever:

$$I(P) = 2I_1(P)(1 + \cos \Delta) \quad (2.68)$$

Isso nos permite utilizar a relação trigonométrica:

$$2 \cos^2 \frac{\theta}{2} = 1 + \cos 2\theta \quad (2.69)$$

o que reformula a equação anterior como:

$$I(P) = 4I_1(P) \cos^2 \frac{\theta}{2}. \quad (2.70)$$

A variação do ponto P no anteparo permite que a diferença de fase Δ entre as ondas luminosas mude, gerando variações de máximos e mínimos. A intensidade será máxima quando $\cos^2 \frac{\Delta}{2} = 1$, o que ocorre quando Δ é igual a zero ou a múltiplos de π . Para esses casos, a interferência é construtiva::

$$I(P) = 4I_1(P) \cos^2 \frac{\Delta}{2} = 4I_1(P) \cos^2 \frac{n\pi}{2}, \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 4, \dots) \quad (2.71)$$

Já para intensidades mínimas, temos $\cos^2 \frac{\Delta}{2} = 0$; nesse caso, Δ deve ser um múltiplo ímpar de π , resultando em interferências destrutivas:

$$I(P) = 0; \Delta = (2n + 1)\pi; (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.72)$$

A intensidade luminosa em todo o anteparo é a soma das intensidades individuais. As posições de máximos e mínimos são determinadas pela resultante de $I(P)$ em função do ângulo θ entre o raio R e a horizontal, permitindo reescrever Δ como

$$\Delta = k(r_2 - r_1) = kd \sin \theta, \quad (2.73)$$

em que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Assim, podemos determinar os máximos e mínimos como

Máximos:

$$d \sin \theta = m\lambda; (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.74)$$

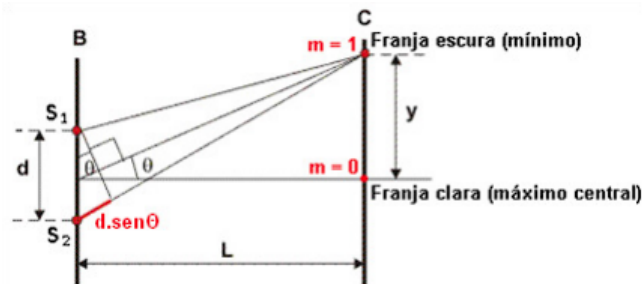
Mínimos:

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda; (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.75)$$

As equações acima permitem determinar as posições das franjas claras e escuras. Além disso, os valores de (m) são úteis para distinguir as diferentes franjas. Por exemplo, para $(m = 0)$, a equação indica que há uma franja clara em $(\theta = 0)$, ou seja, no eixo central. Esse máximo central ocorre quando $r_2 - r_1 = 0$. Já para $m = 1$, a equação mostra que há franjas escuras acima e abaixo do eixo central, onde a diferença das distâncias percorridas pelos raios r_1 e r_2 é $1,5\lambda$. Essas franjas são chamadas de franjas escuras de segunda ordem.

Portanto, o padrão de intensidade luminosa no anteparo consiste em uma região central clara, que corresponde ao máximo de ordem zero $(m = 0)$, alternada por regiões escuras e claras, correspondendo aos mínimos e máximos de ordens superiores $(m = 1, 2, 3, \dots)$. A Figura 13 mostra as posições os máximos e mínimos em um padrão de interferência construtiva.

Figura 13 – Seguimentos de retas mostrando as posições de Máximos e Mínimos.



Fonte: (SANTOS, 2014)

3 FUNDAMENTAÇÃO CONSTRUCIONISTA E O USO DO ARDUINO NO ENSINO DE FÍSICA

O ensino por meio da programação, enraizado nas teorias construcionistas de Seymour Papert, representa uma abordagem que redefine o papel da tecnologia na educação. Papert, em obras como "Mindstorms" e através do desenvolvimento da linguagem de programação LOGO (PAPERT, 1980b), propôs que o aprendizado se torna mais eficaz quando os estudantes estão diretamente envolvidos na construção de algo tangível. Essa ideia, amplamente discutida na literatura sobre construcionismo, destaca a importância do aprendizado ativo e da construção de conhecimento em contextos sociais, onde a linguagem e a interação desempenham papéis centrais na formação do entendimento (BEYNON, 2017; PAPERT, 1980b).

A linguagem de programação LOGO, desenvolvida por Seymour Papert e seus colegas no MIT (Massachusetts Institute of Technology) na década de 1960 (PAPERT, 1980b), foi projetada com o objetivo de ensinar conceitos de matemática, ciência e programação de uma maneira acessível e intuitiva, especialmente para crianças. LOGO é muitas vezes associada à "geometria da tartaruga", uma parte central da linguagem em que os usuários controlam uma tartaruga virtual (ou, em alguns casos, um robô físico) que desenha formas e padrões na tela ou no chão. LOGO teve um impacto significativo no campo da educação, sendo uma das primeiras linguagens de programação a ser introduzida em salas de aula. Ela abriu caminho para o uso da tecnologia como uma ferramenta educacional, mudando a maneira como os educadores pensam sobre o ensino de disciplinas técnicas e estimulando o interesse dos alunos por programação e robótica desde cedo. Papert acreditava que LOGO não apenas ensinava habilidades técnicas, mas também ajudava a moldar o pensamento criativo e independente dos alunos, preparando-os para solucionar desafios complexos de maneira inovadora.

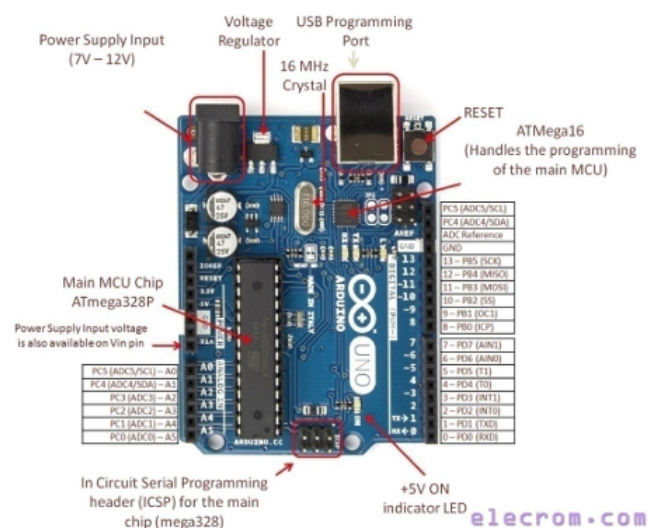
Assim como a linguagem LOGO revolucionou o ensino ao introduzir a programação de forma acessível e intuitiva, o Arduino tem desempenhado um papel significativo na melhoria do ensino de Física. O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto que se destaca por sua praticidade e acessibilidade, permitindo a realização de experimentos científicos que envolvem desde conceitos básicos até fenômenos físicos mais complexos.

Na educação, o Arduino possibilita a aquisição automática de dados em experimentos de Física, tornando a compreensão de conceitos abstratos mais concreta por meio da interação direta com fenômenos reais. Essa abordagem facilita a visualização e análise

de processos físicos, como a variação de temperatura (MOREIRA, 2018), movimentos uniformemente variados e harmônicos simples (BARBOSA; COSTA; LIMA, 2023), e a Lei de Resfriamento de Newton (ADMIRAL, 2022). Ao permitir que os alunos observem e manipulem variáveis em tempo real, a plataforma estimula uma conexão mais intuitiva com os princípios científicos, proporcionando uma experiência imersiva que favorece a aprendizagem ativa.

Além da simples observação, o uso do Arduino no ensino de Física incentiva uma abordagem construcionista, em que os estudantes participam ativamente do processo de descoberta e experimentação. Eles não apenas coletam dados, mas também programam o sistema, configuram sensores e analisam os resultados utilizando ferramentas computacionais, como planilhas eletrônicas e softwares de modelagem. Esse processo interdisciplinar favorece a integração entre a teoria e a prática, promovendo um aprendizado mais significativo. Além disso, ao lidar com eletrônica, programação e análise de dados, os alunos desenvolvem competências essenciais para a era digital, ampliando sua capacidade de resolução de problemas e inovação tecnológica.

Figura 14 – Placa Arduino uno



Fonte: (OLIVEIRA et al., 2020)

3.1 ARDUINO: UMA FERRAMENTA VERSÁTIL PARA O ENSINO DE FÍSICA MODERNA

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware e software livres, inicialmente desenvolvida em 2005 na Itália, com o objetivo de tornar o desenvolvimento de projetos eletrônicos acessível a iniciantes. Ele se destaca por oferecer uma interface de programação intuitiva (Arduino IDE) e por contar com uma comunidade global engajada, que compartilha tutoriais, bibliotecas e exemplos de aplicação. Essa rede

de suporte, aliada ao espírito colaborativo, cria um ambiente propício à troca de ideias e à resolução conjunta de problemas, aproximando ainda mais o ensino da realidade do trabalho científico.

Para além da placa Arduino Uno, amplamente adotada em ambientes educacionais, há vários outros modelos, como o Arduino Nano, valorizado por seu tamanho compacto, e o Arduino Mega, ideal para projetos mais complexos e que demandam maior quantidade de pinos de entrada e saída. Essa diversidade de placas possibilita ao educador selecionar a opção mais adequada às necessidades de cada experimento, tornando a experiência pedagógica flexível e adaptada a diferentes níveis de conhecimento dos estudantes.

3.1.1 Principais componentes e recursos

- **Microcontrolador:** Geralmente baseado em modelos como o ATmega328P (no caso do Arduino Uno), ele é responsável por processar as instruções e executar o código desenvolvido pelo usuário. Esse “cérebro” da placa armazena programas e coordena as interações entre sensores, atuadores e demais componentes.
- **Pinos de Entrada e Saída (I/O):** São fundamentais para a comunicação entre o Arduino e o mundo externo. As entradas analógicas permitem medir grandezas variáveis, como tensão ou intensidade luminosa, enquanto as saídas digitais viabilizam o acionamento de LEDs, motores e até mesmo lasers, úteis em experimentos de óptica.
- **Conversor Analógico-Digital (ADC):** Converte sinais analógicos em valores digitais que podem ser interpretados pelo microcontrolador. Em experimentos de Física, como a determinação da constante de Planck ou o estudo de movimento, esse componente traduz medições físicas reais em dados numéricos.
- **Conector USB e Fontes de Alimentação:** Além de permitir a transferência de programas, a porta USB também fornece alimentação para a placa durante o desenvolvimento de projetos. Já os reguladores de tensão internos garantem a estabilidade e a segurança elétrica, mesmo quando se trabalha com fontes de alimentação externas.
- **Bibliotecas e Extensões:** A comunidade Arduino desenvolve e mantém diversas bibliotecas para sensores, módulos de comunicação (Wi-Fi, Bluetooth, Ethernet) e displays, ampliando o leque de aplicações didáticas. Essa variedade de recursos permite que estudantes e professores explorem desde conceitos básicos de circuitos até sistemas embarcados mais avançados.

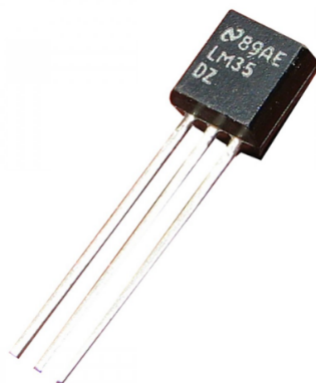
O Arduino vem se consolidando como uma ferramenta indispensável para tornar o ensino de Física mais dinâmico e intuitivo. Através de seu microcontrolador que converte sinais analógicos ou digitais vindos de diferentes sensores em dados processáveis, os quais

podem ser exibidos em tempo real ou armazenados para análise posterior. Dessa forma, estudantes e professores conseguem observar e quantificar fenômenos físicos de maneira prática, o que potencializa a compreensão de conceitos teóricos e desenvolve competências como análise crítica, trabalho em equipe e resolução de problemas.

No estudo de Cinemática, por exemplo, podem-se utilizar sensores ultrassônicos para medir distâncias em função do tempo (LEITE, 2021). Esses dispositivos emitem pulsos de ultrassom e, ao registrar o intervalo entre emissão e reflexão, fornecem ao Arduino a informação necessária para o cálculo de posições e velocidades. A placa, por sua vez, converte esses sinais em valores digitais e permite que o usuário obtenha gráficos de posição, velocidade ou aceleração, favorecendo discussões sobre queda livre, lançamentos oblíquos e movimentos harmônicos. Acelerômetros também podem ser acoplados para aprofundar a análise da dinâmica, fornecendo dados sobre a aceleração em cada eixo e permitindo a observação direta da segunda lei de Newton ou do movimento circular.

Na Termodinâmica, a possibilidade de monitorar temperaturas, pressões e outras variáveis térmicas torna o Arduino especialmente útil em experimentos que costumam ser abstratos quando abordados apenas teoricamente (SOUZA, 2019). Sensores como o LM35, que produz uma tensão proporcional à temperatura, ou o DS18B20, que se comunica digitalmente, permitem registrar variações de calor e interpretar curvas de aquecimento ou resfriamento com alto grau de precisão. O Arduino recebe esses sinais e os converte para valores em graus Celsius ou Kelvin, podendo inclusive exibi-los em um display ou enviá-los para o computador via porta serial.

Figura 15 – Sensor de temperatura LM35.



Fonte: Disponível em: "<https://humorquantico.com/courses/fisica-das-radiacoes/lessons/fisica-das-radiacoes/topic/1919-radiacao-de-corpo-negro-max-planck/>". Acessado em 13 de janeiro de 2025

Em processos mais avançados, sensores de pressão e umidade, como o BME280, detectam mudanças internas ou externas em um sistema, possibilitando a exploração de propriedades de gases em leis como as de Boyle-Mariotte e Charles. Esse conjunto de recursos traz ao laboratório escolar a oportunidade de investigar trocas de calor, eficiência de isolamento e até mesmo ciclos termodinâmicos simplificados (TUTORIALS, 2024).

Figura 16 – Sensor de temperatura BME280.



Fonte: Disponível em: "<https://www.usinainfo.com.br/blog/sensor-bme280-para-monitoramento-da-pressao-umidade-e-temperatura/>". Acessado em 13 de janeiro de 2025

No contexto do Eletromagnetismo, o Arduino se torna um importante aliado na análise de tensão, corrente elétrica e campos magnéticos, permitindo o registro contínuo e confiável dessas grandezas. Para medir a tensão, é suficiente conectar o pino de entrada analógica a um ponto do circuito que se deseja examinar, respeitando os limites de tensão da placa ou utilizando divisores de tensão. Para a medição da corrente elétrica, é possível empregar shunts (resistores de baixo valor) ou módulos como o ACS712, que convertem a corrente que passa pelo circuito em um sinal equivalente. O Arduino processa esses valores recebidos e os disponibiliza para visualização ou armazenamento, facilitando a verificação experimental de relações como a Lei de Ohm e o comportamento de circuitos em série e paralelo.

Além disso, sensores de efeito Hall e magnetômetros são eficazes na detecção e medição de campos magnéticos, permitindo a realização de estudos sobre indução eletromagnética e transformações de energia. Em experimentos que envolvem a aproximação de ímãs a bobinas, por exemplo, o Arduino capta as tensões induzidas, ilustrando os princípios de Faraday e Lenz e demonstrando como a variação de um campo magnético pode gerar uma corrente elétrica mensurável. (COSTA, 2019).

Em todos esses casos, a capacidade de processamento do Arduino permite que os resultados sejam analisados em tempo real, sejam exibidos em um display conectado à placa ou sejam transferidos para ferramentas de análise no computador. Esse fluxo contínuo de coleta de dados e visualização imediata aumenta o engajamento dos estudantes, que podem comparar as observações experimentais com previsões teóricas e, assim, desenvolver senso crítico para avaliar discrepâncias e possíveis fontes de erro. A montagem dos experimentos, a escrita do código e a interpretação dos resultados também promovem o trabalho em equipe e a interdisciplinaridade, uma vez que o projeto pode envolver não apenas princípios de Física, mas também noções de eletrônica, lógica de programação e design de protótipos.

A versatilidade do Arduino ao capturar e processar diferentes variáveis físicas

torna-o um recurso de grande valor didático, capaz de aproximar os estudantes do método científico e enriquecer a aprendizagem em áreas fundamentais como Cinemática, Termodinâmica e Eletromagnetismo. Sua adoção em sala de aula ou em laboratórios experimentais estimula a prática investigativa, reforça o entendimento conceitual e oferece uma experiência mais completa do que representa a atividade científica no mundo contemporâneo. (MARTINAZZO et al., 2014).

3.1.2 Filtros RC

Em circuitos eletrônicos que exigem modulação de sinais, os filtros RC desempenham um papel fundamental na garantia da estabilidade e pureza do sinal. Isso é especialmente verdadeiro em projetos que envolvem a utilização de lasers, pois qualquer ruído ou oscilação indesejada pode comprometer a qualidade e a consistência do feixe. O laser, por sua vez, é uma fonte de luz coerente com frequência específica, tornando-se particularmente sensível a interferências elétricas, sobretudo quando é modulado por dispositivos como o Arduino.

No contexto de um experimento em que o Arduino modula o feixe de laser para a criação de um padrão de difração, os filtros RC ajudam a estabilizar a modulação do sinal e a filtrar possíveis interferências no sensor que detecta a luz difratada:

- **Estabilização da Modulação do Laser:** O Arduino frequentemente utiliza PWM (Modulação por Largura de Pulso) para acionar o laser em altas frequências, ligando e desligando o feixe de forma controlada. Entretanto, esse tipo de sinal pode apresentar pulsos abruptos que resultam em oscilações de intensidade na luz emitida. Um filtro RC passivo, inserido entre a saída PWM e o circuito de acionamento do laser, suaviza esse sinal elétrico, atenuando as transições mais bruscas e possibilitando um feixe mais uniforme. Dessa forma, o padrão de difração desejado é observado de maneira mais nítida, sem ruídos ou variações desnecessárias que poderiam dificultar a análise.
- **Filtragem de Sinais de Interferência no Sensor (LDR):** O sensor resistor dependente de luz (LDR), responsável por medir a intensidade luminosa difratada, também está sujeito a interferências, seja por flutuações na fonte de alimentação ou por ruídos eletromagnéticos gerados por outros componentes do próprio circuito ou de dispositivos próximos. Um filtro RC posicionado adequadamente na etapa de leitura do LDR ajuda a eliminar as variações de alta frequência que não interessam à medição, garantindo que o sinal coletado reflita de maneira mais fiel as oscilações reais da luz difratada.

Um exemplo prático da utilização de um filtro RC é na modulação de um laser operando a 1 kHz. Para isso, pode-se projetar um filtro RC com uma frequência de corte ligeiramente superior a esse valor, permitindo a passagem do sinal útil (em torno de 1 kHz)

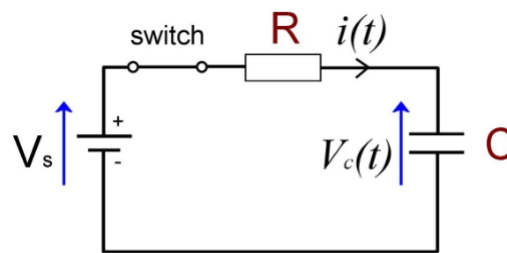
e atenuando frequências mais altas, que muitas vezes correspondem a ruídos indesejados. Os parâmetros de corte podem ser determinados ajustando-se os valores do resistor (R) e do capacitor (C) na seguinte fórmula:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (3.1)$$

em que f_c é a frequência de corte em hertz, R é a resistência em ohms e C é a capacitância em faraday.

Dessa forma, tanto a modulação do laser quanto a leitura do sensor permanecem sob controle, evitando distorções indesejadas no sinal. Se necessário, é possível calcular mais precisamente os valores de R e C para adequá-los às exigências específicas do experimento, garantindo um equilíbrio entre a velocidade de resposta do sistema e a eficiência na filtragem dos ruídos.

Figura 17 – Filtro Resistor Capacitor



$$V_s - i(t)R - V_c(t) = 0$$

Fonte: Disponível em: "<https://owlcation.com/stem/RC-Circuit-Time-Constant-Analysis>". Acessado em 13 de janeiro de 2025

3.1.3 Modulação do Laser

A modulação do laser em qualquer circuito semelhante ao utilizado neste projeto desempenha um papel essencial no controle preciso da emissão luminosa e na análise subsequente dos fenômenos de difração. O laser semicondutor, quando utilizado para gerar o padrão de interferência necessário à determinação da constante de Planck, deve emitir um feixe de luz coerente, estável e controlável. No entanto, a saída padrão de um microcontrolador como o Arduino é digital, gerando sinais em níveis discretos de tensão que alternam rapidamente entre valores máximo e mínimo. Para converter esse sinal digital em um comportamento que simule uma variação analógica, emprega-se a modulação por largura de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*) (KE, 2024).

A modulação PWM opera ajustando o tempo em que o laser permanece ligado e desligado dentro de um intervalo fixo, controlando assim a intensidade média da luz emitida. O Arduino gera uma sequência de pulsos de 5 V e 0 V com uma frequência

suficientemente alta para que o olho humano não perceba a variação, mas que pode ser detectada eletronicamente. Para suavizar essa flutuação e obter uma saída de tensão mais constante, insere-se no circuito um filtro RC passa-baixa, que atenua as oscilações de alta frequência. Isso permite que o laser emita um feixe de intensidade praticamente constante, essencial para a obtenção de medições precisas da curva característica corrente-tensão (curva I-V).

No contexto deste experimento, a modulação do laser é fundamental porque possibilita o controle do ponto de limiar da emissão estimulada, ou seja, a tensão mínima a partir da qual o diodo laser começa a emitir luz coerente. Esse ponto é identificado com base na curva I-V obtida durante o processo experimental. O Arduino, ao modular a tensão aplicada ao laser e registrar a corrente correspondente, permite determinar com precisão o momento em que a emissão luminosa se torna significativa. Como a energia dos fótons emitidos está relacionada à frequência da luz por meio da equação de Planck,

$$E = h\nu, \quad (3.2)$$

em que h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação emitida, a análise desses dados possibilita a estimativa dessa constante fundamental da física quântica (CARUSO; OGURI, 2016).

Essa energia também pode ser calculada pela relação elétrica:

$$E = eU, \quad (3.3)$$

em que e é a carga do elétron e U é a tensão limiar determinada pelo experimento. Assim, igualando essas expressões, obtemos:

$$eU = h\nu. \quad (3.4)$$

Como a frequência da luz está relacionada ao seu comprimento de onda pela equação:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (3.5)$$

Substituímos esse valor na expressão anterior:

$$eU = h \left(\frac{c}{\lambda} \right). \quad (3.6)$$

E finalmente, isolando h :

$$h = \frac{eU\lambda}{c}. \quad (3.7)$$

Essa equação permite determinar a constante de Planck a partir dos valores medidos experimentalmente, utilizando a tensão limiar U obtida com o auxílio da modulação do laser e o comprimento de onda λ encontrado por meio da análise do padrão de interferência.

3.1.3.1 Relação com o experimento de difração

A modulação do laser está diretamente relacionada à análise do padrão de difração gerado quando o feixe de luz coerente atravessa uma rede de difração unidimensional. Este padrão é resultado do fenômeno de interferência construtiva, que ocorre quando as frentes de onda difratadas se superpõem em fase em determinadas direções.

O comprimento de onda da luz emitida pelo laser, representado por λ , é um parâmetro essencial para o cálculo da constante de Planck e pode ser determinado a partir das medições do padrão de interferência, de acordo com a equação:

$$\lambda = \frac{d \sin(\theta)}{m},$$

em que d é o período da rede de difração (distância entre dois sulcos consecutivos), m é a ordem de difração observada (um número inteiro positivo) e θ é o ângulo de difração, medido entre o máximo central e o máximo de ordem m .

Esse ângulo θ pode ser calculado a partir da posição das franjas de interferência no anteparo, utilizando relações trigonométricas básicas e considerando a distância entre a rede e o anteparo. A precisão na determinação de θ é aprimorada com o controle da intensidade luminosa do laser, que é regulada por meio do PWM. Esse tipo de modulação permite ajustar a potência média emitida sem alterar a frequência do laser, melhorando a visibilidade das franjas e a exatidão da medição.

A partir da relação entre a energia dos fótons emitidos por um diodo laser semicondutor (laser de estado sólido) e a tensão de limiar U_0 do diodo, é possível estimar a constante de Planck h por meio da equação:

$$h = \frac{eU_0 d \sin(\theta)}{cm}. \quad (3.8)$$

em que e é a carga elementar do elétron, U_0 é a tensão mínima para a emissão de luz pelo diodo laser, c é a velocidade da luz no vácuo.

Dessa forma, a modulação do laser exerce um papel fundamental não apenas no controle da intensidade do feixe luminoso, mas também na caracterização elétrica e óptica do diodo semicondutor, permitindo uma análise experimental da relação entre energia e frequência, conforme os princípios da quantização da energia estabelecidos por Planck. Essa abordagem experimental viabiliza uma forma didática de introduzir conceitos fundamentais da física moderna, como a dualidade onda-partícula e os postulados da mecânica quântica, em contextos acessíveis ao ensino médio (CARUSO; OGURI, 2016).

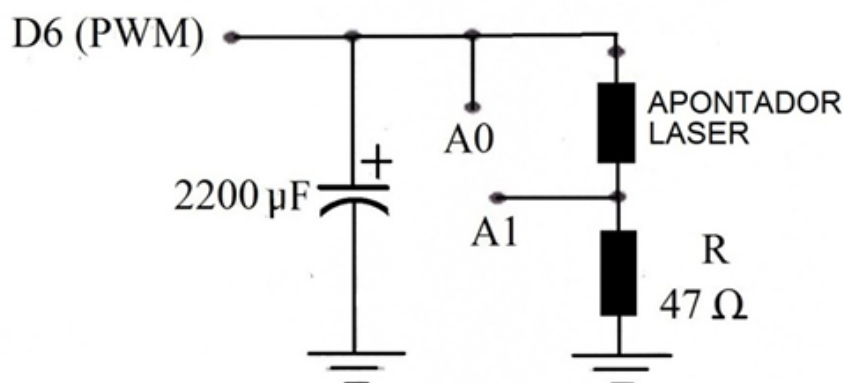
3.1.4 Circuito Eletrônico para Controle de Laser Semicondutor com Filtro LPF e Modulação PWM via Arduino

O circuito eletrônico utilizado para a investigação do comportamento de um laser semicondutor sob controle do PWM foi projetado para permitir a medição da tensão limiar necessária à emissão do feixe luminoso. Essa modulação foi suavizada por meio de um filtro passa-baixas, garantindo uma saída de tensão contínua, adequada para o funcionamento estável do diodo laser. A Figura 18 apresenta o diagrama esquemático do circuito experimental desenvolvido.

O circuito é composto pelos seguintes componentes eletrônicos:

- 1 capacitor eletrolítico (valores típicos entre $10\ \mu F$ e $100\ \mu F$, dependendo da frequência da modulação);
- 1 resistor de $47\ \Omega$, atuando em conjunto com o capacitor para formar o filtro RC passa-baixas;
- 1 diodo laser (apontador laser vermelho padrão, geralmente com comprimento de onda próximo a $650\ \text{nm}$).

Figura 18 – Diagrama do circuito eletrônico para análise da curva característica de um laser semicondutor controlado via Arduino.



Fonte: (OLIVEIRA et al., 2020)

Esse arranjo possibilita o controle preciso da intensidade luminosa do laser, ao mesmo tempo que permite estudar a curva característica tensão-corrente do diodo semicondutor, fundamental para a posterior determinação experimental da constante de Planck.

3.1.5 Código do Arduino

O controle automatizado do laser, a aquisição de dados e a subsequente análise experimental são viabilizados por instruções programadas e enviadas ao microcontrolador Arduino, por meio de códigos desenvolvidos na plataforma Arduino IDE. O programa implementado neste projeto foi projetado com o objetivo de otimizar tanto o controle

do feixe de laser durante os experimentos de difração quanto a coleta precisa dos dados necessários à determinação da constante de Planck (SANTOS; JR.; SANTANA, 2015).

A lógica do código permite a modulação da intensidade luminosa do laser por meio da técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM), fundamental para a construção da curva característica corrente-tensão (I-V) do diodo semicondutor. Essa curva possibilita a identificação do ponto de limiar de tensão responsável pela emissão de luz coerente.

Além disso, o código estabelece comunicação com o software Excel utilizando a macro PLX-DAQ, permitindo a coleta automatizada e o armazenamento em tempo real dos dados experimentais, o que contribui significativamente para a eficiência e a confiabilidade dos resultados obtidos.

A seguir, apresenta-se o código do programa:

```
const int pinoPWM = 6;  
const int pinoTensao = A0;  
const int pinoCorrente = A1;  
const float resistencia = 47.0; // Ohms
```

Aqui são definidas as variáveis constantes que representam os pinos do Arduino usados no circuito: o pino 6 para enviar o sinal PWM que controla a intensidade do laser, e os pinos analógicos A0 e A1 para fazer as leituras de tensão e corrente, respectivamente. Também é definida a resistência de 47 Ohms usada para calcular a corrente elétrica a partir da tensão medida no resistor.

O trecho a seguir corresponde a função de inicialização (setup), estabelecendo a comunicação serial com a interface PLX-DAQ, responsável por transferir os dados coletados para uma planilha Excel em tempo real. O programa aguarda dois segundos para assegurar que a conexão esteja estabilizada antes do envio dos comandos. São enviados comandos para limpar quaisquer dados previamente armazenados na planilha e para configurar os rótulos das colunas que receberão os valores de tensão e corrente. Por fim, o pino utilizado para controle do laser é configurado como saída, preparando o sistema para o envio dos sinais PWM:

Inicializa comunicação serial

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  delay(2000);
```

Título das colunas para o Excel

```

    Serial.println("CLEARDATA");
    Serial.println("LABEL,Tensao (V),Corrente (mA)");

    pinMode(pinoPWM, OUTPUT);
}

```

Função loop() - controle PWM e coleta de dados:

A função principal (loop) executa um ciclo contínuo em que a intensidade do laser é modulada por meio do sinal PWM, variando seu valor de 0 a 255 em incrementos de 5, permitindo uma varredura gradual da potência aplicada. Após cada ajuste do sinal, o sistema aguarda 100 milissegundos para garantir a estabilidade do circuito antes da leitura dos sensores. As leituras analógicas realizadas nos pinos A0 e A1 correspondem às tensões medidas diretamente no circuito e no resistor de referência, respectivamente. Essas leituras são convertidas para valores de tensão em volts com base na resolução do conversor analógico-digital do Arduino. A corrente elétrica é então calculada utilizando a resistência conhecida, convertida para miliamperes para facilitar a interpretação. Os valores obtidos são transmitidos para o software PLX-DAQ através da interface serial, permitindo o armazenamento e análise imediata dos dados no Excel. Para garantir intervalos regulares entre as amostras, é adotado um atraso de 200 milissegundos entre as medições:

Configura PWM

```

for (int pwm = 0; pwm <= 255; pwm += 5) {
    analogWrite(pinoPWM, pwm);
    delay(100);
}

```

Leitura dos pinos

```

int leituraTensao = analogRead(pinoTensao);
int leituraCorrente = analogRead(pinoCorrente);

```

Conversão para tensão (0 a 5V)

```

float tensao = (leituraTensao * 5.0) / 1023.0;
float tensaoResistor = (leituraCorrente * 5.0) / 1023.0;

```

Cálculo da corrente

```

float corrente = (tensaoResistor / resistencia) * 1000.0;

```

Envio para o PLX-DAQ

```
Serial.print("DATA,");  
Serial.print(tensao, 3);  
Serial.print(",");  
Serial.println(corrente, 3);  
  
delay(200);  
}
```

Desligamento do laser e reinício do ciclo Concluída a varredura completa da intensidade do laser, o sistema desliga o dispositivo ao enviar um sinal PWM com valor zero, interrompendo a emissão luminosa. Posteriormente, o programa realiza uma pausa de dois segundos antes de reiniciar o ciclo, assegurando condições de segurança e estabilidade do circuito para as próximas medições:

Desliga PWM após varredura

```
analogWrite(pinoPWM, 0);  
delay(2000);
```

Neste processo, ocorre a medição filtrada da tensão e corrente:

- O microcontrolador Arduino realiza a leitura analógica das portas A0 e A1, aplicando um filtro digital.
- A leitura obtida no pino A0 é convertida em valores de tensão e, posteriormente, de corrente elétrica, tomando como referência o valor padrão de 5 V da alimentação do Arduino.
- A corrente elétrica é determinada com base na Lei de Ohm, conforme a expressão:

$$I = \frac{V}{R},$$

em que $R = 47,0 \Omega$.

- A leitura do pino A1 é configurada de forma a garantir medições consistentes da corrente, sendo fundamental para a correta caracterização do comportamento do diodo emissor de luz.

Esse código permite a aquisição automatizada dos dados necessários para a determinação da constante de Planck, facilitando a análise do comportamento do diodo laser e seu padrão de emissão coerente.

3.2 CONSTRUÇÃO AUTOMÁTICA DAS TABELAS

Nesta seção, detalhamos a lógica implementada para a coleta e organização automática de dados no Excel, utilizando o Arduino para registrar medições de tensão e corrente de forma estruturada. O código adota um sistema de repetição para garantir que cada novo dado seja inserido sequencialmente, permitindo a atualização em tempo real no Excel.

3.2.1 Registro de dados no Excel

O Arduino envia os dados ao Excel utilizando a comunicação serial, garantindo que cada valor seja armazenado na célula correta. O código abaixo ilustra esse processo:

- `CELL,SET|`: Instrui o Excel sobre a célula onde o dado será armazenado.
- `Letra[colunas]|`: Define a coluna de inserção do valor (inicialmente "A").
- `linhas|`: Representa a linha atual da tabela.
- `VOLT, 4|`: Envia o valor de tensão com precisão de quatro casas decimais.
- `colunas + 1|`: Direciona a inserção para a coluna seguinte (coluna "B").
- `CORR, 5|`: Envia o valor de corrente com precisão de cinco casas decimais.

3.2.2 Organização dos dados no Excel

Os dados coletados são organizados da seguinte forma:

Tabela 2 – Organização dos dados no Excel

Coluna	Conteúdo
A	Valores de Tensão
B	Valores de Corrente

Fonte: Autoria Própria

Cada nova medição ocupa uma linha subsequente, garantindo que a tabela seja organizada e de fácil análise.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta dissertação tem como foco o desenvolvimento, a aplicação e a análise de dois experimentos distintos voltados à determinação da constante de Planck, utilizando redes de difração como recurso central. O primeiro experimento será elaborado com materiais alternativos e de baixo custo, com o intuito de garantir acessibilidade e viabilidade de replicação em ambientes escolares com recursos limitados. O segundo experimento, por sua vez, será automatizado, utilizando uma rede de difração de laboratório e integrando sensores, atuadores e um sistema de controle baseado na plataforma Arduino para modulação do laser, coleta e processamento de dados. Ambos os experimentos constituem a base para a construção de um **roteiro de aprendizagem ativa** voltado ao ensino de conceitos da Física Moderna, em especial à quantização da energia.

A elaboração desse roteiro está ancorada nos princípios do construcionismo de Seymour Papert, que propõe uma aprendizagem centrada no estudante como agente ativo na construção do conhecimento, especialmente quando envolvido em projetos concretos e significativos. Papert (1980) argumenta que os aprendizes desenvolvem melhor sua compreensão ao construir artefatos compartilháveis que exigem reflexão, criatividade e resolução de problemas. Assim, o roteiro de aprendizagem ativa estrutura situações didáticas que favorecem a experimentação, o pensamento crítico, a colaboração e a criação, aproximando-se da perspectiva de uma aprendizagem significativa, participativa e autoral (PAPERT, 1980a; VALENTE, 1999).

Além disso, essa abordagem dialoga com os princípios apresentados por (RESNICK, 2017), que defende um modelo educacional baseado em projetos, paixão, pares e brincadeira (*projects, passion, peers, and play*), estimulando o pensamento criativo e o envolvimento dos estudantes em práticas autênticas. A proposta foi aplicada com estudantes do segundo ano do ensino médio da rede pública, proporcionando-lhes uma experiência concreta com fenômenos da Física Moderna por meio da manipulação de materiais e da análise de dados empíricos, contribuindo para o desenvolvimento do letramento científico e tecnológico.

A comparação entre as abordagens experimentais – artesanal e automatizada – visa fomentar nos alunos uma visão crítica sobre diferentes métodos de investigação científica, aproximando-os das práticas próprias da ciência. A compreensão do fenômeno da difração e a aplicação da equação da rede de difração para determinar o comprimento de onda da luz serão elementos centrais da prática experimental. A partir desses dados, será possível aplicar a equação de Planck $E = h\nu$, permitindo o cálculo da constante h e a integração dos conceitos de frequência, energia e quantização. A eficácia da proposta didática será avaliada

por meio de instrumentos qualitativos e quantitativos, incluindo questionários diagnósticos e formativos, bem como observações sistemáticas em sala de aula, com o objetivo de aferir o grau de compreensão e apropriação dos conceitos por parte dos estudantes.

4.1 PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO ROTEIRO DE APRENDIZAGEM ATIVA

4.1.1 Objetivo do roteiro de aprendizagem ativa

O roteiro de aprendizagem ativa tem como objetivo central proporcionar aos estudantes do ensino médio uma introdução prática e acessível aos fundamentos da Física Moderna, com foco na determinação da constante de Planck por meio da análise de padrões de difração da luz e tensão limiar do laser modulado via arduino. Para isso, serão desenvolvidos dois experimentos baseados em redes de difração: um com materiais acessíveis, (Bando óptico feito com Cd e madeira) e o outro utilizando uma rede de difração laboratorial. Essa abordagem visa combater as dificuldades recorrentes no ensino da física quântica, que geralmente são apresentada de forma abstrata e descontextualizada. Ao possibilitar a visualização direta dos efeitos físicos, como o padrão de interferência e a curva característica do diodo emissor de luz (LASER), os estudantes podem construir um entendimento mais concreto da quantização da energia e da relação entre luz e matéria.

Além disso, a introdução da plataforma Arduino no contexto escolar promove o desenvolvimento de habilidades computacionais e de raciocínio lógico, articulando o ensino de Física com as competências digitais requeridas pelo mundo contemporâneo. A proposta didática adota uma metodologia ativa e colaborativa, conforme a perspectiva construcionista, promovendo a autonomia, a criatividade e o protagonismo dos alunos na construção do conhecimento.

4.1.2 Universo da pesquisa

O universo da pesquisa está centrado na aplicação de um recurso educacional inovador em uma disciplina eletiva multisseriada, ofertada a alunos do segundo ano do ensino médio da escola **Centro Educa Mais Santos Dumont**, situada no município de Vargem Grande - MA. A escolha desse contexto justifica-se pela necessidade de promover práticas pedagógicas mais inclusivas e alinhadas às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (Educação, 2017), que enfatiza a interdisciplinaridade, o uso de tecnologias digitais e o protagonismo juvenil.

O modelo multisseriado da disciplina eletiva onde os alunos se inscrevem de forma voluntária, inicialmente previsto para promover a interação entre estudantes de diferentes níveis de aprendizagem, foi adaptado em comum acordo com a coordenação pedagógica da

escola. Ficou estabelecido que a aplicação do projeto seria realizada exclusivamente com alunos do segundo ano do ensino médio. Essa decisão visou garantir maior homogeneidade nos conhecimentos prévios e maior compatibilidade com os conteúdos propostos. Ainda assim, a dinâmica adotada favoreceu a troca de experiências, a construção coletiva do saber e o desenvolvimento de habilidades socioemocionais como cooperação e pensamento crítico dos participantes.

A implementação dos experimentos com redes de difração tanto o de baixo custo quanto a de laboratório tem como finalidade ampliar o repertório científico dos alunos. A prática investigativa em sala será associada ao uso de tecnologias digitais como o software Excel associada ao macro PLX-DAQ, que permite a coleta e análise de dados gerados pelo Arduino em tempo real. Por fim, esta pesquisa visa contribuir não apenas para o fortalecimento do ensino de Física no ensino médio, mas também para a formação de sujeitos críticos e capazes de aplicar o conhecimento científico em situações reais. Ao integrar teoria, prática e tecnologia, pretende-se oferecer uma experiência de aprendizagem alinhada às competências do século XXI, promovendo um ensino mais significativo, contextualizado e transformador.

4.1.3 Planejamento das aulas

- **Aula 1: Introdução à Física Moderna e à Constante de Planck**

Objetivo: Apresentar os conceitos fundamentais da física moderna, como a quantização de energia, a dualidade onda-partícula e a relevância da constante de Planck na mecânica quântica.

Conteúdo teórico: Abordar o contexto histórico do surgimento da física quântica, elucidando como os cientistas desenvolveram o conceito de quantização de energia e explicando a importância da constante de Planck na compreensão dos fenômenos quânticos.

Discussão: Estabelecer conexões com aplicações cotidianas, abordando tecnologias como LEDs, painéis solares e lasers.

Recursos didáticos: Quadro, apresentação em slides.

- **Aula 2: Introdução ao Arduino e Fundamentos de Entrada/Saída (I/O)**

Objetivo: Ensinar os conceitos básicos de entrada e saída de dados (I/O) usando o Arduino, com foco na interação do controle do laser e na coleta de dados dos sensores.

Conteúdo teórico: Explicar os componentes essenciais do Arduino (placa, pinos digitais/analógicos, IDE do Arduino) e os fundamentos da programação (estrutura de código, variáveis, loops). Introduzir os conceitos de entrada (sensores) e saída (ativação de dispositivos, como o laser) e explicar o funcionamento básico de leitura de dados de um sensor de luz (fotodiodo ou LDR).

Atividade prática: Montar um circuito básico com o Arduino e programá-lo para controlar um LED, introduzindo comandos simples como "ligar" e "desligar".

Recursos didáticos: Kit Arduino, computadores para programação.

- **Aula 3: Difração da luz e introdução ao experimento**

Objetivo: Explicar o fenômeno da difração da luz e preparar os alunos para a realização do experimento.

Conteúdo teórico: Definir e explicar o conceito de difração da luz. Discutir a teoria da difração por fendas e como esta pode ser aplicada para calcular comprimentos de onda da luz.

Atividade prática: Montar o sistema óptico com o laser e as redes de difração (caseira e de laboratório). Realizar uma demonstração prática do padrão de interferência resultante.

Recursos didáticos: Laser, redes de difração caseira (por exemplo, CD/DVD) e de laboratório.

- **Aula 4: Coleta de dados com a rede de difração caseira**

Objetivo: Executar a medição prática utilizando a rede de difração caseira e instruir os alunos na coleta e organização dos dados.

Conteúdo teórico: Revisar a equação de difração $d \sin \theta = m\lambda$ e como será aplicada no experimento para calcular o comprimento de onda da luz.

Atividade prática: Utilizar o Arduino para modular o laser, medir os ângulos de difração (θ) e calcular o comprimento de onda da luz. Coletar os dados de difração com a rede caseira e registrar as medições.

Recursos didáticos: Arduino, laser, rede de difração caseira, régua milimetrada, computadores para coleta de dados.

- **Aula 5: Coleta de dados com a rede de difração de laboratório**

Objetivo: Repetir o experimento anterior utilizando a rede de difração de laboratório para fins de comparação dos resultados.

Conteúdo teórico: Reforçar as técnicas de medição e a importância de realizar medições precisas.

Atividade prática: Repetir o processo de coleta de dados com a rede de difração de laboratório. Comparar os padrões de interferência gerados pelas duas redes (Materiais de baixo custo e laboratorial)

Recursos didáticos: Arduino, laser, rede de difração de laboratório, régua milimetrada, computadores para coleta de dados.

- **Aula 6: Análise dos resultados e cálculo da constante de Planck**

Objetivo: Analisar os dados coletados nos experimentos e calcular experimentalmente a constante de Planck.

Conteúdo teórico: Explicar o método para calcular a constante de Planck a partir dos dados obtidos das medições dos ângulos de difração e do comprimento de onda. **Atividade prática:** Utilizar os dados de comprimento de onda obtidos nas aulas anteriores, calcular experimentalmente a constante de Planck. Comparar os resultados com o valor teórico e discutir as possíveis fontes de erro.

Recursos didáticos: Computadores, planilhas para organização dos dados, calculadoras.

- **Aula 7: Reflexão, discussão e apresentação de resultados**

Objetivo: Promover uma discussão final sobre os resultados e incentivar a apresentação dos projetos realizados pelos alunos.

Conteúdo teórico: Discutir a importância da experimentação prática no aprendizado da física e refletir sobre como a tecnologia pode ser utilizada para democratizar o acesso ao conhecimento científico.

Atividade prática: O grupo apresentará os resultados obtidos e explicará o processo de cálculo da constante de Planck a partir das redes de difração. Haverá um momento para troca de ideias e debates sobre o experimento.

Recursos didático: Slides, quadro para discussão.

4.1.4 Abordagem construcionista

A abordagem construcionista, proposta por Seymour Papert, enfatiza a aprendizagem por meio da criação de artefatos tangíveis. Nessa abordagem, o conhecimento é construído ativamente pelos alunos durante a realização dos experimentos, tornando-os protagonistas do processo de aprendizagem. Essa metodologia é amplamente utilizada no ensino de ciências, pois promove um aprendizado mais significativo ao integrar teoria e prática. Estudos indicam que a experimentação ativa melhora a retenção do conhecimento e o engajamento dos alunos.

O roteiro de aprendizagem ativa está estruturada para permitir que os estudantes desenvolvam habilidades técnicas, como programação e montagem de circuitos, ao mesmo tempo em que compreendem os conceitos teóricos por trás dos fenômenos físicos investigados. O uso do Arduino e de materiais alternativos proporciona uma integração entre a teoria e a prática, permitindo uma compreensão mais profunda e significativa dos conceitos abordados. Além disso, o projeto enfatiza a resolução de problemas reais, incentivando a criatividade e o pensamento crítico.

5 APLICAÇÃO DO RECURSO EDUCACIONAL

5.1 PROCESSO DIAGNOSTICO

A proposta de investigação da constante de Planck nesta pesquisa se ancora na compreensão dos conceitos físicos fundamentais associados à luz, energia e comportamento ondulatório, em especial no contexto das tecnologias modernas que utilizam a quantização da energia, como LEDs, sensores e lasers. Para que o processo de aprendizagem ocorra de forma significativa e construtiva, é essencial considerar os conhecimentos prévios dos estudantes sobre esses temas.

Na perspectiva construcionista, conforme defendida por Seymour Papert (1980), o aprendizado é mais eficaz quando o estudante pode construir ativamente o conhecimento a partir de suas próprias experiências e modelos mentais. Papert afirma que “qualquer coisa se torna fácil se puder ser assimilada à coleção de modelos mentais que alguém já possui; caso contrário, qualquer coisa pode se tornar dolorosamente difícil” ((PAPERT, 1980b)). Esse princípio é fundamental para o ensino de tópicos complexos da Física, como a constante de Planck, pois exige que os novos conceitos sejam conectados com estruturas cognitivas já existentes no estudante.

No construcionismo, o diagnóstico do conhecimento prévio não se limita a instrumentos formais como questionários. Ele emerge da observação das interações dos alunos com situações concretas de aprendizagem, especialmente em contextos experimentais mediados por tecnologias educacionais. Por meio da construção de artefatos, da programação de sistemas físicos simples ou da manipulação de instrumentos como o Arduino, os estudantes expressam de forma espontânea o que sabem e como organizam seus modelos explicativos sobre os fenômenos físicos abordados ((PAPERT, 2020)).

Neste trabalho, a aplicação de um questionário diagnóstico serviu como estratégia complementar para levantar indícios dos conceitos físicos internalizados pelos alunos, especialmente no que se refere à natureza da luz, dualidade onda-partícula e a ideia de quantização da energia. As respostas permitiram identificar possíveis concepções alternativas e orientar o planejamento da sequência didática, cuja abordagem enfatiza a experimentação e a construção de significados por meio da resolução de problemas reais e do uso de tecnologias acessíveis.

Ao adotar o diagnóstico como ponto de partida, a proposta construcionista se manifesta não apenas na valorização do conhecimento prévio, mas também na oferta de

ambientes de aprendizagem em que os estudantes possam reformular suas ideias a partir da experiência prática. O uso de um kit experimental, associado ao ensino da constante de Planck, proporciona condições para que os alunos estabeleçam conexões entre teoria e prática, desenvolvendo uma compreensão mais robusta dos fenômenos físicos envolvidos.

Assim, o diagnóstico assume papel essencial na mediação pedagógica construcionista, guiando o educador na criação de oportunidades autênticas de aprendizagem, nas quais os estudantes são protagonistas do seu processo de construção do conhecimento físico.

5.1.1 Análise da intervenção didática por meio de questionários

Durante a aplicação da proposta didático-experimental com estudantes do segundo ano do Ensino Médio, participantes da disciplina eletiva Explorando o Mundo Invisível, no Centro Educa Mais Santos Dumont, foram utilizados diversos instrumentos avaliativos com o objetivo de monitorar o aprendizado teórico, as percepções individuais sobre as atividades e os avanços conceituais ao longo do processo.

Ao final de cada aula, os alunos responderam a questionários específicos, elaborados de acordo com o estágio da intervenção. Nos três primeiros encontros, os instrumentos foram direcionados à verificação da aprendizagem teórica, abordando conteúdos introdutórios sobre Física Moderna e a constante de Planck assim como conceitos de arduino e difração (ver Apêndice C, D e E). Já durante as atividades práticas, aplicaram-se instrumentos de autoavaliação com escalas do tipo Likert (ver Apêndice F e G), que permitiram avaliar a percepção dos estudantes quanto ao envolvimento nas tarefas, à colaboração com os colegas e à compreensão dos conteúdos explorados.

Participaram ativamente das atividades 15 estudantes, os quais atribuíram notas de 1 a 5 para afirmações relacionadas ao engajamento, à autonomia e à clareza conceitual. As pontuações obtidas foram posteriormente convertidas em índices representativos dos níveis de comprometimento, autoconfiança e participação colaborativa dos alunos.

Como recurso complementar, cada participante manteve um diário individual (ver Apêndice H), no qual registrou as etapas do experimento com redes de difração e CDs. Esses registros incluíram descrições das atividades realizadas, dificuldades encontradas e reflexões pessoais sobre o processo de aprendizagem, constituindo uma importante fonte qualitativa para a análise da trajetória formativa dos estudantes.

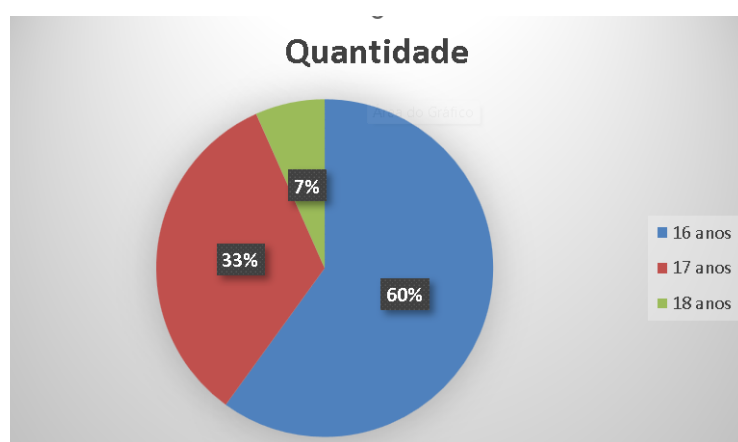
Ao término da proposta, foi aplicado um questionário pós-teste (ver Apêndice I), composto por dez questões: cinco objetivas, voltadas à verificação da compreensão da equação $E = hv$, e cinco dissertativas, destinadas a avaliar qualitativamente as percepções dos alunos sobre os conceitos e as experiências vivenciadas. As respostas de múltipla escolha foram analisadas quantitativamente por meio da porcentagem de acertos, enquanto as questões dissertativas foram examinadas de forma qualitativa, permitindo identificar

avanços na construção do conhecimento, bem como possíveis equívocos conceituais.

Ao término das atividades foi aplicado um questionário pos teste (ver Apêndice J) com o intuito de avaliar tudo que foi construído de conhecimento no decorrer das experiências. Além de focar em quantificar a receptividade a cerca do uso do arduino e seu impacto no processo de aprendizagem não buscando uma nota mas sim obter um parâmetro para se analisar a eficácia da proposta pedagógica aplicada.

A seguir, apresenta-se a distribuição etária dos participantes e o quantitativo envolvido nas atividades desenvolvidas:

Figura 19 – Distribuição etária dos estudantes participantes



Fonte: Autoria própria

É relevante destacar que 100% dos alunos envolvidos no estudo não possuíam familiaridade prévia com os conceitos de constante de Planck, nem compreendiam a relação entre frequência e energia ou o significado de quantização. Essa constatação reforça a importância da abordagem prática e construcionista adotada na proposta, contribuindo para tornar acessíveis e significativos conteúdos tradicionalmente considerados abstratos e de difícil assimilação no contexto do ensino médio.

5.2 APLICAÇÃO DOS CONCEITOS TEÓRICOS EM SALA DE AULA

Nesta etapa da proposta construcionista, os estudantes foram incentivados a construir ativamente seu conhecimento a partir da articulação entre teoria e prática, em consonância com os princípios defendidos por Seymour Papert. O objetivo central foi permitir que conceitos abstratos da física moderna – como a quantização da energia e a constante de Planck – emergissem como respostas significativas a desafios reais propostos em sala de aula.

Com base nesse enfoque, esperou-se que os alunos:

- Compreendessem os princípios da radiação térmica e os limites do modelo clássico ao descrever o espectro de emissão de um corpo negro, evidenciando a chamada "catástrofe do ultravioleta";
- Reconhecessem o surgimento da constante de Planck como um marco histórico-conceitual que introduz a ideia de quantização da energia em pacotes discretos;
- Refletissem sobre como tal conceito reformula a compreensão dos fenômenos térmicos e fornece as bases para a física quântica;
- Familiarizem-se com os procedimentos de medição (temperatura, intensidade de radiação e comprimento de onda), compreendendo sua relevância na determinação experimental da constante de Planck;
- Desenvolvessem uma postura crítica e investigativa ao comparar previsões clássicas e quânticas, internalizando o valor pedagógico da experimentação como meio para revelar a natureza descontínua da energia.

Esses objetivos foram desdobrados em habilidades avaliadas durante as atividades, incluindo:

- A capacidade de correlacionar conceitos teóricos com práticas experimentais;
- A compreensão da aplicação da teoria da quantização da energia à medição da constante de Planck;
- A clareza na explicação da metodologia de experimentação adotada.

5.2.1 Aula 1: Introdução ao Corpo Negro e Radiação Térmica

A primeira aula teórica introduziu o conceito de corpo negro por meio de uma atividade experimental simples e acessível. Utilizou-se uma lâmpada incandescente inserida em uma lata metálica, cuja superfície foi aquecida pela radiação. Com o auxílio de um termômetro infravermelho, foi possível realizar medições de temperatura sem contato direto, demonstrando a emissão contínua de radiação térmica e aproximando os alunos da ideia de um corpo negro ideal (veja Figuras 20 e 21).

Este experimento permitiu a visualização concreta de fenômenos descritos pela Lei de Planck, contextualizando historicamente as limitações da física clássica e a emergência da quantização. Além disso, reforçou a importância de tecnologias de medição, como os sensores infravermelhos, no estudo das propriedades térmicas e espectrais da matéria. Para aferir o entendimento aplicou-se o questionário: verificação dos conceitos de física moderna (Apêndice C) onde os alunos tinham formato múltipla escolha.

Na Tabela 3 é possível verificar as respostas dos estudantes quando questionados sobre a compreensão dos conceitos abordados nesta aula.

Os dados da Tabela 3 diagnosticam a auto percepção da compreensão dos conceitos:

Figura 20 – Abordagem do conceito de corpo negro



Fonte: Autoria Própria

Figura 21 – Prática experimental sobre o comportamento de um corpo negro



Fonte: Autoria Própria

Tabela 3 – Entendimento dos conceitos pelos alunos

Conceito	Perfeitamente	Parcialmente	Não entenderam
Conceito de Quantização	14	1	0
Temperatura vs Energia Irradiada	13	2	0
Energia em Pacotes	10	3	2

- Os conceitos fundamentais da quantização da energia foram compreendidos, especialmente no que se refere à ideia de energia sendo emitida em pacotes discretos (quanta);
- O maior número de compreensões parciais ou incompletas aparece no conceito de “energia em pacotes”, o que é esperado, dado seu nível de abstração. Isso sugere a necessidade de reforço com recursos visuais ou simulações;

- A aproximação experimental com o corpo negro parece ter sido eficaz, uma vez que a maioria compreendeu bem a relação entre temperatura e energia irradiada.

5.2.2 Aula 2: Fundamentos do Arduino e Circuitos Experimentais

Na segunda aula, foram explorados conceitos fundamentais de eletrônica com Arduino, sem implementação prática imediata, promovendo a construção conceitual prévia. Discutiram-se os pinos GND, de tensão positiva e de saída PWM, explicando suas funções elétricas e a lógica de operação da modulação por largura de pulso (PWM), que permite o controle de dispositivos por meio de sinais digitais variáveis.

Figura 22 – Montagem da rede de difração utilizando um CD

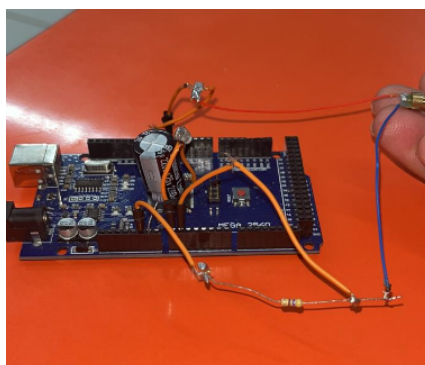


Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, foi montado um circuito experimental (Figura 23) no qual o pino PWM 6 foi conectado a um resistor de $47\ \Omega$, e as tensões foram monitoradas pelos pinos analógicos A0 e A1. Os dados coletados foram enviados via interface serial ao PLX-DAQ, proporcionando aos alunos uma visão clara da relação entre sinais digitais, medições analógicas e variáveis físicas — etapa crucial para a automatização dos experimentos de quantização da luz. Nesta etapa se aplicou o questionário sobre componentes eletrônicos do circuito (Apêndice D), também no formato multiplescolha.

Na Tabela 4 temos as respostas dos estudantes quando questionados sobre a compreensão dos dispositivos do circuito.

Figura 23 – Circuito para difração com CD



Autoria própria.

Tabela 4 – Compreensão dos conceitos da Aula 2

Conceito	Entenderam	Parcialmente	Não entenderam
Pino GND	8	4	3
Pino de tensão positiva	9	4	2
Saída PWM	6	6	3

A Tabela 4 revela desafios significativos na compreensão dos conceitos de eletrônica básica relacionados à plataforma Arduino. Pois, a saída PWM foi o conceito menos compreendido, refletindo a complexidade da abstração da modulação por largura de pulso, especialmente sem apoio prático direto na primeira explicação. Como se trata de conteúdos mais técnicos e novos para muitos alunos, os resultados sugerem que a exploração prática imediata e guiada poderia melhorar significativamente esses índices.

5.2.3 Aula 3: Conceito de Difração e Determinação de λ

A terceira aula concluiu a sequência com a discussão do fenômeno da difração, destacando seu caráter quantitativo. Foi enfatizado como o padrão de máximos e mínimos luminosos gerado por uma rede difrativa permite calcular, com precisão, o comprimento de onda da luz incidente. A abordagem conceitual centrou-se na interpretação dos deslocamentos observados na tela como indicadores diretos do valor de λ , preparando os estudantes para a fase experimental em que será estimada a constante de Planck.

Essa etapa reforça a visão papertiana de que o conhecimento é construído de forma mais eficaz quando o aluno manipula, experimenta e reflete sobre os fenômenos, articulando modelos mentais com experiências concretas. Para quantificar o entendimento nesta etapa do processo se aplicou o questionário verificação dos conceitos de difração (Apêndice E)

Na Tabela 5 verifica-se que:

- os alunos demonstraram alto grau de compreensão dos conceitos ligados à difração da luz, especialmente no que se refere à relação entre padrão de interferência e o comprimento de onda;

Figura 24 – Exposição de feixes luminosos a partir do fenômeno de difração



Fonte: Autoria Própria

- A preparação conceitual parece ter sido bem sucedida, o que reforça a eficácia da abordagem construcionista ao focar primeiro nos princípios antes da aplicação prática.

Tabela 5 – Entendimento dos conceitos da Aula 3

Conceito	Entenderam	Parcialmente	Não entenderam
Padrão de difração	12	3	0
Relação entre espaçamento da rede e posição das franjas	13	1	1
Determinação de λ	14	1	0

5.3 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS (AULAS 4, 5 e 6)

Nas aulas 4, 5 e 6, os estudantes foram orientados a construir e operar um aparato experimental com o objetivo de observar o fenômeno da difração da luz e, a partir dele, realizar uma estimativa da constante de Planck. A atividade foi desenvolvida com base em materiais de baixo custo, seguindo uma abordagem prática e construcionista que favorece a aprendizagem ativa e o protagonismo estudantil. Nestas etapas foram aplicados o Apêndice F, autoavaliação, coavaliação referente ao desempenho do grupo (Apêndice G) e modelo do diário de bordo portfólio de grupo (Apêndice H) em todos estes encontros onde os alunos participaram ativamente das atividades.

5.3.1 Aula 4: construção da rede de difração de baixo custo

A primeira etapa consistiu na montagem de um banco óptico artesanal (ver Apêndice A) , sobre o qual foi posicionada uma rede de difração construída a partir de um CD

comercial reutilizado. Para tornar visíveis os sulcos do CD – que funcionam como fendas periódicas –, os alunos removeram cuidadosamente a camada reflexiva do disco utilizando fita gomada (Figura 25) (ver Apêndice A 2.1). Esse processo deixou à mostra a superfície transparente com os sulcos concêntricos que atuam como elementos difratores. Em seguida, o CD foi fixado em um suporte rígido e alinhado perpendicularmente ao trilho do banco óptico, de modo que o feixe do laser incida de forma central e ortogonal à superfície do disco (ver Apêndice 2.3).

Figura 25 – Molde do banco optico artesanal



Fonte: Autoria própria.

Com a rede de difração artesanal pronta, cada grupo posicionou um laser de baixa potência no início do trilho e ajustou a distância até uma tela milimetrada, posicionada a alguns metros de distância. O objetivo era visualizar claramente os máximos de interferência luminosa (picos de difração) produzidos ao atravessar os sulcos do CD. Para isso, as luzes do ambiente foram apagadas, o que permitiu melhor contraste das franjas luminosas (ver Apêndice A.3) (Figura 26).

Durante a montagem, discutiu-se com os alunos a estrutura física do CD: os sulcos gravados em sua superfície têm espaçamento da ordem de 10^{-6} m (1 micrômetros), compatível com a ordem de grandeza da luz visível, o que justifica sua utilização como rede de difração. Esse parâmetro, chamado de espaçamento de rede d , está relacionado ao ângulo de difração θ por meio da equação de difração de máxima intensidade para luz monocromática:

$$d \cdot \sin(\theta) = n\lambda \quad (5.1)$$

Figura 26 – Preparação da rede de difração com CD



Fonte: Autoria própria.

em que n representa a ordem do máximo de interferência e λ o comprimento de onda da luz emitida pelo laser. A observação e a medição dos ângulos correspondentes aos máximos de primeira ordem foram fundamentais para determinar a energia dos fótons associados ao laser utilizado.

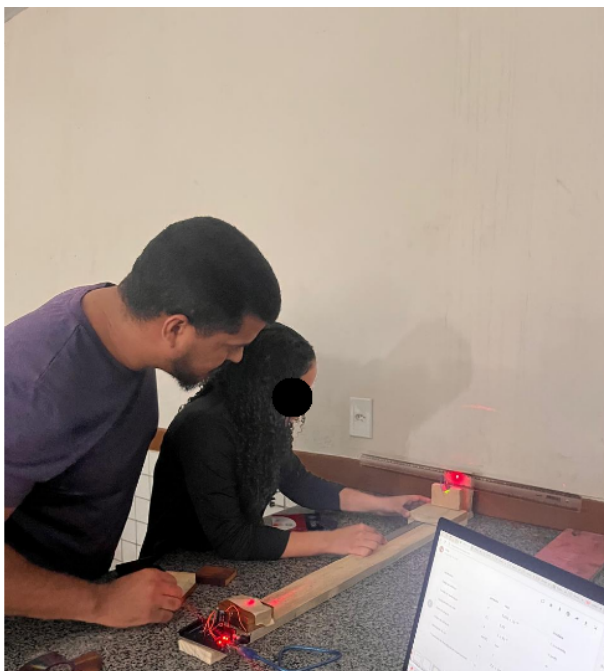
Para coletar os dados, cada grupo alinhou cuidadosamente o laser com o centro da rede de CD e projetou o feixe sobre a tela. Em seguida, foram registradas, em triplicata, as distâncias entre o máximo central e os máximos de primeira ordem em ambos os lados. Também foram medidas as distâncias entre o laser e o CD, e entre o CD e a tela. Com essas medidas, foi possível calcular os ângulos de difração e, conhecendo o comprimento de onda da luz utilizada, determinar a energia dos fótons com a equação:

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (5.2)$$

na qual c é a velocidade da luz no vácuo e h a constante de Planck. A energia do fóton foi também relacionada à diferença de potencial aplicada ao diodo emissor (laser), permitindo uma abordagem experimental indireta para estimar o valor de h , integrando teoria ondulatória, fenômenos quânticos e análise prática de dados.

Durante a discussão em sala, comparou-se o desempenho da rede de difração caseira com uma rede comercial de laboratório. Ressaltou-se que, embora os CDs possuam sulcos com espaçamentos adequados para difração, suas imperfeições e irregularidades introduzem ruído no padrão observado, resultando em máximos menos nítidos e simétricos. Em contraste, redes laboratoriais são produzidas com alto grau de precisão, apresentando padrões de difração mais regulares e facilmente interpretáveis. Ainda assim, a rede de CD

Figura 27 – Maquete artesanal com CD



Próprio autor.

Figura 28 – Imagem obtida



Próprio autor.

demonstrou ser um recurso didático eficiente, de baixo custo, que possibilita a visualização concreta de conceitos da óptica e da física quântica .

Essa etapa experimental cumpriu um papel central na proposta construcionista adotada, pois envolveu os alunos em processos de construção, manipulação, observação e análise de fenômenos físicos reais, promovendo uma aprendizagem significativa e contextualizada.

5.3.2 Aula 5: coleta e organização dos dados: comparação entre redes de difração comercial e caseira

Nesta aula foi realizada detalhadamente o processo de coleta e organização dos dados obtidos por meio da utilização de duas redes de difração: uma rede comercial industrializada e outra construída a partir de um disco óptico (CD). Ambas as abordagens foram aplicadas com o objetivo de possibilitar a determinação experimental da constante de Planck, a partir da difração de luz laser e posterior análise dos ângulos de interferência (ver Apêndice B.1).

5.3.2.1 Configuração do sistema óptico com rede comercial

Antes de iniciar as medições, foi fundamental assegurar a integridade e a precisão do sistema óptico experimental. O alinhamento adequado do feixe de laser de 650 nm (vermelho) foi realizado de forma que incidisse perpendicularmente ao centro geométrico da rede de difração comercial. Para garantir a reprodutibilidade do experimento e minimizar

erros sistemáticos, o anteparo foi posicionado sobre um trilho milimetrado com ajuste fino. Esta disposição possibilitou a obtenção de um padrão de interferência linear e simétrico (ver Apêndice B.2).

A rede de difração comercial apresenta sulcos produzidos com alta precisão e periodicidade uniforme, assegurando uma eficiência de difração elevada. Essa qualidade resulta em máximos de interferência bem definidos, com alto contraste e baixa dispersão dos dados, o que reduz significativamente as incertezas associadas às medidas angulares (ver Apêndice B.3). O espaçamento entre os máximos foi registrado em um anteparo com escala milimétrica, permitindo o cálculo dos ângulos de difração a partir da relação trigonométrica:

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{x_n}{L} \right) \quad (5.3)$$

em que x_n é o deslocamento linear do n -ésimo máximo em relação ao centro, e L é a distância entre a rede de difração e o anteparo.

5.3.2.2 Rede de difração de baixo custo com disco óptico

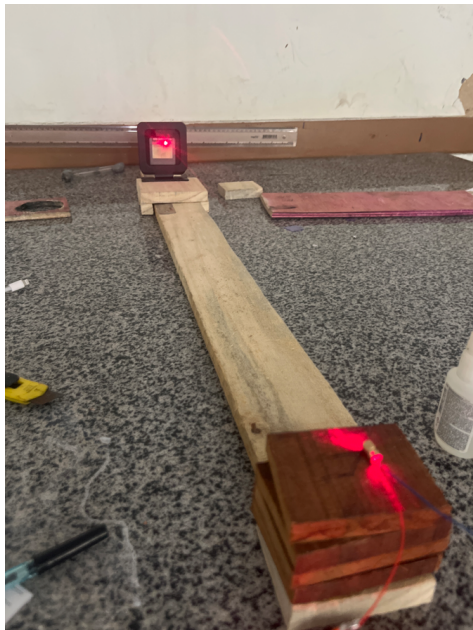
A rede alternativa foi confeccionada a partir de um disco compacto (CD), cuja camada metálica foi removida cuidadosamente com solvente, expondo os sulcos do substrato plástico, que funcionam como elementos difrativos. Essa porção útil do CD foi fixada rigidamente em um suporte, mantendo-se o feixe laser perpendicular à superfície, de modo a preservar o referencial geométrico utilizado no arranjo com a rede comercial (ver Apêndice B.3).

Embora os sulcos do CD apresentem profundidade e uniformidade inferiores às da rede industrial, o padrão de difração obtido revelou-se suficientemente claro para identificar ao menos as três primeiras ordens de máximos. As medições foram realizadas com os mesmos procedimentos, utilizando o anteparo milimetrado, e os ângulos foram calculados pela mesma razão trigonométrica.

Apesar da menor definição e contraste das franjas — consequência das imperfeições estruturais do CD — os dados obtidos ainda apresentaram variações dentro dos limites estatísticos aceitáveis para fins didáticos. Este resultado reforça a viabilidade pedagógica de utilização de materiais alternativos e de baixo custo no ensino experimental da Física, sobretudo em contextos escolares com restrições orçamentárias.

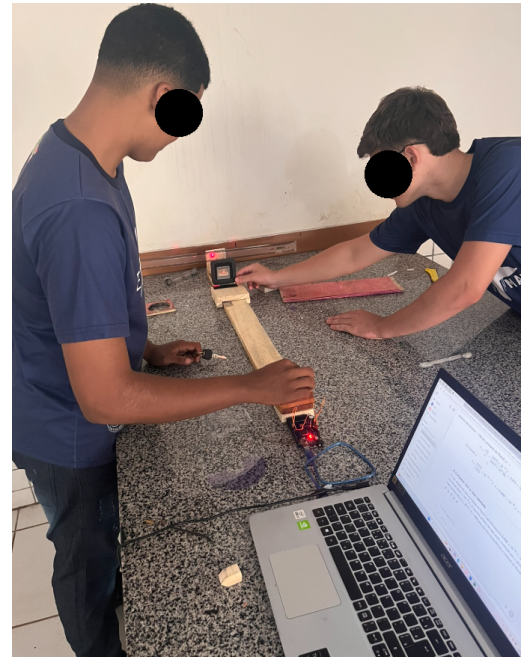
A comparação entre os dois arranjos evidencia o ganho metrológico proporcionado pelo uso de equipamentos industriais, ao mesmo tempo em que valida a eficácia formativa da versão simplificada, ao permitir a realização da experiência com resultados satisfatórios.

Figura 29 – Banco Ótico



Fonte: Autoria Própria

Figura 30 – Ajutes para medição dos maximos



Fonte: Autoria Própria

5.3.2.3 Coleta automatizada e determinação da constante de Planck

Para garantir precisão e sistematização na aquisição dos dados, foi utilizada a interface Arduino, conectada a sensores que monitoraram tensão e corrente do circuito do laser. Os dados foram enviados automaticamente para uma planilha do Excel por meio do software **PLX-DAQ**, o que permitiu o armazenamento contínuo e organizado das medições em tempo real (ver Apêndice B.4).

A curva característica tensão versus corrente do laser foi traçada a partir dessas medições, permitindo a identificação da tensão limiar (V_0), valor correspondente à energia mínima necessária para que elétrons atravessem a junção p-n do semiconductor e emitam fótons. Do ponto de vista físico, essa tensão está diretamente relacionada à energia de Fermi do material emissor.

Com base nessa informação, foi aplicada a equação de Planck, adaptada para a situação:

$$E = h \cdot f = e \cdot V_0, \quad (5.4)$$

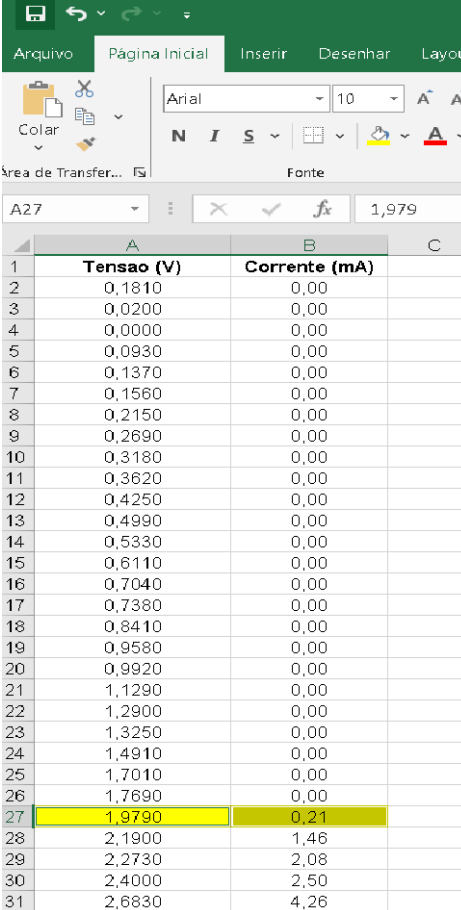
em que e é a carga elementar do elétron e V_0 é a tensão limiar obtida experimentalmente. Reorganizando a equação, a constante de Planck pode ser calculada pela relação:

$$h = \frac{c}{e \cdot V_0 \cdot \lambda}$$

Assim, a coleta automatizada dos dados não apenas possibilitou a geração de uma curva de operação do laser, mas também forneceu as grandezas fundamentais para o

cálculo experimental de h , permitindo uma abordagem quantitativa e significativa de um dos conceitos mais fundamentais da física moderna.

Figura 31 – Tabela com o valor da tensão limiar do laser semiconductor



	A	B	C
1	Tensao (V)	Corrente (mA)	
2	0,1810	0,00	
3	0,0200	0,00	
4	0,0000	0,00	
5	0,0930	0,00	
6	0,1370	0,00	
7	0,1560	0,00	
8	0,2150	0,00	
9	0,2690	0,00	
10	0,3180	0,00	
11	0,3620	0,00	
12	0,4250	0,00	
13	0,4990	0,00	
14	0,5330	0,00	
15	0,6110	0,00	
16	0,7040	0,00	
17	0,7380	0,00	
18	0,8410	0,00	
19	0,9580	0,00	
20	0,9920	0,00	
21	1,1290	0,00	
22	1,2900	0,00	
23	1,3250	0,00	
24	1,4910	0,00	
25	1,7010	0,00	
26	1,7690	0,00	
27	1,9790	0,21	
28	2,1900	1,46	
29	2,2730	2,08	
30	2,4000	2,50	
31	2,6830	4,26	

Fonte: Próprio autor.

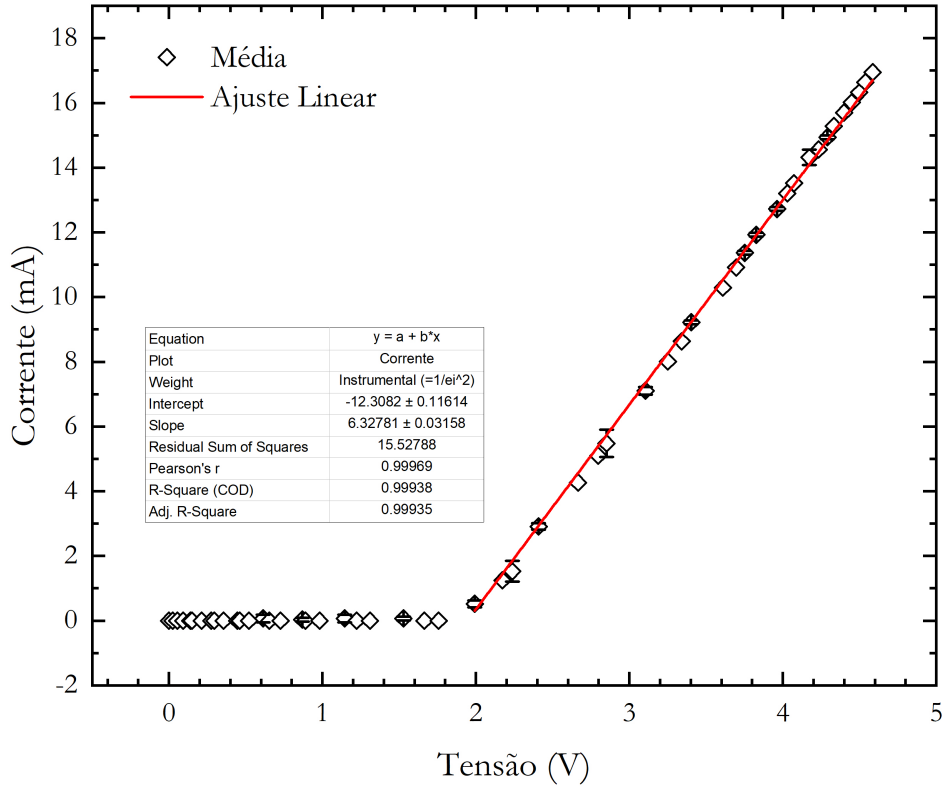
5.3.3 Aula 6: Análise dos resultados e cálculo da constante de Planck

A sexta aula teve como objetivo central a análise dos dados experimentais coletados e o cálculo da constante de Planck, utilizando como base os experimentos realizados com laser controlado por Arduino e redes de difração – tanto uma rede laboratorial padrão quanto uma rede improvisada a partir da superfície de um CD.

Na Figura 32, observa-se a curva característica do diodo laser utilizado no experimento. O gráfico mostra a relação entre a corrente elétrica e a tensão aplicada ao laser. Essa curva permite identificar a tensão limiar do dispositivo, ou seja, o valor de tensão a partir do qual o laser passa a emitir luz coerente, indicando o início do regime de emissão estimulada – um fenômeno característico de dispositivos semicondutores optoeletrônicos (ver Apêndice B.5).

O experimento consistiu na utilização de uma rede de difração para observar os máximos de interferência da luz laser, fenômeno explicado pelo modelo ondulatório da luz.

Figura 32 – Curva característica da tensão versus corrente do laser



Fonte: Próprio autor.

Ao incidir sobre a rede, o feixe é difratado e, conforme a equação de difração (Eq. 5.1), forma padrões de interferência. A partir do comprimento de onda da luz, e considerando a energia associada a cada fóton $E = hf$, é possível estimar a constante de Planck por meio da relação:

$$h = \frac{e \cdot U_0 \cdot d \cdot \sin(\theta)}{m \cdot c}. \quad (5.5)$$

A Tabela 8 apresenta os parâmetros físicos utilizados no experimento com a rede de difração laboratorial.

A Tabela 7 apresenta os dados de medição angular para os máximos principais da difração, tanto com a rede laboratorial quanto com o CD.

Com os dados da rede laboratorial e aplicando a equação da constante de Planck (Eq. 5.5), obtemos:

$$h = \frac{(1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1,97 \text{ V}) \cdot (1 \times 10^{-6} \text{ m}) \cdot 0,651}{1 \cdot (3,0 \times 10^8 \text{ m/s})} \quad (5.6)$$

Este valor está próximo do valor teórico da constante de Planck, $h_{\text{teórico}} = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,

Tabela 6 – Parâmetros utilizados no experimento com a rede de difração laboratorial

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Carga do elétron	e	$1,602 \times 10^{-19}$	C
Tensão limiar do laser	U_0	1.97	V
Passo da rede	d	10^{-6}	m
Seno do ângulo (1.º máximo)	$\sin \theta$	0.651	—
Ordem de difração	m	1	—
Velocidade da luz	c	$3,0 \times 10^8$	m/s

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Ângulos de difração para o primeiro máximo em cada rede.

Rede de difração	L (cm)	y (cm)	θ [°]	$\sin \theta$
Laboratorial (1 lin mm^{-1})	7,0	6,0	40,6	0,651
Caseira (CD)	7,0	5,5	38,2	0,618

Fonte: Próprio autor.

com um erro relativo calculado por:

$$\varepsilon_{rel} = \frac{|h_{experimental} - h_{terico}|}{h_{terico}} \approx \frac{|6,85 - 6,626| \times 10^{-34}}{6,626 \times 10^{-34}} \approx 3,4\% \quad (5.7)$$

Esse resultado é bastante satisfatório, especialmente se considerarmos as limitações do arranjo experimental — como a baixa resolução angular, o controle limitado da tensão limiar e a sensibilidade do sensor do Arduino. Além disso, o valor obtido corrobora os achados apresentados por (OLIVEIRA et al., 2020), cujo experimento serviu de base para a concepção desta proposta, reforçando a validade do procedimento adotado e a confiabilidade dos resultados obtidos mesmo em um contexto de recursos limitados.

A Figura 33 mostra o momento da medição utilizando a rede de difração laboratorial.

Também foram obtidos resultados com a rede de difração caseira, feita a partir de um CD, conforme os dados da Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados no experimento com a rede de difração Feita com CD

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Carga do elétron	e	1.602×10^{-19}	C
Tensão limiar do laser	U_0	1,94	V
Passo da rede	d	10^{-6}	m
Seno do ângulo (1.º máximo)	$\sin \theta$	0.618	—
Ordem de difração	m	1	—
Velocidade da luz	c	3.0×10^8	m/s

Fonte: Autoria própria

Figura 33 – Medição com a rede de difração laboratorial



Fonte: Autoria própria

Substituindo os valores na equação, temos:

$$h = \frac{(1,602 \times 10^{-19})(1,94)(1,0 \times 10^{-6})(0,618)}{(1)(3,0 \times 10^8)} \approx 6,40 \times 10^{-34} J \cdot s. \quad (5.8)$$

Com isso, o erro relativo foi:

$$\varepsilon_{rel} = \frac{6,40 \times 10^{-34} - 6,62607015 \times 10^{-34}}{6,62607015 \times 10^{-34}} \times 100\% \approx -3,4\%. \quad (5.9)$$

Os resultados mostram que mesmo com materiais alternativos como um CD é possível obter aproximações surpreendentemente precisas da constante de Planck. A rede laboratorial apresentou um desvio positivo de aproximadamente +3,4%, enquanto a rede caseira revelou um desvio negativo de cerca de -3,4%, evidenciando a ausência de um viés sistemático dominante. Os principais fatores de incerteza parecem estar distribuídos entre o alinhamento angular, a medição da tensão de limiar e o espaçamento real da rede difrativa.

Além do rigor científico, o experimento teve forte valor pedagógico. O uso de um CD como rede de difração evidencia que a Física Moderna pode ser acessível e concreta, desmistificando a ideia de que ela depende exclusivamente de aparatos caros e laboratoriais. O processo de desmontar o CD, montar o aparato e realizar as medições coloca os estudantes em contato direto com o método científico, dentro da perspectiva da aprendizagem construcionista proposta por Seymour Papert. Assim, os alunos constroem o conhecimento de maneira ativa e reflexiva, compreendendo conceitos como quantização

da energia, dualidade onda-partícula e difração por meio de suas próprias investigações experimentais.

Análise do Roteiro de Autoavaliação e Coavaliação dos Alunos

A análise do **roteiro de autoavaliação e coavaliação dos alunos** aplicados ao longo do projeto experimental revelou percepções valiosas sobre o desempenho dos estudantes, tanto em nível individual quanto coletivo. Esses dados oferecem uma visão abrangente do envolvimento dos alunos com as atividades práticas, bem como da percepção que desenvolveram sobre a dinâmica e o comportamento dos grupos.

Os resultados da **autoavaliação individual (Apendice D)** indicam um comprometimento significativo com as atividades propostas. Itens como participação ativa (Afirmção 1), colaboração com colegas (Afirmção 2) e compreensão dos conceitos de Física (Afirmção 3) receberam médias altas, evidenciando que os estudantes se sentiram motivados e demonstraram uma boa apropriação dos conteúdos. A Figura 34 ilustra graficamente esses resultados, permitindo visualizar de forma clara o desempenho médio em cada item avaliado.

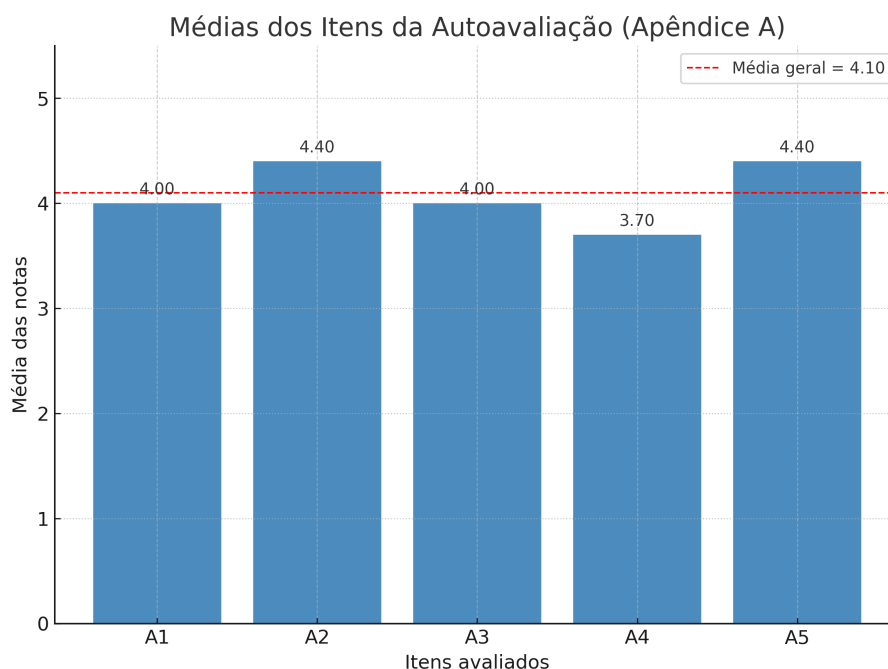
Tabela 9 – Média das notas atribuídas na autoavaliação

Item	Descrição	Média
A1	Participação ativa nas etapas do experimento	4,0
A2	Colaboração com os colegas	4,4
A3	Compreensão dos conceitos físicos	4,0
A4	Autonomia na resolução de problemas	3,7
A5	Motivação durante as atividades	4,4

Por outro lado, o item referente à **autonomia na resolução de problemas** (Afirmção 4) obteve uma média inferior às demais (3,7). Esse resultado pode ser interpretado como reflexo da dificuldade encontrada pelos estudantes durante a etapa de cálculo da constante de Planck. Apesar da boa compreensão conceitual dos fenômenos envolvidos — como a quantização da energia e a radiação de corpo negro —, muitos alunos apresentaram dificuldades em aplicar esses conhecimentos de forma independente, especialmente ao utilizar a equação (5.5). Houve necessidade frequente de orientação para reorganizar a equação, substituir corretamente os valores experimentais e manter a coerência das unidades, o que indica uma limitação no desenvolvimento do raciocínio matemático autônomo. Esse aspecto reforça a importância de estratégias pedagógicas que estimulem a independência intelectual dos alunos em contextos investigativos.

Em contrapartida, o item relacionado à **motivação durante as atividades** (Afirmção 5) foi altamente pontuado, com média 4,4, indicando que a abordagem prática despertou interesse e engajamento dos alunos. Essa motivação é coerente com os princípios do **construcionismo de Seymour Papert**, que defende a aprendizagem ativa por meio da

Figura 34 – Avaliação sobre a abordagem do conceito de difração



Fonte: Autoria própria.

construção de objetos significativos. O uso de experimentos e a integração com tecnologias acessíveis, como o Arduino, proporcionaram um ambiente favorável à exploração criativa e ao envolvimento cognitivo dos estudantes.

A **coavaliação de desempenho do grupos (Apêndice E)** (Tabela 10) também apresentou resultados positivos, com médias próximas ou superiores a 4,2. Os estudantes avaliaram bem o trabalho colaborativo (C1), a participação equilibrada (C2) e a comunicação entre os membros do grupo (C4), refletindo a construção de um ambiente de cooperação e escuta mútua — valores centrais para o sucesso de metodologias ativas. O critério "criatividade para superar desafios" (C3), embora bem avaliado, apresentou média ligeiramente inferior, sugerindo que, em alguns momentos, a resolução de problemas exigiu mais esforço adaptativo do grupo.

Tabela 10 – Média das notas atribuídas na coavaliação

Item	Descrição	Média
C1	Trabalho colaborativo e respeito mútuo	4,3
C2	Participação equilibrada nas tarefas	4,2
C3	Criatividade para superar desafios	4,2
C4	Comunicação e escuta entre os membros do grupo	4,4

Fonte: Autoria própria.

A análise das reflexões individuais sobre a aprendizagem aponta que os estudantes demonstraram uma boa compreensão dos conceitos centrais, como **quantização da**

energia, radiação de corpo negro e relação entre temperatura e energia. Essas respostas reforçam a eficácia da abordagem construcionista ao promover o entendimento de ideias complexas por meio da construção ativa de conhecimento.

Na avaliação final da apresentação do experimento (Tabela 11), com base na rubrica do Apêndice C, os alunos demonstraram desempenho satisfatório em todos os critérios. Houve destaque para a correta aplicação dos conceitos de Física e a clareza conceitual nas explicações. Os estudantes explicaram com precisão os objetivos do experimento, o papel do laser, da rede de difração e o encadeamento lógico da montagem. No entanto, observou-se uma limitação relacionada à comunicação algébrica, especialmente na manipulação das equações que envolviam a constante de Planck.

5.3.4 Aula 7 Reflexão, discussão e apresentação de resultados

A sétima aula representou o momento de síntese e reflexão do Roteiro de aprendizagem ativa, fundamental para consolidar os conhecimentos construídos pelos estudantes sobre a constante de Planck por meio dos experimentos realizados. Nesta etapa, os alunos organizaram e apresentaram, em grupos, os resultados obtidos tanto com a rede de difração caseira, montada com materiais acessíveis, quanto com a rede comercial integrada ao sistema Arduino para coleta automatizada de dados.

A apresentação dos resultados foi um espaço para que os estudantes discutissem não apenas os valores experimentais, mas também os procedimentos adotados, as dificuldades enfrentadas e as estratégias utilizadas para superá-las. Essa troca permitiu analisar criticamente os aspectos técnicos, como a precisão das medições dos ângulos de difração, a estabilidade do laser e o desempenho dos sensores LDR, promovendo uma compreensão prática da influência dos instrumentos e métodos no cálculo da constante de Planck.

Como parte da abordagem construcionista que fundamenta o trabalho, foi incorporada a aplicação dos instrumentos de autoavaliação e coavaliação descritos nos Apêndices D e E. Esses instrumentos incentivaram os estudantes a refletir sobre sua participação individual e a colaboração em grupo, avaliando aspectos como a compreensão dos conceitos de física, o engajamento nas atividades experimentais, a comunicação entre os pares e a capacidade de resolver problemas durante o processo.

Além disso, o questionário pós-teste, apresentado no Apêndice G, mostrou-se um recurso valioso para aferir o aprendizado dos alunos, especialmente no que tange à compreensão dos conceitos fundamentais da constante de Planck, da relação entre energia e frequência da radiação, e da percepção do papel da tecnologia Arduino no experimento. Recomenda-se que esse questionário seja aplicado ao final da Aula 7, quando os alunos já tiveram oportunidade de consolidar os conhecimentos por meio da experimentação, análise e discussão coletiva.

Durante a reflexão final (Apendice I), foram abordadas as possíveis fontes de erro que afetaram a precisão dos resultados, incluindo limitações instrumentais e dificuldades na manipulação dos materiais, além das variações inerentes aos dois métodos experimentais utilizados. A discussão estimulou a valorização do pensamento crítico e da postura científica diante das limitações experimentais, reforçando a importância da metodologia ativa e da experimentação prática para a aprendizagem de conceitos abstratos da física moderna.

Outro ponto enfatizado foi a relevância do uso de tecnologias como o Arduino para democratizar o acesso a experimentos mais sofisticados, aproximando os alunos da prática científica contemporânea e despertando interesse pelo campo da Física e da tecnologia.

Por fim, a Aula 7 consolidou o processo de aprendizagem ao fomentar um ambiente de diálogo e troca, no qual os alunos desenvolveram habilidades essenciais para a comunicação científica, a argumentação fundamentada e o trabalho colaborativo, elementos indispensáveis para sua formação acadêmica e cidadã.

Tabela 11 – Avaliação conceitual da apresentação final do experimento

Item	Critério Avaliado	Conceito
1	Clareza na explicação dos objetivos do experimento	CP
2	Correta aplicação dos conceitos de Física	CT
3	Qualidade da análise dos dados e discussão dos resultados	CP
4	Capacidade de argumentação e resposta às perguntas	CT
5	Criatividade na apresentação e na montagem experimental	CT
6	Reflexão crítica sobre o processo de aprendizagem	CT
7	Cooperação, organização e divisão de tarefas no grupo	CT

Legenda: DT – Discordo totalmente DP – Discordo parcialmente N – Neutro
 CP – Concordo parcialmente CT – Concordo totalmente

Fonte: Autoria própria.

Em relação à **clareza na explicação dos objetivos do experimento** (conceito CP), percebeu-se que os estudantes conseguiram identificar com segurança cada etapa envolvida na proposta experimental. Demonstraram domínio da montagem, do papel do laser e da função da rede de difração, além de compreenderem o encadeamento lógico da atividade. Entretanto, um ponto de dificuldade foi notado na **comunicação algébrica**: houve participantes que apresentaram limitações ao interpretar e manipular expressões matemáticas associadas à dedução da constante de Planck, o que afetou parcialmente a clareza geral das explanações.

A **correta aplicação dos conceitos de Física** (conceito CT) foi um ponto de destaque. Os alunos foram capazes de definir com propriedade o conceito de quantização, relacionar frequência com energia e compreender o papel da radiação de corpo negro dentro do modelo da quantização. Essa apropriação conceitual demonstra que a abordagem experimental teve papel relevante na consolidação de saberes tradicionalmente considerados

abstratos no ensino médio.

Quanto à **qualidade da análise dos dados e discussão dos resultados** (conceito **CP**), observou-se que os estudantes compreenderam o significado físico da tensão limiar do laser e sua importância para o cálculo da constante de Planck. Além disso, souberam explicar o uso do experimento de difração para determinação da angulação do feixe, justificando com clareza a inserção desses dados na equação utilizada. Essa conexão entre teoria, experimento e análise numérica foi um dos pontos altos da avaliação.

A **capacidade de argumentação e resposta às perguntas** (conceito **CP**) indicou que os alunos conseguiram dialogar de forma coerente sobre os conceitos abordados. Entretanto, foi notado que, embora dominem os fundamentos da experiência realizada, ainda demonstram dificuldade em extrapolar esse conhecimento para fenômenos mais abstratos e não diretamente trabalhados, como o efeito fotoelétrico. Tal limitação é compreensível, considerando o nível de escolaridade dos estudantes e a complexidade desses tópicos.

Nos demais critérios — **criatividade na apresentação e montagem experimental, reflexão crítica sobre o processo de aprendizagem e cooperação e organização do grupo** (todos avaliados com o conceito **CT**) — o desempenho foi uniforme e altamente positivo. Os alunos demonstraram envolvimento, iniciativa e criatividade na forma como organizaram a exposição dos resultados. Refletiram de forma crítica sobre o percurso realizado, reconhecendo suas limitações e valorizando o próprio processo de construção do conhecimento.

Em síntese, os dados revelam que a metodologia adotada favoreceu o envolvimento dos alunos e promoveu avanços importantes na compreensão dos conceitos físicos. Ainda que desafios persistam — especialmente no que diz respeito à autonomia matemática —, os resultados confirmam o potencial do construcionismo como abordagem didática eficaz para o ensino de conteúdos complexos como os da Física Moderna no Ensino Médio.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta desenvolvida nesta dissertação cumpriu com o seu objetivo central que foi proporcionar aos estudantes do ensino médio uma compreensão mais profunda da constante de Planck por meio da construção e aplicação de dois experimentos didáticos — um de baixo custo e outro automatizado com Arduino — integrando teoria e prática de forma significativa. Essa abordagem buscou avaliar e comparar a eficácia de diferentes arranjos experimentais, promovendo um ambiente de aprendizagem pautado nos pressupostos da teoria construcionista, no qual os alunos atuaram ativamente na formulação de hipóteses, execução das medições e análise dos resultados.

A análise dos dados obtidos durante a Aula 6 demonstrou que os procedimentos experimentais propostos foram eficazes para estimar a constante de Planck com resultados próximos ao valor teórico, mesmo diante das limitações instrumentais e metodológicas. Tanto a rede de difração laboratorial quanto a rede improvisada forneceram resultados com desvios relativos simétricos, em torno de $\pm 3,4\%$, o que evidencia a viabilidade pedagógica do experimento mesmo com recursos de baixo custo. Isso reforça a ideia de que é possível explorar conceitos sofisticados da Física Moderna de forma acessível e prática, democratizando o conhecimento científico.

Durante a Aula 7, o momento de apresentação e reflexão consolidou os objetivos construcionistas da proposta. A participação ativa dos alunos na organização, análise e socialização dos dados foi fundamental para o desenvolvimento de competências como o pensamento crítico, a autonomia intelectual e o trabalho colaborativo. A incorporação de instrumentos de autoavaliação e coavaliação contribuiu para o desenvolvimento da metacognição, permitindo que os estudantes refletissem sobre seus próprios processos de aprendizagem, dificuldades enfrentadas e estratégias de superação.

Pode-se afirmar que a abordagem construcionista adotada no ensino da constante de Planck revelou-se consistente tanto no aspecto conceitual quanto no metodológico. Os achados evidenciam o caráter inovador da experimentação acessível, apoiada em tecnologias digitais, integrada a uma prática pedagógica que valoriza o protagonismo do estudante na elaboração do conhecimento. Dessa maneira, sugere-se que propostas dessa natureza sejam ampliadas e adaptadas a outros temas da Física Moderna e Contemporânea, fortalecendo a renovação do ensino de Ciências na Educação Básica.

REFERÊNCIAS

- ADMIRAL, T. Lei do resfriamento de newton:: experimento com arduino em aula remota. *ScientiaTec*, v. 9, n. 1, 2022.
- BARBOSA, L. F.; COSTA, B. G. da; LIMA, D. B. de A. Ensino de movimento harmônico simples e tecnologias de inovação: uma prática educacional usando arduino. *Jornada de Iniciação Científica e Extensão*, v. 17, n. 1, 2023.
- BEYNON, M. Mindstorms revisited: Making new construals of seymour papert's legacy. In: SPRINGER. *Educational Robotics in the Makers Era 1*. [S.l.], 2017. p. 3–19.
- CARUSO, F.; OGURI, V. *Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos*. 2. ed. Brasil: LTC, 2016. 616 p. ISBN 9788521630944.
- COSTA, R. B. Trabalho de Conclusão de Curso, *Monitor de Corrente Alternada Utilizando Arduino*. 2019.
- Educação. *Base Nacional Comum Curricular (BNCC): Competência Geral 5*. Brasília, 2017. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/>
- EISBERG, R.; RESNICK, R. Física quântica, ed. *Campus, Rio de Janeiro*, 1979.
- GLAISER, M. A dança do universo. 2ª. *São Paulo: Companhia das Letras*, 1997.
- KE, X. Communication lasers and their modulation technology. In: *Handbook of Optical Wireless Communication*. Springer, 2024. p. 85–128. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1522-0_4.
- KITTEL, C. *Introdução À Física Do Estado Sólido*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- KITTEL, C. *Introduction to Solid State Physics*. 8. ed. New York: Wiley, 2005.
- LEITE, D. L. F. *Desenvolvimento de uma proposta pedagógica para o ensino da cinemática através da robótica educacional*. 148 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021. Programa de Pós-Graduação em Rede - Ensino de Física em Rede Nacional/CCET.
- MARTINAZZO, C. A. et al. Arduino: Uma tecnologia no ensino de física. *Revista Perspectiva*, v. 38, n. 143, 2014.
- Ministério do Desporto. *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio*. Brasília: Ministério da Educação e do Desporto, 1999.
- MOREIRA, M. A. Uma análise crítica do ensino de física. *Estudos avançados*, SciELO Brasil, v. 32, p. 73–80, 2018.
- MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 43, p. e20200451, 2021.
- NEVES, M. C. D. A história da ciência no ensino de física. *Ciência & Educação (Bauru)*, SciELO Brasil, v. 5, p. 73–81, 1998.

OLIVEIRA, I. N. et al. Construção de uma maquete experimental automatizada para a determinação da constante de planck com o auxílio da plataforma arduino. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 37, n. 2, p. 828–848, 2020.

OLIVEIRA, J. C. G. Introdução à mecânica quântica no ensino médio através de uma discussão sobre a constante de planck. Universidade Federal de São Carlos, 2023.

PAIS, A. *Subtle is the lord: The science and the life of albert einstein*. Oxford University Press, 2005.

PAPERT, S. The gears of my childhood. In: *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*. New York: Basic Books, 1980. p. xv–xx. Disponível em: <https://dailypapert.com/the-gears-of-my-childhood/>.

PAPERT, S. Personal computing and its impact on education. *The computer in the school: Tutor, tool, tutee*, Teachers College Press, p. 197–202, 1980.

PAPERT, S. A. *Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas*. [S.l.]: Basic books, 2020.

RESNICK, M. *Lifelong Kindergarten: Cultivating Creativity through Projects, Passion, Peers, and Play*. Cambridge, MA: MIT Press, 2017.

SANTOS, E. S. dos; JR., R. d. S. M.; SANTANA, V. M. da S. Determinação experimental da constante de planck pela observação da corrente de descarga de um capacitor. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 32, n. 3, p. 824–836, jun. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2015v32n3p824>.

SANTOS, G. D. N. D. Construção e caracterização de redes de difração confeccionada com “compact disk”. 2014.

SOUZA, J. C. de. *Aprendizagem ativa em aulas de física: o uso do Arduino em experimentos de termodinâmica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/32632>.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física Moderna*. [S.l.]: LTC, 2014.

TUTORIALS, R. N. *DHT11 vs DHT22 vs LM35 vs DS18B20 vs BME280 vs BMP180*. 2024. Acesso em: 13 fev. 2025. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/dht11-vs-dht22-vs-lm35-vs-ds18b20-vs-bme280-vs-bmp180/>.

VALENTE, J. A. *O computador na sociedade do conhecimento*. Campinas, SP: UNICAMP/NIED, 1999. 156 p.

APÊNDICES

A BANCO ÓPTICO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO

A.1 INTRODUÇÃO

A construção de uma rede de difração utilizando materiais de baixo custo, como um CD, é uma alternativa acessível para o estudo de fenômenos de difração e interferência da luz (SANTOS, 2014). Este experimento visa comparar os resultados obtidos com uma rede de difração comercial de laboratório e aqueles obtidos com a rede caseira, avaliando sua eficácia e precisão em relação aos padrões laboratoriais.

A seguir, são apresentados os materiais utilizados, os passos para a construção da rede de difração caseira e a montagem do banco óptico linear, permitindo a realização do experimento.

A.2 CONSTRUÇÃO DE REDE DE DIFRAÇÃO DE BAIXO CUSTO

A.2.1 Materiais necessários

- CD gravável (preferencialmente sem gravação para facilitar a remoção da camada refletora);
- Latinha de alumínio (de refrigerante ou similares);
- Fita adesiva;
- Estilete;
- Régua e marcador.

A.2.2 Preparo do CD

- Utilizar a fita adesiva para remover o revestimento do CD até que a superfície fique completamente transparente.
- Cortar um retângulo de aproximadamente 3 cm x 2 cm no CD, garantindo que o corte seja realizado na direção radial, onde a distribuição das ranhuras do CD favorece a difração da luz.

A.2.3 Preparo da estrutura de suporte

- Inserir o pedaço de CD na abertura , fixando-o firmemente com fita adesiva.
- Garantir que a rede de difração caseira esteja bem posicionada para permitir a passagem do feixe de luz e a formação do padrão de interferência.

A.3 CONSTRUÇÃO DO BANCO ÓPTICO LINEAR

A.3.1 Materiais necessários

- Ripa de madeira (2,5 metros de comprimento);
- Régua metálica (30 cm cada);
- Estrutura em forma de "U" para suporte da rede de difração;
- Pedaço de madeira (10 cm de altura x 5 cm de largura);
- Parafuso;
- Laser de diodo.

A.3.2 Montagem

A montagem do aparato experimental segue uma sequência de etapas essenciais para garantir a precisão na observação dos padrões de interferência da luz. A seguir, descrevemos detalhadamente o processo:

- Fixar as régua metálica na ripa de madeira para formar um barramento linear.
- Posicionar o suporte em "U" e a base de madeira para sustentar a rede de difração.
- Alinhar o laser de diodo de forma que seu feixe passe através da rede de difração e projete o padrão de interferência em um anteparo.
- Ajustar a distância entre os componentes e garantir uma escala de medição precisa para registro dos dados experimentais.

A construção deste aparato tem como objetivo principal fornecer uma estrutura estável e de fácil ajuste, permitindo a realização de medições confiáveis e reproduzíveis. A configuração do experimento pode ser observada na Figura 33, onde se destaca a disposição dos principais componentes utilizados.

A.4 CONSIDERAÇÕES

As atividades desenvolvidas demonstraram que é possível transcender limitações estruturais e recursos escassos no contexto da educação pública ao combinar metodologias

Figura 35 – Maquete artesanal com CD



Próprio autor.

Figura 36 – maquete artesanal com CD



Próprio autor.

ativas e tecnologias acessíveis para o ensino de física moderna. A implementação do Roteiro de aprendizagem ativa envolvendo a construção de bancos ópticos, o uso de Arduino para modulação e coleta de dados, bem como o emprego de redes de difração caseiras, possibilitou uma aproximação concreta dos estudantes a conceitos complexos como a constante de Planck. Essa integração entre teoria e prática, que promove o protagonismo dos alunos no processo de aprendizagem, revelou-se eficaz para fortalecer o interesse e a compreensão da física quântica em um ambiente escolar tradicionalmente desafiador.

A aplicação do construcionismo mostrou-se especialmente adequada para o cenário de baixa infraestrutura e recursos limitados da rede pública, uma vez que valoriza a experimentação, a autonomia e o “aprender fazendo”. Essa abordagem proporcionou aos estudantes oportunidades para desenvolver competências técnicas, como montagem de circuitos, soldagem e programação básica, além de habilidades cognitivas relacionadas à análise e interpretação de dados experimentais. A flexibilidade metodológica adotada permitiu contornar dificuldades logísticas e materiais, reforçando a importância de metodologias pedagógicas adaptáveis e centradas no estudante para a democratização do acesso ao conhecimento científico.

A recepção dos alunos às atividades práticas foi bastante positiva, destacando-se o envolvimento na construção do banco óptico de madeira, a manipulação das redes de difração e a programação do Arduino. Os estudantes manifestaram maior compreensão dos conceitos ao perceberem a física não como um conteúdo distante e abstrato, mas como um

campo que pode ser explorado por meio da experimentação direta e do uso da tecnologia. Essa experiência interdisciplinar favoreceu não apenas o aprendizado dos fundamentos teóricos, mas também o desenvolvimento de uma visão crítica sobre a relação entre ciência e tecnologia, ampliando seu interesse pela área.

Por outro lado, a execução do projeto enfrentou obstáculos significativos que refletem os desafios reais da rede pública. A variabilidade na frequência dos alunos exigiu um planejamento flexível para garantir a continuidade das atividades. Ademais, danos causados por outras turmas ao laboratório motivaram a construção de um novo banco óptico, evidenciando as fragilidades na manutenção dos espaços escolares. A dificuldade técnica para o alinhamento do laser com as redes de difração confeccionadas a partir de CDs levou à adoção de uma estrutura móvel para as redes, evidenciando a necessidade de soluções práticas e criativas para adaptar os experimentos às condições locais, assegurando a qualidade das medições.

Considerando os avanços e desafios observados, vislumbra-se a oportunidade de expandir a utilização da plataforma Arduino para o desenvolvimento de novos experimentos que abordem outros fenômenos quânticos, aprofundando a aprendizagem experimental e interdisciplinar. Tais iniciativas poderiam incluir investigações sobre o efeito fotoelétrico, espectroscopia de gases ou outras medições envolvendo radiações e partículas, promovendo o contínuo engajamento dos estudantes e a consolidação do pensamento científico. Dessa forma, reforça-se o potencial das metodologias ativas aliadas à tecnologia como ferramenta transformadora no ensino público de física, preparando os alunos para enfrentar as demandas acadêmicas e profissionais futuras.

B MAQUETE EXPERIMENTAL COM REDE DE DIFRAÇÃO LABORATORIAL

A maquete experimental desenvolvida neste estudo visa proporcionar um ambiente controlado e replicável para a realização de experimentos ópticos utilizando o Arduino. A integração dessa plataforma com materiais acessíveis garante a repetibilidade das condições experimentais e amplia a aplicabilidade do experimento em contextos educacionais com poucos recursos. Dessa forma, busca-se não apenas obter resultados científicos precisos, mas também democratizar o ensino de conceitos da física moderna, como a quantização de energia e a constante de Planck.

B.1 REDES DE DIFRAÇÃO: COMERCIAL VS. DE BAIXO CUSTO

As redes de difração utilizadas no experimento são de dois tipos:

- **Rede comercial:** Possui um período bem definido, garantindo medições precisas dos ângulos de difração e dos comprimentos de onda. A Figura 37 mostra uma rede difração comercial.

Figura 37 – Rede de difração produzido pela empresa AZEHEB.



Fonte: Autoria Própria

- **Rede caseira (CD):** Apesar da simplicidade e facilidade de construção, pode apresentar variações no espaçamento das ranhuras, influenciando a precisão das medições.

A comparação entre essas redes permitirá avaliar a viabilidade de alternativas de baixo custo para a realização de experimentos didáticos, sem comprometer significativamente a qualidade dos resultados.

B.2 ESTRUTURA DA MAQUETE EXPERIMENTAL

A estrutura da maquete inclui um banco óptico linear montado com materiais acessíveis, como ripas de madeira e réguas metálicas, garantindo estabilidade e alinhamento adequado do feixe de laser. O experimento conta com os seguintes componentes:

- **Banco óptico:** Feito de ripa de madeira e réguas metálicas para garantir um alinhamento linear.
- **Suporte do Laser:** Mantém o laser alinhado centralmente com a rede de difração.
- **Rede de Difração:** Comercial ou caseira, fixada de forma a dispersar o feixe de laser.
- **Anteparo com régua milimetrada:** Permite a medição das distâncias entre os máximos de difração.
- **Arduino:** Automatiza a coleta de dados e transmite as medições ao computador.
- **Computador:** Exibe os dados e auxilia na análise dos resultados.

B.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

A montagem do experimento segue os seguintes passos:

- Fixar as réguas metálicas sobre a ripa de madeira, formando um barramento linear.
- Posicionar o suporte da rede de difração de modo que o laser incida perpendicularmente.
- Alinhar o feixe de laser para atravessar a rede de difração e projetar o padrão de interferência no anteparo.
- Garantir a medição precisa das distâncias entre os máximos de difração utilizando a régua milimetrada.
- Conectar o Arduino ao computador para registrar as medições automaticamente.

B.4 PAPEL DO ARDUINO NA COLETA DE DADOS

O Arduino desempenha um papel essencial na automatização do experimento, coletando dados sobre a intensidade da luz difratada e transmitindo-os para análise em tempo real. O funcionamento do sistema pode ser descrito da seguinte forma:

- **Sensor de luz:** Mede a intensidade do feixe difratado em diferentes posições do anteparo.
- **Código Arduino:** Processa os dados e os transmite ao computador.
- **Software de análise:** Exibe os valores registrados em um gráfico, permitindo visualizar os máximos e mínimos de difração.

Essa integração proporciona aos estudantes uma interação mais dinâmica com o experimento, permitindo a visualização imediata dos fenômenos estudados.

B.5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com os dados obtidos, os estudantes podem calcular os comprimentos de onda das fontes de luz utilizadas, aplicar as equações de difração e analisar as incertezas associadas às medições. A comparação entre a rede comercial e a caseira destaca aspectos como:

- **Precisão das medições:** As redes comerciais fornecem resultados mais consistentes, enquanto as redes caseiras podem apresentar pequenas variações.
- **Viabilidade das redes caseiras:** Apesar da menor precisão, as redes de CD demonstram ser uma alternativa viável para experimentos didáticos.
- **Impacto pedagógico:** A construção e análise do experimento pelos alunos promovem o aprendizado ativo e a compreensão aprofundada dos conceitos de física moderna.

C QUESTIONÁRIO DE VERIFICAÇÃO DOS CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA

Pergunta	Entendi completamente	Entendi parcialmente	Não entendi
1. Por que a energia é emitida em valores discretos e não contínuos?			
2. Como a temperatura afeta a cor e a intensidade da luz emitida?			
3. O que são pacotes de energia (quanta)? Consegue dar um exemplo?			
4. Por que corpos quentes emitem luz visível?			
5. Consegue relacionar quantização com o cálculo da constante de Planck?			

Legenda: Entendi completamente: Resposta clara, correta e bem estruturada. Entendi parcialmente: Resposta com acertos, mas com imprecisões ou incompleta. Não entendi: Resposta incorreta, confusa ou ausência de resposta.

D QUESTIONÁRIO SOBRE COMPONENTES ELETRÔNICOS DOS CIRCUITOS

Este questionário tem o objetivo de ajudar você a refletir sobre o quanto compreendeu os conceitos básicos dos componentes eletrônicos utilizados nos circuitos durante as atividades experimentais. Para cada pergunta, avalie o seu nível de compreensão marcando a opção que melhor representa seu entendimento.

Entendimento dos conceitos de eletrônica com Arduino

Pergunta	Entendi completamente	Entendi parcialmente	Não entendi
1. Para que serve o pino GND em um circuito eletrônico?			
2. Por que o pino de tensão positiva é essencial para alimentar componentes como LEDs, sensores ou microcontroladores?			
3. O que significa uma saída PWM e onde ela pode ser usada?			

Legenda: Entendi completamente: Resposta clara, correta e bem estruturada. Entendi parcialmente: Resposta com acertos, mas com imprecisões ou incompleta. Não entendi: Resposta incorreta, confusa ou ausência de resposta.

E QUESTIONÁRIO SOBRE OS CONCEITOS DE DIFRAÇÃO

Este questionário tem o objetivo de ajudar você a refletir sobre o quanto compreendeu os conceitos fundamentais relacionados ao fenômeno da difração da luz, explorados durante as atividades experimentais. Para cada pergunta, avalie o seu nível de compreensão marcando a opção que melhor representa seu entendimento.

Pergunta	Entendi completamente	Entendi parcialmente	Não entendi
1. O que é um padrão de difração e como ele é formado com luz?			
2. Como o espaçamento da rede de difração influencia a posição das franjas no padrão?			
3. Como é possível determinar o comprimento de onda (λ) da luz a partir do experimento de difração?			

Legenda: Entendi completamente: Resposta clara, correta e bem estruturada. Entendi parcialmente: Resposta com acertos, mas com imprecisões ou incompleta. Não entendi: Resposta incorreta, confusa ou ausência de resposta.

F AUTOAVALIAÇÃO INDIVIDUAL

Para cada uma das afirmações apresentadas, marque com um "X" a opção que melhor representa o seu grau de concordância, utilizando a seguinte escala:

Número Significado

- | | |
|---|----------------------------|
| 1 | Discordo totalmente |
| 2 | Discordo parcialmente |
| 3 | Nem concordo, nem discordo |
| 4 | Concordo parcialmente |
| 5 | Concordo totalmente |

AFIRMAÇÕES	1	2	3	4	5
1. Participei ativamente de todas as etapas dos experimentos.					
2. Contribuí com ideias, sugestões e ajudei meus colegas.					
3. Compreendi os conceitos de Física envolvidos nos experimentos.					
4. Demonstrei autonomia para resolver problemas durante as atividades.					
5. Senti-me motivado(a) ao participar das atividades experimentais.					

Reflexão final:

O que aprendi de mais importante nesta atividade foi:

G COAVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO GRUPO

Esta **coavaliação** tem como objetivo refletir sobre a atuação do seu grupo durante as atividades experimentais. Leia com atenção cada afirmação e assinale com um "X" o grau de concordância que melhor representa a realidade do seu grupo.

Número Significado

- 1 Discordo totalmente
- 2 Discordo parcialmente
- 3 Nem concordo, nem discordo
- 4 Concordo parcialmente
- 5 Concordo totalmente

AFIRMAÇÕES	1	2	3	4	5
Meu grupo trabalhou de forma colaborativa e respeitosa (O grupo soube dividir as tarefas, ajudar uns aos outros e manter o respeito nas interações)					
Todos os integrantes participaram das tarefas de maneira equilibrada (Ninguém ficou sobrecarregado e todos tiveram a oportunidade de contribuir ativamente)					
O grupo conseguiu superar os desafios enfrentados de forma criativa (Quando surgiram dificuldades, o grupo buscou soluções novas, discutiu estratégias e persistiu na realização das atividades)					
Houve boa comunicação e escuta entre os membros do grupo (Os integrantes souberam ouvir as opiniões uns dos outros, respeitaram as ideias diferentes e mantiveram um diálogo aberto e construtivo)					

Reflexão Final:

Descreva os aspectos positivos que destacaram o seu grupo, como trabalho em equipe, criatividade, organização, entre outros.

H MODELO DE DIÁRIO DE BORDO / PORTIFÓLIO DO GRUPO

Objetivo: Registrar o processo de construção do conhecimento e promover autorreflexão contínua, de acordo com a abordagem construcionista.

Grupo: _____

Data: _____

- **Objetivo da aula:**

- **Resumo das atividades realizadas:**

- **Principais dificuldades encontradas:**

- **Como resolvemos os problemas:**

- **Aprendizados significativos do dia:**

- **Ideias para as próximas etapas / sugestões de melhoria:**

- **Impressões pessoais (curiosidades, sentimentos, destaques):**

I QUESTIONÁRIO PÓS-TESTE

Objetivo: Avaliar o que os alunos aprenderam com o auxílio do **roteiro de aprendizagem ativa** sobre a constante de Planck, bem como suas percepções sobre a metodologia utilizada.

1. **O que é a constante de Planck e qual é sua importância na Física Quântica?**

2. **O que você compreendeu sobre a relação entre energia e frequência de uma radiação eletromagnética?**

- ☐ Quanto maior a energia, menor a frequência
- ☐ Quanto maior a frequência, maior a energia
- ☐ Energia e frequência são grandezas independentes
- ☐ Não sei responder

3. **Aponte abaixo o uso correto da equação $E = h\nu$:**

- ☐ Calcular a velocidade da luz
- ☐ Relacionar a energia de um fóton com sua frequência
- ☐ Medir a massa de uma partícula
- ☐ Não sei

4. **Durante os experimentos, você conseguiu compreender como a constante de Planck foi determinada?**

- ☐ Sim, completamente
- ☐ Parcialmente
- ☐ Não entendi
- ☐ Não participei dos experimentos

5. **Em relação ao uso do Arduino nos experimentos, como você avalia sua contribuição para a atividade?**

- ☐ Tornou a atividade mais compreensível e interessante
- ☐ Ajudou, mas foi difícil de entender no início
- ☐ Não fez diferença para meu aprendizado
- ☐ Foi confuso e dificultou minha compreensão

6. **Você acredita que aprendeu mais com esta atividade prática do que aprenderia apenas com aulas teóricas?**

- ☐ Sim, com certeza
- ☐ Em parte
- ☐ Não, prefiro aulas teóricas
- ☐ Não tenho opinião formada

7. O que foi mais desafiador para você durante os experimentos?

8. Em uma escala de 1 a 5, como você avalia seu nível de aprendizado alcançado com este Roteiro de aprendizagem ativa?

- ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5

9. Qual foi a parte mais interessante da atividade para você?

10. Você gostaria de participar de outras atividades experimentais como esta no futuro?

- ☐ Sim ☐ Talvez ☐ Não

J AVALIAÇÃO DA APRESENTAÇÃO FINAL DO EXPERIMENTO

Objetivo: Avaliar o desempenho dos grupos na apresentação final do experimento com base em critérios pedagógicos e científicos.

CRITÉRIO	1 (DT)	2 (DP)	3 (N)	4 (CP)	5 (CT)
Clareza na explicação dos objetivos do experimento					
Correta aplicação dos conceitos de Física					
Qualidade da análise dos dados e discussão dos resultados					
Capacidade de argumentação e resposta às perguntas					
Criatividade na apresentação e na montagem experimental					
Reflexão crítica sobre o processo de aprendizagem					
Cooperação, organização e divisão de tarefas no grupo					

Legenda: DT – Discordo totalmente | DP – Discordo parcialmente | N – Neutro
| CP – Concordo parcialmente | CT – Concordo totalmente.

Comentários do avaliador:

K CÓDIGO

```
    char Letra[]={'A','B';
int opcao,i,j, linhas, colunas=0, Npontos=50;
float valorA0;
float valorA1;
float VOLT;
float CORR;
float DV;
float ResSerieLaser=63;// valor de resistencia com Laser
define LED 13
define PWMPin 6
include <Keyboard.h>
void setup()

Serial.begin(9600);
Serial.println("CLEARDATA");
Serial.println("LABEL,Corrente(mA),Tensao(V)");
pinMode(LED, OUTPUT);
pinMode(PWMPin, OUTPUT);
analogReference(DEFAULT);
analogWrite(PWMPin, 0); //Seta tensão inicial em 0 Volts

void loop()

    //O usuário escolhe a opção no Excel
    if (Serial.available() > 0)
    int temp = Serial.read();
    if (temp == 'A' || temp == 'B')
    opcao = temp;

    switch (opcao)

    case 'A':
```

```

linhas = 1;
Serial.println("RESETROW");
digitalWrite(LED, HIGH); //Liga o Led indicativo do Arduino
for (int i = 5; i <= 245; i = i + 3)

analogWrite(PWMPin, i); //Definição da taxa do PWM
delay(100); //Tempo de estabilização do sinal
// Faz uma média de Npontos do sinal capturado
valorA0 = 0;
for (j = 0; j < Npontos; j++)

delay(2);
valorA0 = valorA0 + analogRead(0); //Leitura da porta A0 do arduino

valorA0 = valorA0 / Npontos; // Valor médio de Npontos medidos (FILTRO)
// Faz uma média de Npontos do sinal capturado (Filtro)
valorA1 = 0;
for (j = 0; j < Npontos; j++)

delay(2);
valorA1 = valorA1 + analogRead(1); //Leitura da porta A1 do arduino

valorA1 = valorA1 / Npontos; // Valor médio de Npontos medidos (FILTRO)
DV = (valorA0 - valorA1); // Tensão sobre o LASER em bits
CORR = (5000 * valorA1 / 1023) / ResSerieLaser; //Corrente LASER em Ampere
VOLT = (5.0 * DV / 1023); //Tensão no LASER em Volts
linhas = linhas + 1; //Incrementa o contador de colunas do Excel
// Transfere a informação de tensão do Arduino para o Excel
Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print (Letra [colunas]);
Serial.print (linhas);
Serial.print(",");
Serial.println (VOLT, 4); //4 casas decimais
// Transfere a informação de corrente do Arduino para o Excel
Serial.print("CELL,SET,");
Serial.print (Letra [colunas + 1]);
Serial.print (linhas);
Serial.print(",");
Serial.println (CORR, 5); //5 casas decimais

```

```
delay(50);
```

```
digitalWrite(LED, LOW); //Apaga o LED indicativo do Arduino
```

```
opcao = 100; // Cria um valor de opção inválido
```

```
break;
```

```
case 'B':
```

```
Serial.println("RESETROW");
```

```
digitalWrite(LED, HIGH);
```

```
for (int i= 0; i< 55; i++)
```

```
Serial.print("DATA,");
```

```
Serial.print(0);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.println(0);
```

```
delay(50);
```

```
linhas = 1; //Contador de linhas
```

```
colunas = 0; //Contador de colunas
```

```
Serial.println("RESETROW");
```

```
digitalWrite(LED, LOW); //Apaga o LED indicativo do Arduino
```

```
opcao = 100; // Cria um valor de opção inválido
```

```
break;
```

```
default:
```

```
delay(1);
```

L PRODUTO EDUCACIONAL



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA EM REDE NACIONAL
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

GABRIEL SERRÃO PENHA

**ROTEIRO DE APRENDIZAGEM ATIVA PARA A INVESTIGAÇÃO DA
CONSTANTE DE PLANCK: uma proposta para o ensino de física experimental**

São Luís – MA

2025

APRESENTAÇÃO

Prezado(a) professor(a),

Este recurso educacional integra a proposta desenvolvida na dissertação “Investigando a Constante de Planck por Meio de uma Abordagem Experimental: uma proposta construcionista para o ensino de Física” e consiste em um **roteiro de aprendizagem ativa voltado ao ensino de conceitos da Física Moderna**, com ênfase na constante de Planck.

O material foi elaborado para ser aplicado com estudantes do terceiro ano do ensino médio ou em disciplinas eletivas e propõe um material didático baseado na experimentação, na resolução de problemas e no uso de tecnologias acessíveis. A proposta articula teoria e prática a partir da construção e implementação de dois experimentos: o primeiro com **materiais de baixo custo**, e o segundo com uso de **robótica educacional com Arduino**, permitindo abordagens em diferentes níveis de complexidade tecnológica.

Inspirado nas abordagens **construtivista de Jean Piaget** e **construcionista de Seymour Papert**, o roteiro promove a **aprendizagem ativa** por meio da investigação, do planejamento e da execução de experimentos, da análise de dados e da construção coletiva do conhecimento. Os estudantes são incentivados a formular hipóteses, coletar e interpretar dados com base na **lei de Stefan-Boltzmann**, estimando a constante de Planck a partir da análise da radiação emitida por lâmpadas incandescentes em diferentes temperaturas.

Este material propicia uma abordagem contextualizada e dinâmica, demonstrando como o uso de metodologias ativas aliadas a tecnologias educacionais pode favorecer o engajamento e a compreensão de conceitos abstratos da Física Moderna, promovendo uma aprendizagem mais significativa e integrada à realidade dos estudantes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Intensidade luminosa no ponto P gerado pela interferência construtiva de duas frentes de ondas em fase.....	9
Figura 2 – Sensor de tempera LM35.....	14
Figura 3 – Sensor de temperatura BME280.....	14
Figura 4 – Filtro Resistor Capacitor.....	19
Figura 5 – Diagrama do circuito eletrônico para análise da curva característica de um laser semiconductor controlado via Arduino	20
Figura 6 – Circuito RC com laser modulado	29
Figura 7 – Modulo Arduino Uno	29
Figura 8 – Banco óptico pronto	30
Figura 9 – Elaboração do banco óptico	30
Figura 10 – Rede de difração laboratorial da marca Azeheb.....	31

SUMÁRIO

1	Introdução.....	4
2	As origens da física quântica e seus desafios iniciais	6
2.1	Breve revisão da formulação de Planck para a radiação do corpo negro	6
2.2	Aspectos teóricos da quantização da energia na reformulação de Planck.....	6
2.3	Formulação da Lei de Planck.....	6
2.4	A natureza ondulatória da luz e suas implicações na Física Quântica.....	8
2.5	Difração da luz e sua conexão com a determinação da constante de Planck	8
2.6	Difração e a medição da constante de Planck	9
3	Ensino por meio da robótica	11
3.1	Arduino: uma ferramenta versátil para o ensino de física moderna	12
3.2	Principais componentes e recursos	12
3.3	Código do Arduino	20
4	Metodologia.....	24
5	Planejamento e desenvolvimento do roteiro de aprendizagem ativa	26
5.1	Estruturação metodológica.....	26
5.2	Instrumentos pedagógicos e avaliativos	26
5.3	Planejamento científico	27
5.4	Abordagem pedagógica.....	27
5.5	Planejamento das aulas.....	28
	Referências	35
	Apêndice A: Questionários Diagnósticos	38
	Apêndice C – Modelo de Diário de Bordo / Portfólio do Grupo.....	43
	Apêndice D – Questionário Pós-Teste.....	44
	Apêndice E – Rubrica de Avaliação da Apresentação Final do Experimento	45
	Apêndice F – Banco Óptico com Materiais de Baixo Custo.....	46
	Apêndice G – maquete Experimental Construída com Arduino e Banco Óptico	49

1 INTRODUÇÃO

A trajetória do ensino de Física nas escolas brasileiras tem passado por transformações significativas nas últimas décadas. O modelo tradicional, baseado na exposição de conteúdos de forma linear e centrado no professor, tem sido gradualmente substituído por propostas pedagógicas que valorizam a contextualização, a experimentação e a construção ativa do conhecimento por parte dos estudantes. Essa mudança é impulsionada, entre outros fatores, pela busca por uma aprendizagem mais significativa e pelo reconhecimento da importância de humanizar o ensino das ciências, integrando a história da ciência e o protagonismo estudantil no processo educativo (NEVES, 1998).

Apesar dos avanços, o ensino de Física ainda enfrenta desafios persistentes, principalmente no que diz respeito à superação de metodologias centradas na memorização de fórmulas e na transmissão passiva de conceitos abstratos. Nesse cenário, as teorias de Jean Piaget e Seymour Papert oferecem bases sólidas para a transformação da prática pedagógica. O construtivismo piagetiano defende que a aprendizagem ocorre de forma ativa, mediante a interação do sujeito com o meio e a experimentação como parte essencial do processo cognitivo (NEVES, 1998). Já o construcionismo papertiano amplia essa visão ao enfatizar que os alunos aprendem melhor quando estão engajados na construção de objetos significativos, utilizando recursos tecnológicos em projetos práticos e colaborativos (MOREIRA, 2021).

Nesse contexto, a robótica educacional tem se destacado como uma estratégia poderosa para promover a aprendizagem ativa e significativa. Por meio da criação e execução de projetos com Arduino, por exemplo, os alunos são desafiados a resolver problemas reais, integrando conceitos de Física, programação e engenharia de forma prática e interativa (MOREIRA, 2018). Essas experiências favorecem o desenvolvimento de habilidades como pensamento crítico, criatividade e trabalho em equipe, além de consolidarem os conhecimentos científicos por meio da vivência e da experimentação.

A utilização das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) reforça ainda mais essa abordagem, ao oferecer ferramentas que tornam os ambientes de aprendizagem mais interativos, dinâmicos e alinhados às necessidades dos estudantes do século XXI. Tais práticas estão em consonância com as diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que destaca a importância da inserção da Física Moderna no ensino médio como forma de aproximar os alunos das fronteiras do conhecimento científico (DESPORTO, 1999).

Nesse cenário, a introdução da constante de Planck no currículo do ensino médio representa uma oportunidade valiosa de aprofundamento conceitual e de conexão com temas contemporâneos da Física. A constante de Planck (h) é fundamental para a formulação da teoria

quântica da radiação e para a compreensão da dualidade onda-partícula, sendo considerada um dos pilares da mecânica quântica (PAIS, 2005). No entanto, seu caráter abstrato exige estratégias pedagógicas que tornem esse conteúdo acessível e relevante para os estudantes.

O presente recurso educacional integra essa perspectiva ao propor um **roteiro de aprendizagem ativa** sobre a constante de Planck, fundamentado nas abordagens construtivista e construcionista. O material propõe a construção e a aplicação de dois experimentos didáticos voltados à estimativa da constante de Planck: um utilizando **materiais de baixo custo**, e outro baseado em **robótica com Arduino**, promovendo uma comparação entre metodologias acessíveis e soluções tecnológicas mais sofisticadas (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Durante o desenvolvimento das atividades, os estudantes são incentivados a formular hipóteses, planejar e executar os experimentos, coletar dados e aplicar a lei de Stefan-Boltzmann na análise dos resultados. Essas ações concretizam os princípios de uma aprendizagem ativa, centrada no aluno, favorecendo o entendimento conceitual e o engajamento com a Física de forma significativa.

Portanto, este recurso educacional visa não apenas à compreensão teórica da constante de Planck, mas também à promoção de competências investigativas, ao estímulo da curiosidade científica e à preparação dos estudantes para os desafios da ciência contemporânea, por meio de práticas pedagógicas alinhadas às mais atuais demandas educacionais.

2 AS ORIGENS DA FÍSICA QUÂNTICA E SEUS DESAFIOS INICIAIS

2.1 Breve revisão da formulação de Planck para a radiação do corpo negro

No final do século XIX, a Física clássica enfrentava um problema significativo relacionado à explicação do espectro da radiação emitida por corpos negros — objetos ideais que absorvem e emitem toda a radiação incidente sobre eles. Segundo as teorias clássicas, como a lei de Rayleigh-Jeans, a intensidade da radiação deveria aumentar indefinidamente com a frequência, resultando em uma previsão absurda de emissão infinita em altas frequências — um paradoxo conhecido como a **catástrofe do ultravioleta** (PAIS, 2005).

A solução para esse impasse foi proposta por Max Planck, que, ao tentar ajustar experimentalmente os dados da radiação do corpo negro, introduziu uma hipótese revolucionária: a energia não era emitida ou absorvida de forma contínua, como previsto pela física clássica, mas sim em pequenos pacotes discretos denominados quanta. Essa abordagem representou uma ruptura com o determinismo clássico e deu origem à Física Quântica (PAIS, 2005).

2.2 Aspectos teóricos da quantização da energia na reformulação de Planck

Planck sugeriu que a energia E de um oscilador eletromagnético em um corpo negro era proporcional à frequência f da radiação, expressa pela relação:

$$E = hf. \quad (1)$$

Nessa equação, h é a constante de Planck, um valor fundamental da natureza. Essa proposta implicava que a energia só poderia ser emitida ou absorvida em múltiplos inteiros de hf , ou seja, em **valores quantizados** (PAIS, 2005). Essa foi a primeira vez que a ideia de quantização foi introduzida na Física, abrindo caminho para o desenvolvimento de teorias posteriores sobre o comportamento da luz, dos elétrons e de outros sistemas microscópicos.

Embora Planck tenha introduzido essa hipótese como uma solução matemática, sem inicialmente acreditar no seu significado físico profundo, sua proposta logo se mostrou essencial para explicar outros fenômenos, como o efeito fotoelétrico — posteriormente descrito por Albert Einstein — que confirmaria a natureza quântica da luz (NEVES, 1998).

2.3 Formulação da Lei de Planck

A **Lei de Planck** para a radiação do corpo negro é um dos marcos fundamentais da Física Moderna, pois representa o nascimento da teoria quântica. Ela descreve como a intensidade da radiação eletromagnética emitida por um corpo negro depende da **frequência da radiação** (f) e da **temperatura** do corpo (T).

No final do século XIX, os físicos tentavam entender o espectro de emissão térmica de corpos aquecidos. Medições experimentais mostravam que:

- Em **baixas frequências**, a radiação aumentava com a frequência.

- Em **frequências médias**, atingia um pico.
- Em **altas frequências**, caía rapidamente para zero.

No entanto, as teorias clássicas, como a **Lei de Rayleigh-Jeans**, não conseguiam explicar esse comportamento em altas frequências, prevendo que a energia deveria crescer infinitamente — o que ficou conhecido como **catástrofe do ultravioleta**.

Foi nesse contexto que Max Planck propôs sua famosa fórmula, baseada na hipótese inovadora de que a energia dos osciladores atômicos em um corpo negro só podia ser trocada em múltiplos discretos de uma quantidade mínima de energia. Nela a **densidade espectral de energia** (ou intensidade da radiação por unidade de frequência) é dada por:

$$I(f, T) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \frac{hj}{e^{hf/kT} - 1} \quad (2)$$

ou, em função do comprimento de onda λ , a lei é expressa como

$$I(f, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \quad (3)$$

em que c é a velocidade da luz no vácuo.

A equação de Planck tem duas partes principais:

- $\frac{8\pi f^2}{c^3}$: fator que representa a **densidade de estados** — o número de modos vibracionais disponíveis para a radiação em uma cavidade.
- $\frac{hj}{e^{hf/kT} - 1}$: representa a **energia média por modo**, considerando que os osciladores só podem trocar energia em múltiplos de hf . Este fator inclui o efeito estatístico da distribuição da energia em função da temperatura, baseado na estatística de Bose-Einstein (embora Planck ainda não soubesse disso à época).

2.3.1 Consequências importantes

- Em **baixas frequências** ($hf \ll kT$), a fórmula de Planck se aproxima da **lei de Rayleigh-Jeans**, recuperando a Física Clássica.
- Em **altas frequências** ($hf \gg kT$), o denominador cresce exponencialmente, fazendo a intensidade tender a zero — o que resolve a catástrofe do ultravioleta.
- A **forma da curva** de emissão varia com a temperatura: quanto maior T , mais intensa é a radiação total e mais deslocado para frequências maiores está o pico da curva, em conformidade com a **Lei de Deslocamento de Wien**.
- A **energia total emitida** por um corpo negro é proporcional a T^4 , o que corresponde à **Lei de Stefan-Boltzmann** — derivada da integração da Lei de Planck.

A Lei de Planck foi o **primeiro indício concreto da quantização da energia**, ou seja, da ideia de que a energia não é contínua, mas vem em pacotes. Isso exigiu uma reinterpretação da natureza da luz e da energia, e foi o ponto de partida para:

- O modelo quântico do átomo (Bohr, 1913);
- A explicação do efeito fotoelétrico (Einstein, 1905);
- O desenvolvimento da mecânica quântica (Schrödinger, Heisenberg, Dirac etc.).

2.4 A natureza ondulatória da luz e suas implicações na Física Quântica

A compreensão da luz como uma **onda eletromagnética** havia sido estabelecida no século XIX com James Clerk Maxwell. Experimentos como os de interferência e difração reforçavam essa visão. No entanto, com os avanços da Física Quântica, tornou-se necessário reconciliar essa **natureza ondulatória** com o **comportamento corpuscular** revelado por fenômenos como o efeito fotoelétrico e a própria quantização da energia proposta por Planck.

Essa dualidade da luz — ora comportando-se como onda, ora como partícula — tornou-se um dos pilares da mecânica quântica, conhecida como **dualidade onda-partícula**. Esse conceito ampliou a compreensão da radiação e da matéria, levando ao desenvolvimento de teorias mais abrangentes, como a **mecânica quântica de Schrödinger** e a **interpretação probabilística de Heisenberg** (NEVES, 1998; PAIS, 2005).

2.5 Difração da luz e sua conexão com a determinação da constante de Planck

A história da difração das ondas eletromagnéticas remonta aos trabalhos de **Thomas Young**, no início do século XIX. Young demonstrou, por meio de seu famoso experimento da fenda dupla, que a luz exibe padrões de interferência, evidenciando sua natureza ondulatória (YOUNG, 1804 apud HECHT, 2017). Quando a luz passa por duas fendas próximas, as ondas emergentes interferem umas com as outras, criando um padrão de franjas claras e escuras em uma tela (Figura 1). Esse padrão não poderia ser explicado se a luz fosse composta apenas de partículas, como anteriormente proposto pela teoria corpuscular de Newton.

O experimento de Young não apenas forneceu uma prova decisiva da natureza ondulatória da luz, mas também estabeleceu as bases para a compreensão da interferência e da difração, fenômenos que são centrais na ótica moderna (FRENCH, 1976). A difração é observada em diversas aplicações, desde a formação de imagens em telescópios até o funcionamento de dispositivos como fendas e redes de difração, sendo crucial para tecnologias como comunicações ópticas, fibras ópticas e lasers (PEDROTTI; PEDROTTI; PEDROTTI, 2018).

A reprodução do experimento da fenda dupla requer que a luz de uma fonte passe por um orifício *A*, tornando os feixes coerentes. Isso permite que se adote a luz que sai de *A* como uma

fonte conveniente de emissão. Considerando um modelo tridimensional de propagação de ondas, temos:

$$E(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{r} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t), \quad (4)$$

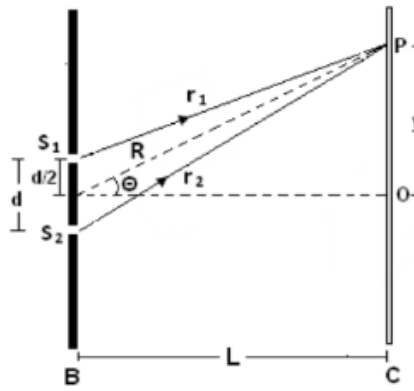
na qual E representa a intensidade do campo elétrico, E_0 a amplitude máxima, ω a frequência e k o vetor de onda. A intensidade da onda diminui com a distância da fonte. A forma complexa da equação é:

$$E(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{r} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}. \quad (5)$$

A intensidade luminosa observada num ponto P do anteparo é gerada pela interferência de duas frentes de ondas esféricas emitidas pelas fendas S_1 e S_2 . Observado na figura 1.

$$E(\vec{r}, t) = E_1(P, t) + E_2(P, t). \quad (6)$$

Figura 1 – Intensidade luminosa no ponto P gerado pela interferência construtiva de duas frentes de ondas em fase.



Fonte: (SANTOS, 2014)

Com isso, para pequenas diferenças de distância entre r_1 e r_2 , a fase Δ pode ser relacionada ao deslocamento angular θ :

$$\Delta = K(r_2 - r_1) = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta. \quad (7)$$

Substituindo nas expressões da intensidade, temos que

$$I(P) = 4I_1(P) \cos^2\left(\frac{\Delta}{2}\right). \quad (8)$$

Com variações de P no anteparo, alternam-se máximos e mínimos de intensidade. A condição de interferência construtiva ($I_{máx}$) ocorre para:

$$\Delta = (2n + 1)\pi \Rightarrow d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda. \quad (9)$$

2.6 Difração e a medição da constante de Planck

No contexto da física moderna, o fenômeno da difração também pode ser relacionado à natureza quântica da luz. Ao irradiar uma fonte de luz monocromática (por exemplo, um **laser de**

diodo) sobre uma rede de difração, observa-se um padrão de interferência. Se conhecemos a distância entre os máximos e a separação entre as fendas, podemos calcular o comprimento de onda λ da radiação.

A partir desse resultado, podemos explorar a relação entre a frequência da radiação e sua velocidade de propagação no vácuo:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (10)$$

com a velocidade da luz (c). Assim, o experimento de difração fornece uma estimativa direta do valor da frequência da luz.

Por outro lado, no contexto da física quântica, cada fóton que compõe essa radiação possui energia dada pela expressão dada pela equação (1). Dessa forma, se a energia dos fótons for determinada experimentalmente — por exemplo, medindo-se a diferença de potencial mínima (tensão limiar) necessária para que LEDs de diferentes cores emitam luz — é possível, em conjunto com a frequência obtida pela difração, estimar o valor de h .

Essa abordagem didática tem grande valor pedagógico porque integra duas descrições complementares da luz: a **ondulatória**, responsável pelo padrão de difração, e a corpuscular, que emerge da quantização da energia. Essa síntese evidencia a **dualidade onda-partícula**, princípio central da mecânica quântica (FAYNGOLD, 2008).

Combinando a análise geométrica do padrão de difração com a caracterização energética da emissão luminosa, o estudante pode, mesmo com aparatos simples e de baixo custo, acessar experimentalmente um dos parâmetros fundamentais da física moderna: a constante de Planck. Experimentos educacionais relatados na literatura mostram a viabilidade dessa proposta em contextos de ensino, promovendo a aprendizagem ativa e a compreensão profunda dos fundamentos da física quântica (DOS SANTOS et al., 2014).

3 ENSINO POR MEIO DA ROBÓTICA

O ensino por meio da robótica, enraizado nas teorias construcionistas de Seymour Papert, representa uma abordagem que redefine o papel da tecnologia na educação. Papert, em obras como "Mindstorms" e através do desenvolvimento da linguagem de programação LOGO (PAPERT, 1980b), propôs que o aprendizado se torna mais eficaz quando os estudantes estão diretamente envolvidos na construção de algo tangível. Essa ideia, amplamente discutida na literatura sobre construcionismo, destaca a importância do aprendizado ativo e da construção de conhecimento em contextos sociais, onde a linguagem e a interação desempenham papéis centrais na formação do entendimento (BEYNON, 2017; PAPERT, 1980b).

A linguagem de programação LOGO, desenvolvida por Seymour Papert e seus colegas no MIT (Massachusetts Institute of Technology) na década de 1960 (PAPERT, 1980b), foi projetada com o objetivo de ensinar conceitos de matemática, ciência e programação de uma maneira acessível e intuitiva, especialmente para crianças. LOGO é muitas vezes associada à "geometria da tartaruga", uma parte central da linguagem em que os usuários controlam uma tartaruga virtual (ou, em alguns casos, um robô físico) que desenha formas e padrões na tela ou no chão. LOGO teve um impacto significativo no campo da educação, sendo uma das primeiras linguagens de programação a ser introduzida em salas de aula. Ela abriu caminho para o uso da tecnologia como uma ferramenta educacional, mudando a maneira como os educadores pensam sobre o ensino de disciplinas técnicas e estimulando o interesse dos alunos por programação e robótica desde cedo. Papert acreditava que LOGO não apenas ensinava habilidades técnicas, mas também ajudava a moldar o pensamento criativo e independente dos alunos, preparando-os para solucionar desafios complexos de maneira inovadora.

Assim como a linguagem LOGO revolucionou o ensino ao introduzir a programação de forma acessível e intuitiva, o Arduino tem desempenhado um papel significativo na melhoria do ensino de Física. Essa plataforma de código aberto se destaca por sua praticidade e acessibilidade, permitindo a realização de experimentos científicos que envolvem desde conceitos básicos até fenômenos físicos mais complexos.

Na educação, o Arduino possibilita a aquisição automática de dados em experimentos de Física, tornando a compreensão de conceitos abstratos mais concreta por meio da interação direta com fenômenos reais. Essa abordagem facilita a visualização e análise de processos físicos, como a variação de temperatura (MOREIRA, 2018), movimentos uniformemente variados e harmônicos simples (BARBOSA; COSTA; LIMA, 2023), e a Lei de Resfriamento de Newton (ADMIRAL, 2022). Ao permitir que os alunos observem e manipulem variáveis em

tempo real, a plataforma estimula uma conexão mais intuitiva com os princípios científicos, proporcionando uma experiência imersiva que favorece a aprendizagem ativa.

Além da simples observação, o uso do Arduino no ensino de Física incentiva uma abordagem construcionista, em que os estudantes participam ativamente do processo de descoberta e experimentação. Eles não apenas coletam dados, mas também programam o sistema, configuram sensores e analisam os resultados utilizando ferramentas computacionais, como planilhas eletrônicas e softwares de modelagem. Esse processo interdisciplinar favorece a integração entre a teoria e a prática, promovendo um aprendizado mais significativo. Além disso, ao lidar com eletrônica, programação e análise de dados, os alunos desenvolvem competências essenciais para a era digital, ampliando sua capacidade de resolução de problemas e inovação tecnológica.

3.1 Arduino: uma ferramenta versátil para o ensino de física moderna

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware e software livres, inicialmente desenvolvida em 2005 na Itália, com o objetivo de tornar o desenvolvimento de projetos eletrônicos acessível a iniciantes. Ele se destaca por oferecer uma interface de programação intuitiva (Arduino IDE) e por contar com uma comunidade global engajada, que compartilha tutoriais, bibliotecas e exemplos de aplicação. Essa rede de suporte, aliada ao espírito colaborativo, cria um ambiente propício à troca de ideias e à resolução conjunta de problemas, aproximando ainda mais o ensino da realidade do trabalho científico.

Para além da placa Arduino Uno, amplamente adotada em ambientes educacionais, há vários outros modelos, como o Arduino Nano, valorizado por seu tamanho compacto, e o Arduino Mega, ideal para projetos mais complexos e que demandam maior quantidade de pinos de entrada e saída. Essa diversidade de placas possibilita ao educador selecionar a opção mais adequada às necessidades de cada experimento, tornando a experiência pedagógica flexível e adaptada a diferentes níveis de conhecimento dos estudantes.

3.2 Principais componentes e recursos

- **Microcontrolador:** Geralmente baseado em modelos como o ATmega328P (no caso do Arduino Uno), ele é responsável por processar as instruções e executar o código desenvolvido pelo usuário. Esse “cérebro” da placa armazena programas e coordena as interações entre sensores, atuadores e demais componentes.

- **Pinos de Entrada e Saída (I/O):** São fundamentais para a comunicação entre o Arduino e o mundo externo. As entradas analógicas permitem medir grandezas variáveis, como tensão ou intensidade luminosa, enquanto as saídas digitais viabilizam o acionamento de LEDs, motores e até mesmo lasers, úteis em experimentos de óptica.

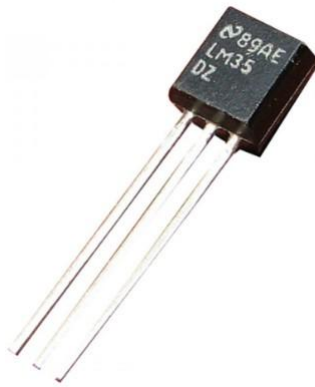
- **Conversor Analógico-Digital (ADC):** Converte sinais analógicos em valores digitais que podem ser interpretados pelo microcontrolador. Em experimentos de Física, como a determinação da constante de Planck ou o estudo de movimento, esse componente traduz medições físicas reais em dados numéricos.
- **Conector USB e Fontes de Alimentação:** Além de permitir a transferência de programas, a porta USB também fornece alimentação para a placa durante o desenvolvimento de projetos. Já os reguladores de tensão internos garantem a estabilidade e a segurança elétrica, mesmo quando se trabalha com fontes de alimentação externas.
- **Bibliotecas e Extensões:** A comunidade Arduino desenvolve e mantém diversas bibliotecas para sensores, módulos de comunicação (Wi-Fi, Bluetooth, Ethernet) e displays, ampliando o leque de aplicações didáticas. Essa variedade de recursos permite que estudantes e professores explorem desde conceitos básicos de circuitos até sistemas embarcados mais avançados.

O Arduino vem se consolidando como uma ferramenta indispensável para tornar o ensino de Física mais dinâmico e intuitivo. Através de seu microcontrolador que converte sinais analógicos ou digitais vindos de diferentes sensores em dados processáveis, os quais podem ser exibidos em tempo real ou armazenados para análise posterior. Dessa forma, estudantes e professores conseguem observar e quantificar fenômenos físicos de maneira prática, o que potencializa a compreensão de conceitos teóricos e desenvolve competências como análise crítica, trabalho em equipe e resolução de problemas.

No estudo de Cinemática, por exemplo, podem-se utilizar sensores ultrassônicos para medir distâncias em função do tempo (LEITE, 2021). Esses dispositivos emitem pulsos de ultrassom e, ao registrar o intervalo entre emissão e reflexão, fornecem ao Arduino a informação necessária para o cálculo de posições e velocidades. A placa, por sua vez, converte esses sinais em valores digitais e permite que o usuário obtenha gráficos de posição, velocidade ou aceleração, favorecendo discussões sobre queda livre, lançamentos oblíquos e movimentos harmônicos. Acelerômetros também podem ser acoplados para aprofundar a análise da dinâmica, fornecendo dados sobre a aceleração em cada eixo e permitindo a observação direta da segunda lei de Newton ou do movimento circular.

Na Termodinâmica, a possibilidade de monitorar temperaturas, pressões e outras variáveis térmicas torna o Arduino especialmente útil em experimentos que costumam ser abstratos quando abordados apenas teoricamente (SOUZA, 2019). Sensores como o LM35, que produz uma tensão proporcional à temperatura, ou o DS18B20, que se comunica digitalmente, permitem registrar variações de calor e interpretar curvas de aquecimento ou resfriamento com alto grau de precisão. O Arduino recebe esses sinais e os converte para valores em graus Celsius ou Kelvin, podendo inclusive exibi-los em um display ou enviá-los para o computador via porta serial.

Figura 2 – Sensor de tempera LM35



Fonte: Disponível em: "<https://humorquantico.com/courses/fisica-das-radiacoes/lessons/fisica-das-radiacoes/topic/1919-radiacao-de-corpo-negro-max-planck/>". Acessado em 13 de janeiro de 2025

Em processos mais avançados, sensores de pressão e umidade, como o BME280, detectam mudanças internas ou externas em um sistema, possibilitando a exploração de propriedades de gases em leis como as de Boyle-Mariotte e Charles. Esse conjunto de recursos traz ao laboratório escolar a oportunidade de investigar trocas de calor, eficiência de isolamento e até mesmo ciclos termodinâmicos simplificados (TUTORIALS, 2024).

Figura 3 – Sensor de temperatura BME280



Fonte: USINAINFO. Sensor BME280 para monitoramento da pressão, umidade e temperatura. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/blog/sensor-bme280-para-monitoramento-da-pressao-umidade-e-temperatura/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

No contexto do Eletromagnetismo, o Arduino se torna um importante aliado na análise de tensão, corrente elétrica e campos magnéticos, permitindo o registro contínuo e confiável dessas grandezas. Para medir a tensão, é suficiente conectar o pino de entrada analógica a um ponto do circuito que se deseja examinar, respeitando os limites de tensão da placa ou utilizando divisores de tensão. Para a medição da corrente elétrica, é possível empregar shunts (resistores de baixo valor) ou módulos como o ACS712, que convertem a corrente que passa pelo circuito em um sinal equivalente. O Arduino processa esses valores recebidos e os disponibiliza para visualização ou armazenamento, facilitando a verificação experimental de relações como a Lei de Ohm e o comportamento de circuitos em série e paralelo.

Além disso, sensores de efeito Hall e magnetômetros são eficazes na detecção e medição de campos magnéticos, permitindo a realização de estudos sobre indução eletromagnética e transformações de energia. Em experimentos que envolvem a aproximação de ímãs a bobinas, por exemplo, o Arduino capta as tensões induzidas, ilustrando os princípios de Faraday e Lenz e demonstrando como a variação de um campo magnético pode gerar uma corrente elétrica mensurável. (COSTA, 2019).

Em todos esses casos, a capacidade de processamento do Arduino permite que os resultados sejam analisados em tempo real, sejam exibidos em um display conectado à placa ou sejam transferidos para ferramentas de análise no computador. Esse fluxo contínuo de coleta de dados e visualização imediata aumenta o engajamento dos estudantes, que podem comparar as observações experimentais com previsões teóricas e, assim, desenvolver senso crítico para avaliar discrepâncias e possíveis fontes de erro. A montagem dos experimentos, a escrita do código e a interpretação dos resultados também promovem o trabalho em equipe e a interdisciplinaridade, uma vez que o projeto pode envolver não apenas princípios de Física, mas também noções de eletrônica, lógica de programação e design de protótipos.

A versatilidade do Arduino ao capturar e processar diferentes variáveis físicas torna-o um recurso de grande valor didático, capaz de aproximar os estudantes do método científico e enriquecer a aprendizagem em áreas fundamentais como Cinemática, Termodinâmica e Eletromagnetismo. Sua adoção em sala de aula ou em laboratórios experimentais estimula a prática investigativa, reforça o entendimento conceitual e oferece uma experiência mais completa do que representa a atividade científica no mundo contemporâneo. (MARTINAZZO et al., 2014).

3.2.1 Filtros RC

Em circuitos eletrônicos que exigem modulação de sinais, os filtros RC desempenham um papel fundamental na garantia da estabilidade e pureza do sinal. Isso é especialmente verdadeiro

em projetos que envolvem a utilização de lasers, pois qualquer ruído ou oscilação indesejada pode comprometer a qualidade e a consistência do feixe. O laser, por sua vez, é uma fonte de luz coerente com frequência específica, tornando-se particularmente sensível a interferências elétricas, sobretudo quando é modulado por dispositivos como o Arduino.

No contexto de um experimento em que o Arduino modula o feixe de laser para a criação de um padrão de difração, os filtros RC ajudam a estabilizar a modulação do sinal e a filtrar possíveis interferências no sensor que detecta a luz difratada:

- **Estabilização da Modulação do Laser:** O Arduino frequentemente utiliza PWM (Modulação por Largura de Pulso) para acionar o laser em altas frequências, ligando e desligando o feixe de forma controlada. Entretanto, esse tipo de sinal pode apresentar pulsos abruptos que resultam em oscilações de intensidade na luz emitida. Um filtro RC passivo, inserido entre a saída PWM e o circuito de acionamento do laser, suaviza esse sinal elétrico, atenuando as transições mais bruscas e possibilitando um feixe mais uniforme. Dessa forma, o padrão de difração desejado é observado de maneira mais nítida, sem ruídos ou variações desnecessárias que poderiam dificultar a análise.
- **Filtragem de Sinais de Interferência no Sensor (LDR):** O sensor de luz (LDR), responsável por medir a intensidade luminosa difratada, também está sujeito a interferências, seja por flutuações na fonte de alimentação ou por ruídos eletromagnéticos gerados por outros componentes do próprio circuito ou de dispositivos próximos. Um filtro RC posicionado adequadamente na etapa de leitura do LDR ajuda a eliminar as variações de alta frequência que não interessam à medição, garantindo que o sinal coletado reflita de maneira mais fiel as oscilações reais da luz difratada.

Um exemplo prático da utilização de um filtro RC é na modulação de um laser operando a 1 kHz. Para isso, pode-se projetar um filtro RC com uma frequência de corte ligeiramente superior a esse valor, permitindo a passagem do sinal útil (em torno de 1 kHz) e atenuando frequências mais altas, que muitas vezes correspondem a ruídos indesejados. Os parâmetros de corte podem ser determinados ajustando-se os valores do resistor (R) e do capacitor (C) na seguinte fórmula:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (12)$$

em que f_c é a frequência de corte em hertz, R é a resistência em ohms e C é a capacitância em faraday.

Dessa forma, tanto a modulação do laser quanto a leitura do sensor permanecem sob controle, evitando distorções indesejadas no sinal. Se necessário, é possível calcular mais precisamente os valores de R e C para adequá-los às exigências específicas do experimento,

garantindo um equilíbrio entre a velocidade de resposta do sistema e a eficiência na filtragem dos ruídos.

3.2.2 Modulação do Laser

A modulação do laser em qualquer circuito semelhante ao utilizado neste projeto desempenha um papel essencial no controle preciso da emissão luminosa e na análise subsequente dos fenômenos de difração. O laser semicondutor, quando utilizado para gerar o padrão de interferência necessário à determinação da constante de Planck, deve emitir um feixe de luz coerente, estável e controlável. No entanto, a saída padrão de um microcontrolador como o Arduino é digital, gerando sinais em níveis discretos de tensão que alternam rapidamente entre valores máximo e mínimo. Para converter esse sinal digital em um comportamento que simule uma variação analógica, emprega-se a modulação por largura de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*) (KE, 2024).

A modulação PWM opera ajustando o tempo em que o laser permanece ligado e desligado dentro de um intervalo fixo, controlando assim a intensidade média da luz emitida. O Arduino gera uma sequência de pulsos de 5 V e 0 V com uma frequência suficientemente alta para que o olho humano não perceba a variação, mas que pode ser detectada eletronicamente. Para suavizar essa flutuação e obter uma saída de tensão mais constante, insere-se no circuito um filtro RC passa-baixa, que atenua as oscilações de alta frequência. Isso permite que o laser emita um feixe de intensidade praticamente constante, essencial para a obtenção de medições precisas da curva característica corrente-tensão (curva I-V).

No contexto deste experimento, a modulação do laser é fundamental porque possibilita o controle do ponto de limiar da emissão estimulada, ou seja, a tensão mínima a partir da qual o diodo laser começa a emitir luz coerente. Esse ponto é identificado com base na curva I-V obtida durante o processo experimental. O Arduino, ao modular a tensão aplicada ao laser e registrar a corrente correspondente, permite determinar com precisão o momento em que a emissão luminosa se torna significativa. Como a energia dos fótons emitidos está relacionada à frequência da luz por meio da equação de Planck, Eq. (1), a análise desses dados possibilita a estimativa dessa constante fundamental da física quântica (CARUSO; OGURI, 2016).

Essa energia também pode ser calculada pela relação elétrica:

$$E = eU, \quad (13)$$

em que e é a carga do elétron e U é a tensão limiar determinada pelo experimento. Assim, igualando essas expressões, obtemos:

$$eU = hf. \quad (14)$$

Como a frequência da luz está relacionada ao seu comprimento de onda pela equação:

$$f = \frac{c}{\lambda}. \quad (15)$$

Substituímos esse valor na expressão anterior e teremos finalmente

$$h = \frac{eU\lambda}{c}. \quad (16)$$

Essa equação permite determinar a constante de Planck a partir dos valores medidos experimentalmente, utilizando a tensão limiar U obtida com o auxílio da modulação do laser e o comprimento de onda λ encontrado por meio da análise do padrão de interferência.

3.2.3 Relação com o experimento de difração

A modulação do laser está diretamente relacionada à análise do padrão de difração gerado quando o feixe de luz coerente atravessa uma rede de difração unidimensional. Este padrão é resultado do fenômeno de interferência construtiva, que ocorre quando as frentes de onda difratadas se superpõem em fase em determinadas direções.

O comprimento de onda da luz emitida pelo laser, representado por λ , é um parâmetro essencial para o cálculo da constante de Planck e pode ser determinado a partir das medições do padrão de interferência, de acordo com a Eq. (9). Nesta equação, o ângulo θ pode ser calculado a partir da posição das franjas de interferência no anteparo, utilizando relações trigonométricas básicas e considerando a distância entre a rede e o anteparo. A precisão na determinação de θ é aprimorada com o controle da intensidade luminosa do laser, que é regulada por meio do PWM. Esse tipo de modulação permite ajustar a potência média emitida sem alterar a frequência do laser, melhorando a visibilidade das franjas e a exatidão da medição.

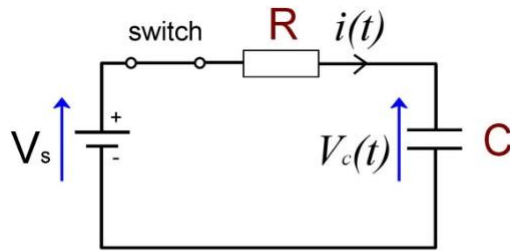
A partir da relação entre a energia dos fótons emitidos por um diodo laser semicondutor (laser de estado sólido) e a tensão de limiar U_0 do diodo, é possível estimar a constante de Planck h por meio da equação:

$$h = \frac{eU_0 d \sin(\theta)}{cm}, \quad (17)$$

em que U_0 é a tensão mínima para a emissão de luz pelo diodo laser.

Dessa forma, a modulação do laser exerce um papel fundamental não apenas no controle da intensidade do feixe luminoso, mas também na caracterização elétrica e óptica do diodo semicondutor, permitindo uma análise experimental da relação entre energia e frequência, conforme os princípios da quantização da energia estabelecidos por Planck. Essa abordagem experimental viabiliza uma forma didática de introduzir conceitos fundamentais da física moderna, como a dualidade onda-partícula e os postulados da mecânica quântica, em contextos acessíveis ao ensino médio (CARUSO; OGURI, 2016).

Figura 4 – Filtro Resistor Capacitor



$$V_s - i(t)R - V_c(t) = 0$$

Fonte: Disponível em: "<https://owlcation.com/stem/RC-Circuit-Time-Constant-Analysis>". Acessado em 13 de janeiro de 2025

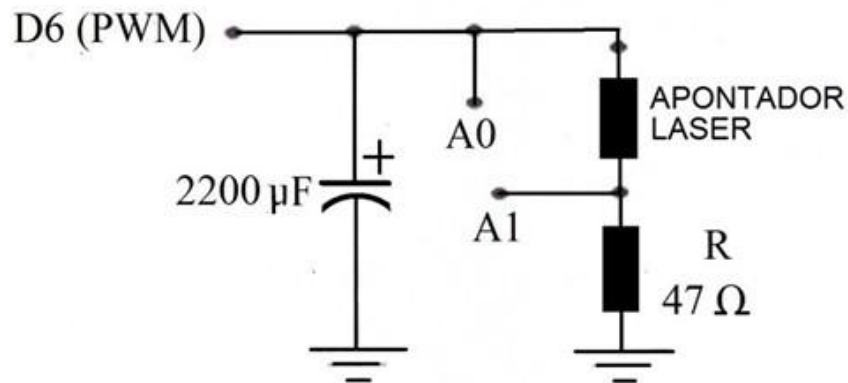
3.2.4 Circuito Eletrônico para Controle de Laser Semicondutor com Filtro LPF e Modulação PWM via Arduino

O circuito eletrônico utilizado para a investigação do comportamento de um laser semicondutor sob controle do PWM foi projetado para permitir a medição da tensão limiar necessária à emissão do feixe luminoso. Essa modulação foi suavizada por meio de um filtro passa-baixas (LPF), garantindo uma saída de tensão contínua, adequada para o funcionamento estável do diodo laser. A Figura 17 apresenta o diagrama esquemático do circuito experimental desenvolvido.

O circuito é composto pelos seguintes componentes eletrônicos:

- 1 capacitor eletrolítico (valores típicos entre 10 μF e 100 μF , dependendo da frequência da modulação);
- 1 resistor de 47 Ω , atuando em conjunto com o capacitor para formar o filtro RC passa-baixas;
- 1 diodo laser (apontador laser vermelho padrão, geralmente com comprimento de onda próximo a 650 nm).

Figura 5 – Diagrama do circuito eletrônico para análise da curva característica de um laser semiconductor controlado via Arduino



Fonte: (OLIVEIRA et al., 2020)

Esse arranjo possibilita o controle preciso da intensidade luminosa do laser, ao mesmo tempo que permite estudar a curva característica tensão-corrente do diodo semiconductor, fundamental para a posterior determinação experimental da constante de Planck.

3.3 Código do Arduino

O controle automatizado do laser, a aquisição de dados e a subsequente análise experimental são viabilizados por instruções programadas e enviadas ao microcontrolador Arduino, por meio de códigos desenvolvidos na plataforma Arduino IDE. O programa implementado neste projeto foi projetado com o objetivo de otimizar tanto o controle do feixe de laser durante os experimentos de difração quanto a coleta precisa dos dados necessários à determinação da constante de Planck (SANTOS; JR.; SANTANA, 2015).

A lógica do código permite a modulação da intensidade luminosa do laser por meio da técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM), fundamental para a construção da curva característica corrente-tensão (I-V) do diodo semiconductor. Essa curva possibilita a identificação do ponto de limiar de tensão responsável pela emissão de luz coerente.

Além disso, o código estabelece comunicação com o software Excel utilizando a macro PLX-DAQ, permitindo a coleta automatizada e o armazenamento em tempo real dos dados experimentais, o que contribui significativamente para a eficiência e a confiabilidade dos resultados obtidos.

A seguir, apresenta-se o código do programa:

```
const int pinoPWM = 6;
const int pinoTensao = A0;
const int pinoCorrente = A1;
```

```
const float resistencia = 47.0; // Ohms
```

Aqui são definidas as variáveis constantes que representam os pinos do Arduino usados no circuito: o pino 6 para enviar o sinal PWM que controla a intensidade do laser, e os pinos analógicos A0 e A1 para fazer as leituras de tensão e corrente, respectivamente. Também é definida a resistência de 47 Ohms usada para calcular a corrente elétrica a partir da tensão medida no resistor.

O trecho a seguir corresponde a função de inicialização (setup), estabelecendo a comunicação serial com a interface PLX-DAQ, responsável por transferir os dados coletados para uma planilha Excel em tempo real. O programa aguarda dois segundos para assegurar que a conexão esteja estabilizada antes do envio dos comandos. São enviados comandos para limpar quaisquer dados previamente armazenados na planilha e para configurar os rótulos das colunas que receberão os valores de tensão e corrente. Por fim, o pino utilizado para controle do laser é configurado como saída, preparando o sistema para o envio dos sinais PWM:

```
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    delay(2000);

    Serial.println("CLEARDATA");
    Serial.println("LABEL,Tensao (V),Corrente (mA)");

    pinMode(pinoPWM, OUTPUT);
}
```

3.3.1 Função loop() - controle PWM e coleta de dados

A função principal (loop) executa um ciclo contínuo em que a intensidade do laser é modulada por meio do sinal PWM, variando seu valor de 0 a 255 em incrementos de 5, permitindo uma varredura gradual da potência aplicada. Após cada ajuste do sinal, o sistema aguarda 100 milissegundos para garantir a estabilidade do circuito antes da leitura dos sensores. As leituras analógicas realizadas nos pinos A0 e A1 correspondem às tensões medidas diretamente no circuito e no resistor de referência, respectivamente. Essas leituras são convertidas para valores de tensão em volts com base na resolução do conversor analógico-digital do Arduino. A corrente elétrica é então calculada utilizando a resistência conhecida, convertida para miliamperes para facilitar a interpretação. Os valores obtidos são transmitidos para o software PLX-DAQ através da interface serial, permitindo o armazenamento e análise imediata dos dados no Excel. Para garantir intervalos regulares entre as amostras, é adotado um atraso de 200 milissegundos entre as medições:

```

void loop() {
    // Varredura de PWM (de 0 a 255)
    for (int pwm = 0; pwm <= 255; pwm += 5) {
        analogWrite(pinoPWM, pwm);
        delay(100); // tempo para estabilizar

Leitura dos pinos:
        int leituraTensao = analogRead(pinoTensao);
        int leituraCorrente = analogRead(pinoCorrente);
        Conversão para tensão (0 a 5V)
        float tensao = (leituraTensao * 5.0) / 1023.0;
        float tensaoResistor = (leituraCorrente * 5.0) / 1023.0;
calculo de Corrente:
        float corrente = (tensaoResistor / resistencia) * 1000.0; // mA

```

3.3.2 Registro de dados no Excel

Nesta seção, detalhamos a lógica implementada para a coleta e organização automática de dados no Excel, utilizando o Arduino para registrar medições de tensão e corrente de forma estruturada. O código adota um sistema de repetição para garantir que cada novo dado seja inserido sequencialmente, permitindo a atualização em tempo real no Excel.

O Arduino envia os dados ao Excel utilizando a comunicação serial, garantindo que cada valor seja armazenado na célula correta. O código abaixo ilustra esse processo

Envio para o PLX-DAQ

```

Serial.print("DATA,");
Serial.print(tensao, 3);
Serial.print(",");
Serial.println(corrente, 3);

delay(200); // tempo entre medições
}

```

3.3.3 Desligamento do laser e reinício do ciclo

Concluída a varredura completa da intensidade do laser, o sistema desliga o dispositivo ao enviar um sinal PWM com valor zero, interrompendo a emissão luminosa. Posteriormente, o programa realiza uma pausa de dois segundos antes de reiniciar o ciclo, assegurando condições de segurança e estabilidade do circuito para as próximas medições:

```

    analogWrite(pinoPWM, 0);
    delay(2000); // Espera antes de reiniciar

```

}

Neste processo, ocorre a medição filtrada da tensão e corrente:

- O microcontrolador Arduino realiza a leitura analógica das portas A0 e A1, aplicando um filtro digital.
- A leitura obtida no pino A0 é convertida em valores de tensão e, posteriormente, de corrente elétrica, tomando como referência o valor padrão de 5 V da alimentação do Arduino.
- A corrente elétrica é determinada com base na Lei de Ohm, conforme a expressão:

$$I = \frac{V}{R}, \quad (18)$$

- em que $R = 47,0 \, \Omega$.
- A leitura do pino A1 é configurada de forma a garantir medições consistentes da corrente, sendo fundamental para a correta caracterização do comportamento do diodo emissor de luz.

Esse código permite a aquisição automatizada dos dados necessários para a determinação da constante de Planck, facilitando a análise do comportamento do diodo laser e seu padrão de emissão coerente.

3.3.4 Link para download do PLX-DAQ

Para a aquisição e registro automatizado dos dados obtidos nos experimentos com Arduino, utilizamos o software PLX-DAQ (Parallax Data Acquisition), uma ferramenta que integra a plataforma Arduino ao Microsoft Excel por meio da comunicação serial. Essa integração permite que os dados capturados por sensores conectados ao Arduino, como temperatura, tensão ou corrente, sejam enviados em tempo real diretamente para uma planilha do Excel. Com isso, os estudantes podem observar e analisar os resultados de forma imediata, visualizando as variações físicas em gráficos ou tabelas gerados automaticamente. Essa abordagem não apenas facilita a coleta de dados experimentais, como também promove uma experiência pedagógica mais rica e interativa, aproximando o ensino da Física das práticas investigativas utilizadas na ciência contemporânea. O uso do PLX-DAQ, portanto, favorece a interdisciplinaridade entre programação, física experimental e análise de dados, reforçando a importância da tecnologia como aliada no processo de ensino-aprendizagem.

Link para download:

<https://www.parallax.com/package/plx-daq/>

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada tem como foco o desenvolvimento, a aplicação e a análise de dois experimentos distintos voltados à determinação da constante de Planck, utilizando redes de difração como recurso central. O primeiro experimento será elaborado com materiais alternativos e de baixo custo, com o intuito de garantir acessibilidade e viabilidade de replicação em ambientes escolares com recursos limitados. O segundo experimento, por sua vez, será automatizado, utilizando uma rede de difração de laboratório e integrando sensores, atuadores e um sistema de controle baseado na plataforma Arduino para modulação do laser, coleta e processamento de dados. Ambos os experimentos constituem a base para a construção de um **roteiro de aprendizagem ativa** voltado ao ensino de conceitos da Física Moderna, em especial à quantização da energia.

A elaboração desse roteiro está ancorada nos princípios do construcionismo de Seymour Papert, que propõe uma aprendizagem centrada no estudante como agente ativo na construção do conhecimento, especialmente quando envolvido em projetos concretos e significativos. Papert (1980) argumenta que os aprendizes desenvolvem melhor sua compreensão ao construir artefatos compartilháveis que exigem reflexão, criatividade e resolução de problemas. Assim, o roteiro de aprendizagem ativa estrutura situações didáticas que favorecem a experimentação, o pensamento crítico, a colaboração e a criação, aproximando-se da perspectiva de uma aprendizagem significativa, participativa e autoral (PAPERT, 1980a; VALENTE, 1999).

Além disso, essa abordagem dialoga com os princípios apresentados por Resnick (2017), que defende um modelo educacional baseado em projetos, paixão, pares e brincadeira (*projects, passion, peers, and play*), estimulando o pensamento criativo e o envolvimento dos estudantes em práticas autênticas. A proposta será aplicada a estudantes do terceiro ano do ensino médio da rede pública, proporcionando-lhes uma experiência concreta com fenômenos da Física Moderna por meio da manipulação de materiais e da análise de dados empíricos, contribuindo para o desenvolvimento do letramento científico e tecnológico.

A comparação entre as abordagens experimentais – artesanal e automatizada – visa fomentar nos alunos uma visão crítica sobre diferentes métodos de investigação científica, aproximando-os das práticas próprias da ciência. A compreensão do fenômeno da difração e a aplicação da equação da rede de difração para determinar o comprimento de onda da luz serão elementos centrais da prática experimental. A partir desses dados, será possível aplicar a equação de Planck ($E = hf$), permitindo o cálculo da constante h e a integração dos conceitos de frequência, energia e quantização. A eficácia da proposta didática será avaliada por meio de

instrumentos qualitativos e quantitativos, incluindo questionários diagnósticos e formativos, bem como observações sistemáticas em sala de aula, com o objetivo de aferir o grau de compreensão e apropriação dos conceitos por parte dos estudantes.

5 PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO ROTEIRO DE APRENDIZAGEM ATIVA

O roteiro de aprendizagem ativa foi elaborado como um recurso educacional inovador destinado a proporcionar aos estudantes do ensino médio uma introdução prática, interdisciplinar e acessível aos fundamentos da Física Moderna. O eixo central da proposta consiste na determinação experimental da constante de Planck (h), articulando dois experimentos baseados em redes de difração – um de baixo custo, construído a partir de um CD em banco óptico artesanal de madeira, e outro de caráter laboratorial – associados à utilização do Arduino como plataforma de modulação do laser e aquisição automatizada de dados.

A adoção dessa metodologia fundamenta-se nas evidências de que estratégias de aprendizagem ativa favorecem maior engajamento, desempenho acadêmico e retenção de conceitos em comparação ao ensino tradicional expositivo (Bonwell; Eison, 1991; Freeman et al., 2014). Ao oportunizar a observação direta de fenômenos como os padrões de interferência da luz e a curva característica do diodo emissor de luz (laser), supera-se a apresentação excessivamente abstrata da Física Quântica no currículo regular (Gil-Pérez; Carvalho, 2001), possibilitando uma aprendizagem mais significativa e contextualizada (Ausubel, 2003).

Além disso, o planejamento do roteiro está em consonância com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que enfatiza o protagonismo juvenil, a interdisciplinaridade e a integração de tecnologias digitais ao ensino (Brasil, 2018).

5.1 Estruturação metodológica

O roteiro foi organizado em **três eixos integradores**:

- **Introdução conceitual e motivacional** – aulas dedicadas à contextualização histórica da Física Moderna, à quantização da energia e ao papel da constante de Planck. Foram utilizados recursos digitais de simulação, como o PhET, bem como exemplos aplicados a tecnologias cotidianas (LEDs, lasers, células fotovoltaicas).
- **Experimentação investigativa** – montagem dos sistemas ópticos (banco artesanal e rede laboratorial), modulação do laser via Arduino, coleta automatizada de dados em tempo real por meio da macro **PLX-DAQ** (Excel) e análise matemática com base na equação de difração $d \sin \theta = m\lambda$ e na relação energia-fóton $E = h\nu$.
- **Reflexão, avaliação e socialização** – discussão crítica dos resultados, comparação com valores teóricos e socialização dos achados em apresentações colaborativas, apoiadas por instrumentos avaliativos sistematizados.

5.2 Instrumentos pedagógicos e avaliativos

Para assegurar a consistência do processo de ensino-aprendizagem, foram incorporados instrumentos específicos, detalhados nos apêndices:

- Apêndice A – Questionários Diagnósticos: aplicados no início da sequência, permitiram mapear concepções prévias dos estudantes acerca da Física Moderna, circuitos eletrônicos e fenômenos ondulatórios.
- Apêndice B – Roteiro de Autoavaliação e Coavaliação dos Alunos: promoveu reflexão crítica individual e coletiva sobre o processo de aprendizagem e o trabalho colaborativo, estimulando competências socioemocionais (Zabala; Arnau, 2010).
- Apêndice C – Modelo de Diário de Bordo/Portfólio: serviu como registro contínuo das hipóteses, decisões experimentais, dados coletados e reflexões, configurando-se como ferramenta formativa.
- Apêndice D – Questionário Pós-Teste: aplicado ao final, permitiu comparar avanços conceituais em relação ao diagnóstico inicial.
- Apêndice E – Rubrica de Avaliação da Apresentação Final: garantiu critérios objetivos de análise (clareza conceitual, rigor científico, organização, criatividade e cooperação) nas apresentações públicas dos grupos.

5.3 Planejamento científico

Do ponto de vista científico, os experimentos foram concebidos para que os estudantes pudessem compreender:

- a relação entre a **tensão limiar do laser** e a energia mínima necessária para a emissão de fótons;
- o vínculo entre o **espaçamento da rede de difração** e a determinação do comprimento de onda da luz;
- o cálculo experimental da constante de Planck pela equação:

$$h = \frac{eU_0}{\nu}$$

em que e é a carga do elétron, U_0 a tensão limiar e ν a frequência de radiação.

Com base nessa formulação, os estudantes compararam o valor experimental de h com o valor teórico $6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (COTADA, 2019), discutindo erros relativos e incertezas experimentais.

5.4 Abordagem pedagógica

A perspectiva adotada fundamenta-se no **construcionismo de Papert** (1980), segundo o qual o aprendizado ocorre de maneira mais significativa quando o aluno atua como protagonista

na criação de artefatos concretos. Essa abordagem dialoga com a **aprendizagem significativa de Ausubel** (2003) e com os princípios da **aprendizagem colaborativa e ativa** (Moran, 2015).

Assim, o roteiro não apenas favoreceu o **desenvolvimento de habilidades cognitivas** em Física, como também promoveu competências do século XXI – pensamento crítico, resolução de problemas, literacia digital e criatividade (Trilling; Fadel, 2009).

Dessa forma, o **planejamento do roteiro de aprendizagem ativa** conseguiu articular conteúdos científicos, prática experimental e formação cidadã, configurando-se como uma proposta didática inovadora e transformadora para o **ensino de Física Experimental** no ensino médio.

5.5 Planejamento das aulas

• Aula 1 – Introdução à Física Moderna e à Constante de Planck

Objetivo: Apresentar os conceitos fundamentais da física moderna, como a quantização de energia, a dualidade onda-partícula e a relevância da constante de Planck na mecânica quântica.

Conteúdo teórico: Abordar o contexto histórico do surgimento da física quântica, elucidando como os cientistas desenvolveram o conceito de quantização de energia e explicando a importância da constante de Planck na compreensão dos fenômenos quânticos.

Discussão: Estabelecer conexões com aplicações cotidianas, abordando tecnologias como LEDs, painéis solares e lasers.

Recursos didáticos: Quadro, apresentação em slides.

A primeira aula deve funcionar como um ponto de partida conceitual e motivacional, rompendo com a lógica tradicional da física do ensino médio e provocando o aluno a refletir sobre a origem dos conceitos modernos. A aula deve ser organizada em três momentos: diálogo diagnóstico, contextualização histórica e conexão com o cotidiano.

Se possível utilizar plataformas de simulação que contribuam para a elucidação desses conceitos como a existente no PhET.

• Aula 2 – Introdução ao Arduino e Fundamentos de Entrada/Saída (I/O)

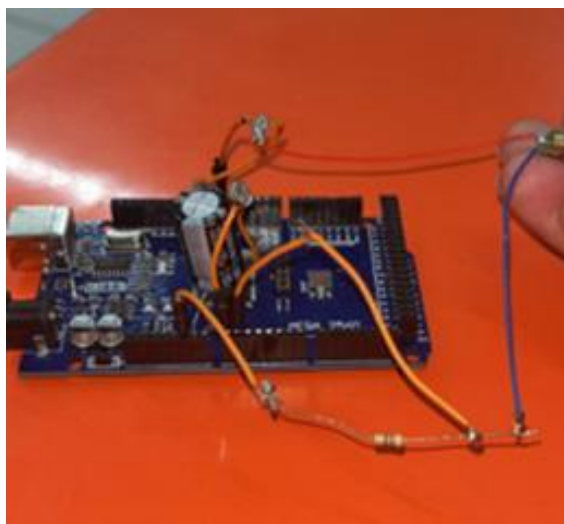
Objetivo: Ensinar os conceitos básicos de entrada e saída de dados (I/O) usando o Arduino, com foco na interação do controle do laser e na coleta de dados dos sensores.

Conteúdo teórico: Explicar os componentes essenciais do Arduino (placa, pinos digitais/analógicos, IDE do Arduino) e os fundamentos da programação (estrutura de código, variáveis, loops). Introduzir os conceitos de entrada (sensores) e saída (ativação de dispositivos, como o laser) e explicar o funcionamento básico de leitura de dados de um sensor de luz (fotodiodo ou LDR).

Atividade prática: Montar um circuito básico com o Arduino e programá-lo para controlar um LED, introduzindo comandos simples como "ligar" e "desligar".

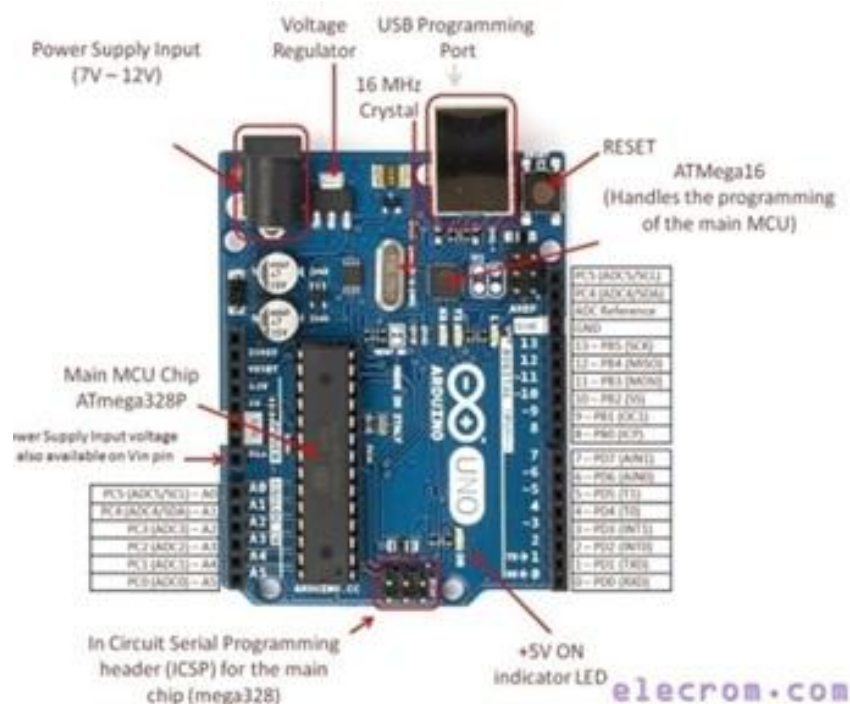
Recursos didáticos: Kit Arduino, computadores para programação.

Figura 6 – Circuito RC com laser modulado



Fonte: Autoria Própria

Figura 7 – Módulo Arduino Uno



Fonte: Autoria Própria

- **Aula 3 – Difração da luz e introdução ao experimento e criação do banco ótico artesanal**
Objetivo: Explicar o fenômeno da difração da luz e preparar os alunos para a realização

do experimento.

Conteúdo teórico: Definir e explicar o conceito de difração da luz. Discutir a teoria da difração por fendas e como esta pode ser aplicada para calcular comprimentos de onda da luz.

Atividade prática: Montar o sistema óptico com o laser, as redes de difração (caseira e de laboratório) e banco óptico¹. Realizar uma demonstração prática do padrão de interferência resultante.

Recursos didáticos: Banco óptico Laser, redes de difração caseira WFGE de laboratório.

Figura 8 – Banco óptico pronto



Fonte: Autoria Própria

Figura 9 – Elaboração do banco óptico



Fonte: Autoria Própria

• Aula 4 – Coleta de dados com a rede de difração com materiais alternativos

Objetivo: Realizar a medição prática utilizando uma rede de difração caseira, orientando os alunos na coleta, registro e organização dos dados experimentais para determinação do comprimento de onda da luz emitida por um laser. O roteiro experimental desta prática está no **Apêndice G**.

Conteúdo teórico: Revisar a equação de difração $d \sin \theta = m \lambda$ e como será investigada no experimento para calcular o comprimento de onda da luz.

Atividade prática:

- Utilizar o Arduino para modular a emissão do feixe de laser, garantindo maior precisão na detecção e análise dos pontos de interferência.
- Medir experimentalmente os ângulos de difração (θ) a partir das distâncias entre o máximo central e os máximos de ordens superiores registrados no anteparo.
- Calcular o comprimento de onda da luz (λ) com base na equação da difração, considerando o espaçamento da rede de difração caseira.
- Registrar todos os dados obtidos em planilhas digitais para posterior análise.

¹ O roteiro experimental do banco óptico está no apêndice F.

Recursos didáticos:

- Arduino (para controle da emissão do laser),
 - Fonte laser,
 - Rede de difração construída com materiais alternativos (ex.: DVD ou CD),
 - Régua milimetrada para medições,
 - Computadores com planilhas eletrônicas (ex.: PLX) para registro e análise dos dados.
- **Aula 5 – Coleta de dados com a rede de difração de laboratório**

A utilização de uma rede de difração em experimentos didáticos permite observar fenômenos de interferência da luz de forma quantitativa. Diferentemente da fenda simples, a rede contém milhares de fendas paralelas muito próximas entre si, o que aumenta a nitidez e a intensidade dos máximos de difração, tornando mais fácil identificar ângulos e calcular parâmetros ópticos fundamentais.

A luz proveniente do **laser** incide sobre a rede (Figura 10), e devido ao fenômeno da interferência construtiva, surgem máximos de intensidade em ângulos bem definidos. Esses ângulos podem ser relacionados ao comprimento de onda da luz. Dessa forma, ao medir o ângulo de difração (θ) e conhecer o passo da rede, é possível determinar o comprimento de onda da luz do laser, conectando teoria e prática.

Figura 10 – Rede de difração laboratorial da marca Azeheb



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 1 mostra um modelo dos dados a serem coletados nas medições.

Tabela 1 – Com os valores de tensão sendo do primeiro máximo secundário

Parâmetro	Valor
Carga do elétron	
Tensão limiar do laser	
Passo da rede	
Seno do ângulo (1º máximo)	
Ordem de difração	
Velocidade da luz	

Fonte: Autoria própria.

Atividade prática:

- Repetir o processo de coleta de dados utilizando a rede de difração de laboratório.
- Comparar os padrões de interferência obtidos com os da rede de baixo custo, discutindo diferenças em termos de precisão, nitidez dos máximos e confiabilidade dos dados coletados.
- Relacionar os resultados com o cálculo do comprimento de onda da luz e discutir sua importância na determinação da constante de Planck em experimentos subsequentes.

Recursos didáticos:

- Arduino (para controle e coleta automatizada dos dados),
- Fonte laser,
- Rede de difração de laboratório,
- Régua milimetrada,
- Computadores para aquisição e análise de dados experimentais.

• Aula 6 – Análise dos resultados e cálculo da constante de Planck

Objetivo: Nesta aula, o objetivo é analisar os dados coletados experimentalmente para determinar a constante de Planck (h), um dos parâmetros fundamentais da física quântica. A atividade permitirá aos estudantes compreender como, a partir de medições práticas, é possível relacionar fenômenos ópticos com conceitos da mecânica quântica.

Conteúdo teórico: Explicar o método para calcular a constante de Planck a partir dos dados obtidos das medições dos ângulos de difração e do comprimento de onda.

Atividade prática:

- Utilizar os comprimentos de onda obtidos nas aulas anteriores com as duas redes de

difração (laboratorial e caseira, construída com CD).

- Calcular experimentalmente a constante de Planck (h) com base nos valores de U_0 .
- Comparar os resultados obtidos com o valor teórico aceito ($h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$).
- Discutir as discrepâncias, identificando possíveis fontes de erro, como limitações nos instrumentos de medição, imperfeições na rede de difração caseira, alinhamento inadequado do laser ou incertezas nos ângulos de difração.

Recursos didáticos:

- Computadores com planilhas eletrônicas para organização e tratamento dos dados;
- Calculadoras científicas;
- Rede de difração laboratorial;
- Rede de difração caseira (CD).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros a serem medidos e calculados na investigação experimental da constante de Planck a partir das duas configurações utilizadas: a rede de difração laboratorial e a rede de difração caseira construída com CD. A comparação entre os valores de h obtidos evidencia as diferenças entre os dispositivos, permitindo aos estudantes refletir sobre a influência da precisão dos instrumentos e das condições experimentais na determinação de grandezas fundamentais da Física. Além disso, a análise crítica desses resultados possibilita discutir as principais fontes de erro e a proximidade ou afastamento em relação ao valor teórico aceito para a constante de Planck

Tabela 2 – Dados comparativos entre a rede laboratorial e a feita com CD

Rede	d (m)	sen(θ)	U_0 (V)	e (C)	c (m/s)	Ordem (m)	h (J·s)
Laboratorial							
Caseira (CD)							

Fonte: Autoria Própria.

• Aula 7 – Reflexão, discussão e apresentação de resultados

Objetivo: Concluir a sequência didática por meio de uma reflexão crítica acerca dos resultados obtidos no experimento de determinação da constante de Planck. A atividade visa estimular a capacidade de análise, discussão científica e apresentação dos projetos desenvolvidos pelos alunos, fortalecendo a compreensão da relação entre teoria e prática no ensino de Física.

Conteúdo teórico: Nesta etapa, os estudantes são convidados a refletir sobre o papel central da **experimentação no aprendizado de Física**, compreendendo como os dados obtidos em situações reais permitem validar ou questionar modelos teóricos. A determinação da constante de Planck (hhh) é um marco para essa reflexão, pois evidencia como a Física Quântica emergiu a partir

de observações experimentais. Além disso, discute-se a relevância do uso de **tecnologias acessíveis**, como redes de difração caseiras (CDs), que possibilitam democratizar o acesso ao conhecimento científico mesmo em contextos de poucos recursos, reforçando o princípio da ciência aberta e inclusiva.

Atividade prática: Cada grupo apresentará seus resultados experimentais, detalhando o **processo de cálculo da constante de Planck** a partir das medições realizadas com as redes de difração laboratorial e caseira. Durante a apresentação, os alunos deverão explicar como calcularam o comprimento de onda a partir da condição de difração, como associaram a frequência da luz com a tensão de corte (U_0) e, por fim, como obtiveram o valor de h . Após as apresentações, será aberto um espaço de debate coletivo, incentivando a troca de ideias sobre os resultados, as fontes de erro e as implicações pedagógicas do experimento para o ensino de conceitos da Física Moderna.

Recursos didático:

- Apresentações dos grupos em formato de slides;
- Quadro para discussão e síntese das ideias;
- Dados experimentais organizados em tabelas comparativas, conforme o exemplo da Tabela 3.

Tabela 3 – Comparativo entre as medidas

Rede	h Experimental (J·s)	h Teórico (J·s)	Erro Relativo (%)
Laboratorial	$6,85 \times 10^{-34}$	$6,626 \times 10^{-34}$	3.38 %
Rede (CD)	$6,40 \times 10^{-34}$	$6,626 \times 10^{-34}$	3.41 %

Fonte: Autoria própria

REFERÊNCIAS

- ADMIRAL, T. Lei do resfriamento de Newton: experimento com Arduino em aula remota. *ScientiaTec*, v. 9, n. 1, 2022.
- AUSUBEL, D. P. Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva. Lisboa: Plátano, 2003.
- BARBOSA, L. F.; COSTA, B. G. da; LIMA, D. B. de A. Ensino de movimento harmônico simples e tecnologias de inovação: uma prática educacional usando Arduino. *Jornada de Iniciação Científica e Extensão*, v. 17, n. 1, 2023.
- BEYNON, M. Mindstorms revisited: making new construals of Seymour Papert's legacy. In: SPRINGER (org.). *Educational Robotics in the Makers Era*. [S.l.]: Springer, 2017. p. 3–19.
- BONWELL, C. C.; EISON, J. A. Active learning: creating excitement in the classroom. Washington, D.C.: ASHE-ERIC Higher Education Report, 1991.
- BRASIL. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: MEC, 2018.
- BRASIL. Ministério da Educação e do Desporto. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio. Brasília: Ministério da Educação e do Desporto, 1999.
- CARUSO, F.; OGURI, V. Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CODATA. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2019. NIST, 2019.
- COSTA, R. B. Monitor de corrente alternada utilizando Arduino. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso — [S.l.: s.n.], 2019.
- DOS SANTOS, J. A. R. et al. Construção de um experimento didático para demonstrar o comportamento ondulatório da luz. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 4, 2014.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. Física Quântica. Rio de Janeiro: Campus, 1979.
- FAYNGOLD, M. Mecânica Quântica para Leigos. Rio de Janeiro: Alta Books, 2008.
- FREEMAN, S. et al. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *PNAS*, v. 111, n. 23, p. 8410–8415, 2014.
- FRENCH, A. P. Vibrações e Ondas. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.
- GLEISER, M. A dança do universo. 2. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.
- HECHT, E. Óptica. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2017.
- HUMOR QUÂNTICO. Radiação de corpo negro – Max Planck. Disponível em: <https://humorquantico.com/courses/fisica-das-radiacoes/lessons/fisica-das-radiacoes/topic/1919-radiacao-de-corpo-negro-max-planck/>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- KE, X. Communication lasers and their modulation technology. In: *Handbook of Optical Wireless Communication*. [S.l.]: Springer, 2024. p. 85–128. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1522-0_4. Acesso em: 10 abr. 2024.
- KITTEL, C. Introdução à Física do Estado Sólido. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- LEITE, D. L. F. Desenvolvimento de uma proposta pedagógica para o ensino da cinemática através da robótica educacional. 2021. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) — Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

- MARTINAZZO, C. A. et al. Arduino: uma tecnologia no ensino de física. *Revista Perspectiva*, v. 38, n. 143, 2014.
- MORAN, J. Metodologias ativas para uma aprendizagem mais profunda. In: BACICH, L.; TANZI NETO, A.; TREVISANI, F. de M. (org.). *Ensino Híbrido: personalização e tecnologia na educação*. Porto Alegre: Penso, 2015.
- MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, p. e20200451, 2021.
- MOREIRA, M. A. Uma análise crítica do ensino de física. *Estudos Avançados*, v. 32, p. 73–80, 2018.
- NEVES, M. C. D. A história da ciência no ensino de física. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 5, p. 73–81, 1998.
- OLIVEIRA, I. N. et al. Construção de uma maquete experimental automatizada para a determinação da constante de Planck com o auxílio da plataforma Arduino. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 37, n. 2, p. 828–848, 2020.
- OLIVEIRA, J. C. G. Introdução à mecânica quântica no ensino médio através de uma discussão sobre a constante de Planck. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2023.
- PAIS, A. *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- PAPERT, S. Personal computing and its impact on education. In: PAPERT, S. (org.). *The Computer in the School: Tutor, Tool, Tutee*. New York: Teachers College Press, 1980. p. 197–202.
- PAPERT, S. The gears of my childhood. In: PAPERT, S. (org.). *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*. New York: Basic Books, 1980. p. xv–xx. Disponível em: <https://dailypapert.com/the-gears-of-my-childhood/>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- PEDROTTI, F. L.; PEDROTTI, L. M.; PEDROTTI, L. S. *Introdução à óptica*. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2018.
- SANTOS, E. S. dos; SANTOS JUNIOR, R. de S. M.; SANTANA, V. M. da S. Determinação experimental da constante de Planck pela observação da corrente de descarga de um capacitor. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 32, n. 3, p. 824–836, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2015v32n3p824>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- SANTOS, G. D. N. D. Construção e caracterização de redes de difração confeccionadas com 'compact disk'. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso — [S.l.: s.n.], 2014.
- SOUZA, J. C. de. Aprendizagem ativa em aulas de física: o uso do Arduino em experimentos de termodinâmica. 2019. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/32632>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física Moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- TRILLING, B.; FADEL, C. *21st century skills: learning for life in our times*. San Francisco: Jossey-Bass, 2009.
- TUTORIALS, R. N. DHT11 vs DHT22 vs LM35 vs DS18B20 vs BME280 vs BMP180. 2024. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/dht11-vs-dht22-vs-lm35-vs-ds18b20-vs-bme280-vs-bmp180/>. Acesso em: 13 fev. 2025.

USINAINFO. Sensor BME280 para monitoramento da pressão, umidade e temperatura. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/blog/sensor-bme280-para-monitoramento-da-pressao-umidade-e-temperatura/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

VALENTE, J. A. O computador na sociedade do conhecimento. Campinas, SP: UNICAMP/NIED, 1999.

YOUNG, T. On the nature of light and colours. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, v. 94, p. 1–16, 1804.

ZABALA, A.; ARNAU, L. Como aprender e ensinar competências. Porto Alegre: Artmed, 2010.

APÊNDICE A: QUESTIONÁRIOS DIAGNÓSTICOS

Questionário de Verificação dos Conceitos – Física Moderna

1. Por que a energia é emitida em valores discretos e não contínuos?

- A) Porque a energia só pode existir em níveis específicos
- B) Porque a luz é contínua e não quantizada
- C) Porque a temperatura define o valor da energia
- D) Porque os átomos absorvem energia de forma aleatória
- E) Não sei

2. Como a temperatura afeta a cor e intensidade da luz emitida?

- A) Cor muda e intensidade aumenta com a temperatura
- B) Cor e intensidade não dependem da temperatura
- C) Cor muda, mas intensidade permanece constante
- D) Apenas a intensidade aumenta, a cor não muda
- E) Não sei

3. O que são pacotes de energia (quanta)? Dê um exemplo.

4. Por que corpos quentes emitem luz visível?

- A) Porque os elétrons nos átomos se excitam e liberam energia em fótons
- B) Porque o corpo produz calor, mas não energia luminosa
- C) Porque o calor gera ondas contínuas de luz
- D) Porque a cor depende da quantidade de átomos no corpo
- E) Não sei

5. Consegue relacionar quantização com o cálculo da constante de Planck?

Escala de autopercepção:

☐ Entendi perfeitamente ☐ Entendi parcialmente ☐ Não entendi ☐ Não sei

Questionário de Verificação dos Conceitos – Circuito e Arduino

1. Para que serve o pino GND em um circuito eletrônico?
 - A) Conectar ao zero do circuito, fechando o caminho da corrente
 - B) Conectar a entrada de energia positiva
 - C) Medir corrente elétrica sem conexão
 - D) Serve apenas para LEDs
 - E) Não sei

2. Por que o pino de tensão positiva é essencial para alimentar componentes como LEDs, sensores ou microcontroladores?
 - A) Porque fornece energia necessária para funcionamento
 - B) Porque regula a temperatura do circuito
 - C) Porque conecta o circuito à terra
 - D) Porque garante apenas que o LED acenda
 - E) Não sei

3. O que significa uma saída PWM e onde ela pode ser usada?
 - A) Permite controlar média de potência em LEDs e motores
 - B) Produz uma tensão contínua fixa
 - C) Apenas altera a tensão de alimentação do Arduino
 - D) Controla temperatura de sensores
 - E) Não sei

MTF (opcional):

PWM permite controlar potência de LED – V/F

PWM altera tensão DC para novo valor constante – V/F

PWM pode ser filtrado para gerar tensão analógica aproximada – V/F

Questionário de Verificação dos Conceitos – Difração

1. O que é um padrão de difração e como ele é formado com luz?

- A) Um padrão de franjas produzido por interferência da luz ao passar por fendas
- B) Apenas a reflexão da luz em superfícies
- C) Um efeito térmico da luz em corpos sólidos
- D) Luz passando por lentes sem gerar interferência
- E) Não sei

2. Como o espaçamento da rede de difração influencia a posição das franjas no padrão?

- A) Quanto maior o espaçamento, mais próximas as franjas
- B) Quanto maior o espaçamento, mais afastadas as franjas
- C) O espaçamento não altera a posição
- D) Depende apenas do comprimento de onda
- E) Não sei

3. Como determinar o comprimento de onda (λ) da luz a partir do experimento de difração?

Gabarito e Planilha de Análise

Item	Gabarito	Tipo	Observação para análise
FM1	A	MC	Dificuldade (p), discriminação (D)
FM2	A	MC	D, p
FM3	Aberta	Aberto	Analisar conceitos citados
FM4	A	MC	D, p
FM5	Escala	Likert	Autopercepção
CA1	A	MC	D, p
CA2	A	MC	D, p
CA3	A	MC	D, p; MTF verificada
D1	A	MC	D, p
D2	B	MC	D, p
D3	Aberta	Aberto	Medidas, equação, raciocínio

- Cálculo de dificuldade (p): % de acertos
- Discriminação (D): diferença entre médias do grupo alto x baixo
- Itens abertos: análise qualitativa por conceitos-chave

APÊNDICE B – Roteiro de Autoavaliação e Coavaliação dos Alunos

Objetivo: Avaliar, de forma reflexiva, o desempenho individual e coletivo durante a realização dos experimentos propostos.

Instruções: Marque a alternativa que melhor representa sua opinião em relação às afirmações abaixo.

PARTE I – AUTOAVALIAÇÃO

AFIRMAÇÕES	1	2	3	4	5
1. Participei ativamente de todas as etapas dos experimentos.					
2. Contribuí com ideias, sugestões e ajudei meus colegas.					
3. Compreendi os conceitos de Física envolvidos nos experimentos.					
4. Demonstrei autonomia para resolver problemas durante as atividades.					
5. Senti-me motivado(a) ao participar das atividades experimentais.					

Reflexão final:

O que aprendi de mais importante nesta atividade foi:

PARTE II – COAVALIAÇÃO (DESEMPENHO DO GRUPO)

AFIRMAÇÕES	1	2	3	4	5
1. Meu grupo trabalhou de forma colaborativa e respeitosa.					
2. Todos os integrantes participaram das tarefas de maneira equilibrada.					
3. O grupo conseguiu superar os desafios enfrentados de forma criativa.					
4. Houve boa comunicação e escuta entre os membros do grupo.					

Reflexão:

Pontos fortes do grupo:

O que poderia ser melhorado:

APÊNDICE C - Modelo de Diário de Bordo / Portfólio do Grupo

Objetivo: Registrar o processo de construção do conhecimento e promover autorreflexão contínua, de acordo com a abordagem construcionista.

Grupo: _____

Data: _____

- Objetivo da aula:

- Resumo das atividades realizadas:

- Principais dificuldades encontradas:

- Como resolvemos os problemas:

- Aprendizados significativos do dia:

- Ideias para as próximas etapas / sugestões de melhoria:

- Impressões pessoais (curiosidades, sentimentos, destaques):

APÊNDICE D - QUESTIONÁRIO PÓS-TESTE

Objetivo: Avaliar o que os alunos aprenderam com o **roteiro de aprendizagem ativa** sobre a constante de Planck, bem como suas percepções sobre a metodologia utilizada.

1. O que é a constante de Planck e qual é sua importância na Física Quântica?

2. O que você compreendeu sobre a relação entre energia e frequência de uma radiação eletromagnética?

- ☐ Quanto maior a energia, menor a frequência.
- ☐ Quanto maior a frequência, maior a energia.
- ☐ Energia e frequência são grandezas independentes.
- ☐ Não sei responder.

3. Aponte abaixo o uso correto da equação $E = h\nu$:

- ☐ Calcular a velocidade da luz.
- ☐ Relacionar a energia de um fóton com sua frequência.
- ☐ Medir a massa de uma partícula.
- ☐ Não sei.

4. Durante os experimentos, você conseguiu compreender como a constante de Planck foi determinada?

- ☐ Sim, completamente.
- ☐ Parcialmente.
- ☐ Não entendi.
- ☐ Não participei dos experimentos.

5. Em relação ao uso do Arduino nos experimentos, como você avalia sua contribuição para a atividade?

- ☐ Tornou a atividade mais compreensível e interessante.
- ☐ Ajudou, mas foi difícil de entender no início.
- ☐ Não fez diferença para meu aprendizado.
- ☐ Foi confuso e dificultou minha compreensão.

6. Você acredita que aprendeu mais com esta atividade prática do que aprenderia apenas com aulas teóricas?

- ☐ Sim, com certeza.
- ☐ Em parte.
- ☐ Não, prefiro aulas teóricas.
- ☐ Não tenho opinião formada.

7. O que foi mais desafiador para você durante os experimentos?

8. Em uma escala de 1 a 5, como você avalia seu nível de aprendizado alcançado com este Roteiro de aprendizagem ativa?

- ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5

9. Qual foi a parte mais interessante da atividade para você?

10. Você gostaria de participar de outras atividades experimentais como está no futuro?

- ☐ Sim ☐ Talvez ☐ Não

APÊNDICE E - RUBRICA DE AVALIAÇÃO DA APRESENTAÇÃO FINAL DO EXPERIMENTO

Objetivo: Avaliar o desempenho dos grupos na apresentação final do experimento com base em critérios pedagógicos e científicos.

CRITÉRIO	1 (DT)	2 (DP)	3 (N)	4 (CP)	5 (CT)
Clareza na explicação dos objetivos do experimento					
Correta aplicação dos conceitos de Física					
Qualidade da análise dos dados e discussão dos resultados					
Capacidade de argumentação e resposta às perguntas					
Criatividade na apresentação e na montagem experimental					
Reflexão crítica sobre o processo de aprendizagem					
Cooperação, organização e divisão de tarefas no grupo					

Legenda: DT – Discordo totalmente | DP – Discordo parcialmente | N – Neutro | CP – Concordo parcialmente | CT – Concordo totalmente

Comentários do avaliador:

APÊNDICE F – BANCO ÓPTICO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO

INTRODUÇÃO

O estudo dos fenômenos de difração e interferência da luz é fundamental para a compreensão da natureza ondulatória da radiação eletromagnética. A construção de um banco óptico com materiais de baixo custo, associado a uma rede de difração caseira feita a partir de um CD, constitui uma alternativa acessível e didática para experimentos em sala de aula. Segundo Santos (2014), esse tipo de abordagem permite não apenas reduzir custos, mas também estimular a criatividade e o engajamento dos alunos, aproximando-os da prática científica.

O objetivo deste experimento é comparar os resultados obtidos com uma rede de difração laboratorial e com a rede construída a partir do CD, analisando a eficácia e a precisão de cada uma na determinação de comprimentos de onda da luz laser.

MATERIAIS

Para a rede de difração caseira:

- 1 CD gravável (preferencialmente virgem, para facilitar a remoção da camada refletora);
- 1 latinha de alumínio (refrigerante ou similar, para suporte);
- Fita adesiva;
- Estilete;
- Régua e marcador.

Para a montagem do banco óptico linear:

- 1 ripa de madeira (aprox. 2,5 m de comprimento);
- Régua metálicas (30 cm cada, usadas como guias);
- Estrutura em forma de "U" para sustentação da rede de difração;
- Peça de madeira (10 cm de altura $\times$ 5 cm de largura);
- Parafuso;
- Laser de diodo;
- Anteparo (parede branca ou tela).

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1. Construção da rede de difração caseira

- Utilize a fita adesiva para retirar cuidadosamente a camada refletora do CD até deixá-lo totalmente transparente.

- Com o estilete, corte um retângulo de aproximadamente $3\text{ cm} \times 2\text{ cm}$, no sentido radial do CD, pois as ranhuras dispostas nessa direção funcionam como a rede de difração.
- Prepare uma estrutura de suporte utilizando a lata de alumínio ou madeira, de modo a fixar o pedaço de CD com fita adesiva, garantindo firmeza e alinhamento para a passagem do feixe de laser.

2. Montagem do banco óptico linear

- Fixe as réguas metálicas ao longo da ripa de madeira, formando um barramento linear para facilitar o alinhamento dos componentes.
- Instale a estrutura em “U” sobre a ripa para sustentar a rede de difração (laboratorial ou caseira).
- Posicione o pedaço de madeira com parafuso para ajustar a altura da rede de difração, garantindo que o feixe de laser passe exatamente pelo centro.
- Coloque o laser de diodo alinhado com a rede de difração, direcionando o feixe para o anteparo.
- Ajuste as distâncias entre o laser, a rede e o anteparo de modo que os máximos de difração fiquem visíveis e possam ser medidos com precisão.

3. Coleta de dados

- Acione o laser de diodo e observe no anteparo o padrão de difração formado.
- Meça a distância entre o máximo central e os máximos de primeira e segunda ordem ($m = 1, 2$) utilizando uma régua ou trena.
- Registre também a distância entre a rede de difração e o anteparo, necessária para calcular o ângulo de difração (θ).
- Repita o procedimento utilizando tanto a rede laboratorial quanto a rede caseira (CD).

ENCERRAMENTO E ANÁLISE

Com os dados coletados, calcule o comprimento de onda do laser a partir da equação da difração:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

em que d é a distância entre as ranhuras da rede (1/número de linhas por metro), θ é o ângulo de difração, m a ordem do máximo observado e λ o comprimento de onda da luz.

Compare os resultados obtidos com a rede laboratorial e a rede caseira, discutindo:

- A proximidade dos valores com o comprimento de onda teórico do laser utilizado;
- A influência da precisão dos materiais de baixo custo no experimento;
- As principais fontes de erro, como desalinhamento do laser, imperfeições no CD e dificuldades de medição dos ângulos.

Por fim, conclua se a rede caseira é eficaz como alternativa pedagógica para o estudo de fenômenos ópticos e qual a sua contribuição para democratizar o ensino de Física experimental.

APÊNDICE G – MAQUETE EXPERIMENTAL CONSTRUÍDA COM ARDUINO E BANCO ÓPTICO

INTRODUÇÃO

A maquete experimental desenvolvida neste estudo tem como objetivo proporcionar um ambiente controlado e replicável para a investigação de fenômenos ópticos utilizando a plataforma **Arduino**. A integração da automação com materiais acessíveis possibilita a repetibilidade das condições experimentais e amplia a aplicabilidade do experimento em contextos educacionais com poucos recursos.

Por meio desta prática, os alunos podem compreender conceitos fundamentais da **Física Moderna**, como a difração da luz, a quantização de energia e a determinação da **constante de Planck**, ao mesmo tempo em que exploram a relação entre ciência, tecnologia e ensino democrático.

MATERIAIS E MÉTODOS

Redes de difração: comercial e de baixo custo

Foram utilizadas duas redes de difração distintas:

- **Rede comercial:** apresenta espaçamento uniforme entre ranhuras, garantindo maior precisão nas medições de ângulos de difração e nos cálculos de comprimento de onda.
- **Rede caseira (CD):** confeccionada a partir de um disco compacto, apresenta variações no espaçamento das ranhuras, o que pode comprometer parcialmente a exatidão das medições, mas representa uma alternativa de baixo custo viável em ambientes didáticos.

A comparação entre os dois tipos de rede permite avaliar o equilíbrio entre precisão e acessibilidade no ensino experimental.

ESTRUTURA DA MAQUETE EXPERIMENTAL

A maquete foi construída de forma a simular um **banco óptico linear**, utilizando materiais de baixo custo, mas garantindo estabilidade e alinhamento do feixe de laser. Seus principais componentes são:

- **Banco óptico:** ripa de madeira com réguas metálicas fixadas, servindo como guia linear;
- **Suporte do laser:** assegura que o feixe esteja centralizado em relação à rede;
- **Rede de difração:** comercial ou caseira, fixada de forma estável;
- **Anteparo com régua milimetrada:** permite a medição das distâncias entre máximos de difração;
- **Arduino:** automatiza a coleta de dados e envia as informações ao computador;
- **Computador:** exibe os resultados em tempo real e auxilia na análise dos dados.

PROCEDIMENTO DE MONTAGEM

1. Monte o **banco óptico linear**, fixando as réguas metálicas sobre a ripa de madeira.
2. Posicione o **suporte do laser** de forma que o feixe incida perpendicularmente sobre a rede de difração.
3. Fixe a **rede de difração** (primeiro a comercial, depois a caseira) no suporte adequado.
4. Direcione o feixe para o **anteparo**, observando a formação do **padrão de difração**.
5. Meça com a régua milimetrada a distância entre o máximo central e os máximos de difração ($m = 1, 2, \dots$).
6. Conecte o **Arduino** ao sensor de luz e ao computador, registrando automaticamente as intensidades luminosas e a posição dos máximos de difração.
7. Salve os dados obtidos para análise posterior.

ANÁLISE, DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Com os dados coletados, os alunos deverão:

1. **Calcular o comprimento de onda da luz** utilizando a equação da difração:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

em que d é o espaçamento entre ranhuras da rede, θ é o ângulo de difração, m a ordem do máximo observado e λ o comprimento de onda.

2. **Comparar os valores experimentais** obtidos com a rede comercial e com a rede caseira, discutindo a precisão e a confiabilidade de cada uma.
3. Refletir sobre o papel do **Arduino na coleta de dados**, destacando como a automação aumenta a reprodutibilidade e facilita a análise gráfica dos resultados.
4. Relacionar os resultados ao contexto da **física moderna**, compreendendo que a quantização da energia e a determinação da **constante de Planck** só foram possíveis graças a experimentos semelhantes, que unem teoria e prática.
5. Concluir sobre a **viabilidade pedagógica** do uso de materiais de baixo custo e de tecnologias acessíveis no ensino médio, reconhecendo seus benefícios para o aprendizado ativo e para a democratização da ciência.