

GABRIEL SERRÃO PENHA • EDSON DE CARVALHO

ROTEIRO DE
APRENDIZAGEM ATIVA
PARA A INVESTIGAÇÃO DO **QUANTUM**

DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE PLANCK

POR MEIO DE EXPERIMENTOS ACESSÍVEIS
NO ENSINO MÉDIO

$$E = hf$$



EDUFMA

ROTEIRO DE
APRENDIZAGEM ATIVA

PARA A INVESTIGAÇÃO DO **QUANTUM**

DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE PLANCK
POR MEIO DE EXPERIMENTOS ACESSÍVEIS
————— NO ENSINO MÉDIO —————



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Reitor Prof. Dr. Fernando Carvalho Silva
Vice-Reitor Prof. Dr. Leonardo Silva Soares



SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

Diretor Prof. Dr. César Augusto Castro



EDUFMA

EDITORA DA UFMA

Coordenadora Irenilma Cadête Lima
Conselho Editorial Profa. Dra. Andréa Katiane Ferreira Costa
Profa. Dra. Débora Batista Pinheiro Sousa
Prof. Dr. Edson Ferreira da Costa
Prof. Dr. José Carlos Aragão Silva
Profa. Dra. Jussara Danielle Martins Aires
Profa. Dra. Karina Almeida de Sousa
Prof. Dr. Luís Henrique Serra
Prof. Dr. Luiz Eduardo Neves dos Santos
Profa. Dra. Luma Castro de Souza
Prof. Dr. Márcio José Celeri
Profa. Dra. Maria Áurea Lira Feitosa
Profa. Dra. Raimunda Ramos Marinho
Profa. Dra. Rosângela Fernandes Lucena Batista
Bibliotecária Márcia Cristina da Cruz Pereira



Associação Brasileira das Editoras Universitárias



All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento 4.0.

GABRIEL SERRÃO PENHA · EDSON DE CARVALHO

ROTEIRO DE
APRENDIZAGEM ATIVA
PARA A **INVESTIGAÇÃO** DO **QUANTUM**

DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE PLANCK
POR MEIO DE EXPERIMENTOS ACESSÍVEIS
— NO ENSINO MÉDIO —

São Luís



EDUFMA

2026

© 2026 EDUFMA - Todos os direitos reservados

Projeto Gráfico, diagramação e capa Edson de Carvalho
Revisão Edson de Carvalho
Imagem: Arquivo pessoal, com ajustes realizados por Inteligência Artificial.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Penha, Gabriel Serrão

ROTEIRO DE APRENDIZAGEM ATIVA PARA A INVESTIGAÇÃO DO QUANTUM: determinação da constante de Planck por meio de experimentos acessíveis no ensino médio [recurso eletrônico] / Gabriel Serrão Penha, Edson de Carvalho. — São Luís: EDUFMA, 2026.

73 p.: il.

Modo de acesso: world wide web

ISBN: 978-65-5363-564-7

1. Física moderna. 2. Física do Experimento. 3. Física quântica. 4. Ensino de Física. I. Carvalho, Edson de. II. Título.

CDD 530.1

CDU 530.1:37

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBi/UFMA
Bibliotecária: Jousiane Leite Lima - CRB 13/700

CRIADO NO BRASIL [2026]

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte deste livro pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação ou transmitida de qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotocópia, microfilmagem, gravação ou outro, sem permissão do autor.

| EDUFMA | EDITORA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
Av. dos Portugueses, 1966 | Vila Bacanga CEP: 65080-805 | São Luís | MA | Brasil
Telefone: (98) 3272-8157
www.edufma.ufma.br | edufma@ufma.br

AGRADECIMENTOS

Ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF)
À Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da UFMA (PROFIS)
À Superintendência de Tecnologias na Educação (STED) da UFMA

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA)

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	9
UMA CONVERSA ANTES DE COMEÇAR	12
1 POR QUE ENSINAR FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO?	13
1.1 O Problema com o Ensino Tradicional	13
1.2 Fundamentos Teóricos da Proposta	14
1.3 Competências da BNCC Desenvolvidas neste Roteiro	15
2 A FÍSICA DO EXPERIMENTO: FUNDAMENTOS DETALHADOS	16
2.1 A Crise da Física Clássica: Radiação do Corpo Negro	16
2.1.1 A Hipótese de Planck: Quantização da Energia	17
2.2 O Fóton: Einstein e o Efeito Fotoelétrico	18
2.3 Difração da Luz e a Equação Fundamental da Rede	19
2.4 O Diodo Laser: Emissão Estimulada e Tensão Limiar	21
2.4.1 Derivação Completa da Equação Experimental de h	22
2.5 O Circuito Arduino: PWM, Filtro RC e Aquisição de Dados	23
3 MATERIAIS, MONTAGEM DO CIRCUITO E CÓDIGO ARDUINO	26
3.1 Lista de Materiais — Experimento com Arduino	26
3.2 Lista de Materiais — Banco Ótico Artesanal	27
3.3 Instalação de Software	28
3.4 Montagem do Circuito — Guia Passo a Passo	28
3.5 Código Arduino — Varredura $I \times V$ com Saída PLX-DAQ	31
3.5.1 Como ler o código linha a linha	32
3.5.2 A Comunicação Serial e o Uso do PLX-DAQ	33
4 ROTEIRO DETALHADO DAS 7 AULAS	35
4.1 AULA 1 — Física Moderna: Por Que Isso Importa?	36
4.1.1 Minutos 0–15 — Diagnóstico inicial (Questionário A)	36
4.1.2 Minutos 15–50 — A Catástrofe do Ultravioleta como narrativa	37
4.1.3 Minutos 50–80 — Conexão com tecnologia cotidiana	37
4.1.4 Minutos 80–100 — Questionário A e fechamento	37
4.2 AULA 2 — Conhecendo o Arduino	38
4.2.1 Minutos 0–20 — Exploração física da placa	38
4.2.2 Minutos 20–60 — LED piscando e introdução ao PWM	38
4.2.3 Minutos 60–90 — Montagem do circuito do experimento	39

4.2.4	Mínutos 90–100 — Questionário B e fechamento	39
4.3	AULA 3 — Luz, Ondas e Difração	39
4.3.1	Mínutos 0–30 — Introdução histórica e exposição da teoria ondulatória	40
4.3.2	Mínutos 30–70 — Demonstração investigativa com laser e CD	40
4.3.3	Mínutos 70–90 — Cálculo de λ com a turma	40
4.3.4	Mínutos 90–100 — Questionário C e fechamento	41
4.4	AULAS 4 e 5 — Os Experimentos	41
4.5	AULA 6 — Calculando a Constante de Planck	42
4.6	AULA 7 — Apresentações e Reflexão Final	42
5	AVALIAÇÃO FORMATIVA: INSTRUMENTOS E ORIENTAÇÕES	44
5.1	Como Interpretar o Pós-Teste: o Ganho Normalizado g	45
5.2	Como Ler o Diário de Bordo (Ficha F)	45
5.3	CrITÉRIOS para CompOR Nota (opcional)	46
	REFERÊNCIAS – GUIA DO PROFESSOR	47
6	FÍSICA MODERNA: O MUNDO DO MUITO PEQUENO.....	49
6.1	Questionário A — Verificação de Conceitos Iniciais.....	50
6.2	Leitura: A história que mudou a física	50
7	CONHECENDO O ARDUINO: SEU LABORATÓRIO DE BOLSO.....	52
7.1	O que é PWM e Por Que Precisamos?.....	53
7.2	Questionário B — Componentes Eletrônicos	53
7.3	Roteiro de Montagem do Circuito — Verifique Cada Etapa.....	53
8	LUZ, ONDAS E O MISTÉRIO DOS PONTOS COLORIDOS.....	55
8.1	O Fenômeno de Difração.....	55
8.2	Questionário C — Difração.....	57
9	MÃOS NA MASSA: COLETANDO OS DADOS.....	58
9.1	Como operar o PLX-DAQ para coletar dados	58
9.2	Experimento 1 — Rede Artesanal com CD (Aula 4).....	58
9.3	Experimento 2 — Rede Laboratorial (Aula 5).....	60
9.4	Ficha E — Coavaliação do Grupo.....	61
10	CALCULANDO A CONSTANTE DE PLANCK.....	62
10.1	Comparação e Análise dos Resultados	64
11	APRESENTAÇÃO FINAL: VOCÊ É O CIENTISTA.....	65
11.1	Roteiro de Preparação da Apresentação.....	65
11.2	Ficha D — Autoavaliação Individual	66
11.3	Questionário G — Pós-Teste	67
11.4	Ficha H — Avaliação de Apresentação.....	68

12 DIÁRIO DE BORDO — FICHA F.....	69
REFERÊNCIAS — CADERNO DO ESTUDANTE	72

APRESENTAÇÃO

Em 1900, Max Planck propôs uma ideia que ele mesmo chamou de "ato de desespero": a energia não flui de forma contínua, mas em pacotes discretos – os quanta. Essa hipótese, formulada para resolver um problema técnico de física teórica, abriu a porta da física moderna e está na origem de praticamente toda a tecnologia que define a vida contemporânea. O smartphone no bolso do aluno, a lâmpada de LED no teto da sala de aula, o painel solar no telhado da escola – tudo isso existe porque Planck ousou pensar diferente.

Este ebook nasce da convicção de que essa história não pode ficar restrita ao último bimestre do terceiro ano – aquele que, como sabe todo professor de física do ensino médio, raramente chega. Nasce também da crença concreta, demonstrada experimentalmente, de que é possível medir a constante de Planck com um CD velho, um apontador laser de R\$ 15,00, um Arduino Uno e uma planilha de Excel – com erro relativo inferior a 4% em condições de laboratório escolar.

Mas este não é apenas um experimento. É um roteiro de aprendizagem ativa: uma sequência de sete aulas estruturadas para que o aluno vivencie o processo científico real, do início ao fim. Ele formula hipóteses, monta circuitos, coleta dados, identifica erros, calcula resultados e apresenta suas descobertas para a turma. A teoria, aqui, nasce do experimento – não o contrário.

O material está organizado em duas partes complementares e inseparáveis. A **Parte 1 – Guia Completo do Professor** oferece os fundamentos pedagógicos da proposta (construcionismo, aprendizagem ativa, alinhamento com a BNCC), a física do experimento em profundidade suficiente para que o professor conduza as aulas com segurança, o roteiro detalhado das sete aulas com scripts e objetivos, os esquemas de montagem do circuito e o código Arduino comentado, e os instrumentos de avaliação formativa com critérios de interpretação. A **Parte 2 – Caderno de Atividades do Estudante** é o documento do aluno: um caderno de trabalho com atividades diagnósticas, roteiros de montagem e coleta, fichas de registro e um diário de bordo que acompanha toda a sequência. Este caderno pertence ao estudante – e é feito para ser escrito, rabiscado e marcado.

Os autores são pesquisadores do ensino de física com experiência direta em sala de aula pública. Este material é resultado de uma investigação conduzida no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) por Gabriel Penha e Edson de Carvalho (2025), com aplicação real em turmas do ensino médio e avaliação sistemática do aprendizado por meio do ganho normalizado proposto por Hake (1998). Não é teoria sobre o que poderia funcionar – é

registro do que funcionou.

A física quântica não deve ser vista como um privilégio restrito àqueles que pretendem ingressar em cursos de Física. Seus fundamentos estão presentes na Química moderna e em diversas Engenharias e áreas tecnológicas, refletindo-se em inúmeros aspectos do mundo contemporâneo. Trata-se, portanto, de um conhecimento que faz parte da realidade em que os jovens já estão inseridos. Nesse sentido, este roteiro propõe-se como um convite para que o professor traga esse universo para a sala de aula, promovendo uma abordagem rigorosa, cuidadosa e, sobretudo, baseada na experimentação e na participação ativa dos estudantes.

Edson de Carvalho



INVESTIGANDO A CONSTANTE DE PLANCK

Guia Completo do Professor

PARTE 1

Fundamentos pedagógicos · Física detalhada · Roteiro de 7 aulas · Avaliação · Referências

O que você encontra neste guia

- Contexto pedagógico e curricular com referências ABNT em todo o texto
- Física aprofundada: derivações completas da lei de Planck, difração e equação experimental de h
- Funcionamento do diodo laser e da tensão limiar explicado passo a passo
- Filtro RC, PWM e ADC do Arduino com equações e fundamento teórico
- Roteiro das 7 aulas com scripts, objetivos e avaliação formativa



A validação dos experimentos e procedimentos detalhados de coleta e análise de dados encontram-se na obra de Penha (2025).

UMA CONVERSA ANTES DE COMEÇAR

Professor(a),

Sei que o ensino médio não é fácil. Turmas grandes, laboratórios sucateados, duas aulas de Física por semana ou às vezes uma, e ainda a cobrança para dar todo o conteúdo. Como destaca Moreira (2021, p. e20200451), **"a Física Moderna raramente chega à sala de aula do ensino médio, e quando chega, o faz de forma superficial, como apêndice de um currículo que termina em Maxwell"**. A Física Moderna costuma ficar para o final do ano – e o final do ano nunca chega.

Este material nasceu dessa realidade. Da crença de que é possível medir a constante de Planck – um dos conceitos mais fundamentais da física do século XX – com um CD velho, um apontador laser de R\$ 15,00, um Arduino Uno e um computador com Excel. E não de qualquer jeito: com precisão científica real, com erro relativo inferior a 4%, conforme demonstrado experimentalmente por Oliveira *et al.* (2020, p. 843) em condições de laboratório escolar equivalentes às descritas aqui.

Mais do que um experimento, o que este roteiro propõe é uma experiência: colocar o aluno do ensino médio na posição de quem faz ciência – formula hipóteses, coleta dados, identifica fontes de erro e comunica resultados. Neves (1998, p. 73) já alertava que o ensino de física desconectado de sua história **"produz uma imagem deformada da ciência, como um conjunto de verdades acabadas, sem processo, sem dúvida e sem criatividade"**. Este roteiro inverte essa lógica: a teoria nasce do experimento, não o contrário.

Por que a Constante de Planck?

Porque $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ não é uma fórmula de prova – é a constante fundamental que governa toda troca de energia entre matéria e radiação eletromagnética em escala atômica. Como sintetizam Caruso e Oguri (2016, p. 3), **"os fundamentos da física quântica estão incorporados de forma irreversível à civilização tecnológica contemporânea"**. LEDs, lasers, câmeras digitais, painéis solares e telas OLED – tudo governado por h .

Boa jornada. O quantum está esperando.

Edson de Carvalho

PARTE 1 — FUNDAMENTOS

1 POR QUE ENSINAR FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO?

A Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2018, p. 553) prevê explicitamente que os estudantes do ensino médio devem "compreender as bases conceituais e históricas da física moderna que fundamentam as tecnologias contemporâneas". Quando esse conteúdo é negligenciado, envia-se a mensagem implícita de que a ciência terminou em Newton – um anacronismo formativo com consequências reais para o letramento científico dos jovens.

A urgência se justifica economicamente: Caruso e Oguri (2016, p. 3) demonstram que **"os fundamentos da física quântica estão incorporados de forma irreversível à civilização tecnológica contemporânea, e sua ausência no currículo do ensino médio representa uma lacuna formativa grave"**. Smartphones, câmeras digitais, fibras ópticas, lasers industriais, tomógrafos por ressonância magnética e painéis fotovoltaicos – toda essa infraestrutura tecnológica tem raízes diretas na hipótese da quantização proposta por Planck em 1900.

1.1 O Problema com o Ensino Tradicional

Quando a Física Moderna é abordada no ensino médio, aparece geralmente como apêndice no último bimestre, tratada em dois ou três slides com fórmulas que o aluno decora sem compreender. O resultado é previsível: h vira "seis vírgula seis dois seis vezes dez elevado a menos trinta e quatro" – um número sem história, sem significado, sem conexão com nada. Moreira (2021, p. e20200451) confirma que estudantes chegam à universidade sem qualquer modelo mental para fenômenos quânticos, mesmo após anos de escolarização em ciências.

Neves (1998, p. 73) apontava décadas atrás que o ensino de física desconectado de sua história e contexto social **"produz uma imagem deformada da ciência, como um conjunto de verdades acabadas, sem processo, sem dúvida e sem criatividade"**. O problema não está no conteúdo – está na abordagem.

O experimento como ponto de partida

Nesta proposta, a teoria nasce do experimento – não o contrário. Os alunos primeiro montam, observam e medem. Só depois o professor nomeia e formaliza o que eles viram. Isso inverte a lógica expositiva tradicional de forma intencional, alinhando-se ao que Oliveira *et al.* (2020, p. 829) denominam "abordagem investigativa orientada por problemas reais de medição" – uma das estratégias de maior eficácia documentada no ensino de física.

1.2 Fundamentos Teóricos da Proposta

Jean Piaget demonstrou que o conhecimento não é transmitido passivamente – é construído pelo sujeito por meio da interação ativa com o objeto. Dois mecanismos centrais operam nesse processo: a **assimilação**, pela qual o aprendiz incorpora novas informações às estruturas cognitivas existentes, e a **acomodação**, pela qual essas estruturas se reorganizam para integrar o que contradiz o esquema anterior. Para o ensino de ciências, isso significa que o aluno aprende de forma mais profunda quando enfrenta situações que perturbam seu equilíbrio cognitivo – como um resultado experimental inesperado (CARUSO; OGURI, 2016, p. 12). A demonstração da difração com CD opera exatamente dessa maneira: o aluno espera um ponto luminoso único e recebe vários, criando o desequilíbrio que Piaget considerava condição necessária para a aprendizagem genuína.

Seymour Papert desenvolveu o construcionismo a partir da base piagetiana, acrescentando um elemento central: a aprendizagem mais profunda ocorre quando o aprendiz constrói algo tangível para compartilhar com outros – um artefato que existe no mundo além da mente do sujeito. Nas palavras do próprio Papert (1980, p. 8), **"a melhor aprendizagem ocorre quando o aprendiz toma consciência de que está construindo algo partilhável com o mundo"**. O banco ótico artesanal, o circuito eletrônico no protoboard, os gráficos gerados no Excel e a apresentação final são, nesse sentido, artefatos construcionistas: objetos reais, construídos pelos alunos, que existem além da aula e podem ser mostrados, discutidos e criticados.

Resnick (2017, p. 10) atualiza essa perspectiva com o conceito de **"espiral criativa"**: imaginar → criar → brincar → compartilhar → refletir → reimaginar. Este roteiro percorre deliberadamente esse ciclo ao longo das sete aulas: a Aula 1 ativa o imaginar (o que é a física quântica e por que ela importa?); as Aulas 2–5 mobilizam o criar e o brincar (construir e operar o experimento); a Aula 6 sustenta o refletir (calcular e analisar erros); e a Aula 7 concretiza o compartilhar (apresentação pública dos resultados).

Resumindo a Pedagogia em Uma Frase

"Diga-me e eu esqueço. Ensine-me e eu me lembro. Envolve-me e eu aprendo." Este roteiro é fundamentalmente sobre envolvimento ativo – o que Moreira (2021, p. e20200451) identifica como condição necessária para o desenvolvimento do pensamento científico autêntico, e que a BNCC (BRASIL, 2018) formaliza como competências gerais a serem desenvolvidas na educação básica.

1.3 Competências da BNCC Desenvolvidas neste Roteiro

Tabela 1: Competências da BNCC desenvolvidas ao longo das 7 aulas

Competência (BRASIL, 2018)	Como aparece nas aulas	Referência
Pensamento científico e crítico	Formular hipóteses, coletar dados, calcular erros relativos	BRASIL (2018)
Raciocínio e resolução de problemas	Programar o Arduino, depurar erros de código	MARTINAZZO <i>et al.</i> (2014)
Comunicação e argumentação	Apresentar resultados à turma com evidências	BRASIL (2018)
Cultura digital	Arduino, PLX-DAQ, Excel, simulações PhET	OLIVEIRA <i>et al.</i> (2020)
Autogestão e colaboração	Trabalho em grupos com papéis definidos e coavaliação	RESNICK (2017)
Criatividade e autonomia	Banco ótico com materiais alternativos	PAPERT (1980)

Fonte: Autoria própria.

2 A FÍSICA DO EXPERIMENTO: FUNDAMENTOS DETALHADOS

Esta seção apresenta a física do experimento com profundidade suficiente para que o professor conduza as aulas com segurança, responda às perguntas mais avançadas dos alunos e compreenda a origem e as limitações das equações utilizadas. Os conceitos estão organizados na sequência didática em que aparecem nas aulas e são referenciados segundo as melhores obras disponíveis.

2.1 A Crise da Física Clássica: Radiação do Corpo Negro

Um **corpo negro ideal** é um objeto que absorve toda a radiação eletromagnética incidente, independentemente da frequência e do ângulo de incidência. Quando aquecido, ele reemite energia na forma de radiação com uma distribuição espectral que depende exclusivamente da temperatura absoluta T – não da composição do material nem de sua forma. Essa propriedade torna o corpo negro um objeto teórico fundamental: ele define o padrão de emissão térmica contra o qual qualquer objeto real pode ser comparado. Na prática, um pequeno orifício numa cavidade fechada aquecida é uma boa aproximação (TIPLER; LLEWELLYN, 2014, p. 84).

No final do século XIX, os físicos tinham à disposição dados experimentais precisos sobre o espectro do corpo negro: a energia irradiada crescia com a temperatura, atingia um pico em uma frequência que dependia de T (lei de Wien: $\lambda_{\text{máx}} \cdot T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$), e depois decaía para zero em altas frequências. A curva experimental era bem determinada e reproduzível. O problema era explicá-la teoricamente.

Lord Rayleigh (1900) e James Jeans (1905) derivaram a densidade espectral de energia diretamente da mecânica estatística clássica, aplicando o **teorema da equipartição de energia**: cada modo normal de oscilação do campo eletromagnético dentro da cavidade recebe, em média, energia $k_B T$, em que $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ é a constante de Boltzmann. Como o número de modos por unidade de frequência cresce com f^2 , a densidade espectral predita é:

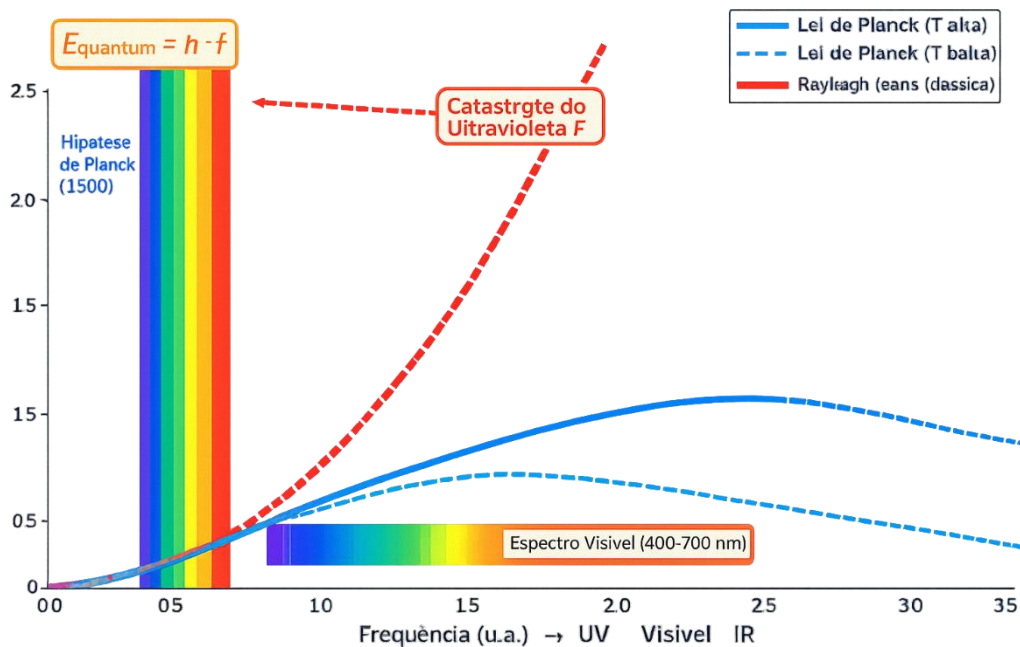
$$u_{RJ}(f, T) = \left(\frac{8\pi f^2}{c^3} \right) \times k_B \times T$$

Lei de Rayleigh-Jeans: u → densidade espectral de energia; f → frequência; c → velocidade da luz; k_B → constante de Boltzmann; T → temperatura (K)

Para baixas frequências (infravermelho e microondas), essa expressão concorda com os dados. Para altas frequências (azul e ultravioleta), ela prevê que u cresce sem limite proporcional a f^2 , e que a energia total emitida – obtida integrando u sobre todas as frequências – diverge para o

infinito. Tipler e Llewellyn (2014, p. 88) descrevem esse resultado como **"a crise mais profunda da física clássica, que só poderia ser resolvida com uma ruptura conceitual radical"**. O fenômeno foi batizado de **Catástrofe do Ultravioleta** por Paul Ehrenfest em 1911.

Figura 1: Espectro do corpo negro: Lei de Planck vs. Rayleigh-Jeans (Catástrofe do Ultravioleta)



Fonte: Adaptado de TIPLER & LLEWELLYN (2014).

📌 Para contextualizar em sala

Peça que os alunos imaginem uma fogueira. A brasa emite mais luz na faixa laranja-vermelha do que na azul ou ultravioleta. Se a lei de Rayleigh-Jeans estivesse certa, qualquer objeto aquecido emitiria predominantemente em altas frequências – e olhar para uma vela seria tão perigoso quanto olhar para uma fonte de raios UV industriais. A experiência cotidiana já refutava a teoria clássica (CARUSO; OGURI, 2016, p. 87). Isso é uma excelente ilustração de como a física não funciona por autoridade, mas por confronto com a evidência.

2.1.1 A Hipótese de Planck: Quantização da Energia

Max Planck passou meses tentando derivar a fórmula experimental correta do espectro do corpo negro a partir dos princípios da termodinâmica clássica. Em 14 de dezembro de 1900, apresentou à Sociedade Alemã de Física uma solução que funcionava – mas que ele mesmo chamou de **"ato de desespero"**, pois violava um pressuposto da física clássica que ele considerava inviolável. Pais (1995, p. 438) narra que Planck confessou ao filho ter feito **"uma descoberta de primeira grandeza, talvez comparável apenas às descobertas de Newton"**, embora não soubesse ao certo o que havia descoberto.

A hipótese era: um oscilador de frequência f não pode ter qualquer valor de energia – só pode existir em estados discretos com energias $0, hf, 2hf, 3hf, \dots, nhf$. A energia mínima diferente de zero é:

$$E_{\text{quantum}} = h \times f$$

$E \rightarrow$ energia do quantum (J); $h \rightarrow$ constante de Planck (J·s); $f \rightarrow$ frequência da radiação (Hz)

Com essa hipótese, Planck foi capaz de derivar a distribuição espectral correta – a Lei de Planck completa:

$$u(f, T) = \left(\frac{8\pi hf^3}{c^3} \right) \times \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1}$$

Quando $hf \ll k_B T$: reproduz Rayleigh-Jeans. Quando $hf \gg k_B T$: o fator exponencial faz u decair para zero, evitando a catástrofe.

A constante h é o parâmetro que Planck ajustou para concordar com os dados experimentais. Seu valor exato, adotado pelo Sistema Internacional de Unidades desde a revisão de 2019, é $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J·s (TIPLER; LLEWELLYN, 2014, p. 96). Essa constante não é derivável – é uma constante fundamental da natureza, do mesmo status que a velocidade da luz c e a carga elementar e .

Analogia: a menor moeda de troca da natureza

" h é a menor moeda que a natureza aceita para uma transação de energia em frequência f . Você não pode pagar 0,7 quanta por um fóton – ou paga o preço inteiro $h \cdot f$, ou não compra nada. A natureza não dá troco e não faz parcelamento." – adaptado de Caruso e Oguri (2016, p. 97). Para frequências baixas (infravermelho), o quantum mínimo $h \cdot f$ é pequeno e a energia parece contínua – por isso a física clássica funcionava bem nessa faixa. Para frequências altas (ultravioleta), o quantum é grande demais para ser excitado termicamente, e a emissão cai exponencialmente – resolvendo a catástrofe.

2.2 O Fóton: Einstein e o Efeito Fotoelétrico

Planck introduziu a quantização como propriedade dos osciladores da matéria, não da luz em si – a luz, para ele, ainda era uma onda contínua. Em 1905, Einstein deu um passo mais radical ao propor que a própria radiação eletromagnética é quantizada: a luz é composta de **fótons**, cada um carregando energia $E = hf$, quantidade de movimento $p = h/\lambda$ e velocidade c . Com isso, Einstein explicou o **efeito fotoelétrico** – a emissão de elétrons por metais iluminados – de forma

completa e correta (PAIS, 1995).

A observação experimental contradizia a óptica clássica em dois pontos fundamentais. Primeiro, a emissão de elétrons depende da **frequência** da luz, não de sua intensidade: luz vermelha intensa não arranca elétrons de um metal onde luz ultravioleta fraca arranca. Segundo, a energia máxima dos elétrons emitidos aumenta linearmente com a frequência da luz incidente. Isso é exatamente o que $E = hf$ prediz: a equação do efeito fotoelétrico de Einstein é:

$$E_{c_{\text{máx}}} = h \cdot f - \Phi$$

$E_{c_{\text{máx}}}$ → energia cinética máxima do elétron emitido [J]; Φ → função trabalho do metal [J] – energia mínima para arrancar um elétron da superfície.

Se $hf < \Phi$, nenhum elétron é emitido, independentemente da intensidade. Millikan, em 1916, confirmou a linearidade de $E_{c_{\text{máx}}}$ com f com alta precisão, determinando h com erro inferior a 1% (TIPLER; LLEWELLYN, 2014, p. 102). Pelo conjunto das contribuições à física quântica, Einstein recebeu o Nobel de Física de 1921 – não pela relatividade, mas pelo efeito fotoelétrico.

A conexão com o experimento deste roteiro é direta: no diodo laser, o campo elétrico da tensão U_0 fornece a cada elétron uma energia eU_0 , em que $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C é a carga elementar. Na tensão limiar, toda essa energia é convertida em um fóton de frequência f . Portanto, $eU_0 \approx hf$, o que nos permite calcular h sem nenhum equipamento especial além de um voltímetro (neste caso, o ADC do Arduino) e uma rede de difração para determinar f (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 831).

2.3 Difração da Luz e a Equação Fundamental da Rede

A **difração** é o espalhamento de uma onda ao contornar um obstáculo ou ao passar por uma abertura cujas dimensões são comparáveis ao comprimento de onda. Para a luz visível ($\lambda \approx 400 - 700$ nm), isso exige estruturas na escala de décimos de micrômetro a poucos micrômetros. Thomas Young demonstrou em 1801 que ao fazer a luz solar passar por duas fendas próximas, aparecia no anteparo um padrão de franjas claras e escuras – interferência construtiva e destrutiva –, provando experimentalmente o comportamento ondulatório da luz (HECHT, 2017, p. 389).

Uma **rede de difração** consiste em um grande número N de ranhuras paralelas igualmente espaçadas, com passo d (distância entre ranhuras consecutivas). Quando luz monocromática de comprimento de onda λ incide perpendicularmente à rede, cada ranhura atua como fonte secundária de ondas esféricas – esse é o **Princípio de Huygens-Fresnel** (HECHT, 2017, p. 455). A condição para que essas ondas secundárias interfiram **construtivamente** numa direção θ é que a diferença de caminho óptico entre ondas originadas em ranhuras adjacentes seja igual a um múltiplo inteiro

m do comprimento de onda:

$$d \cdot \text{sen}(\theta_m) = m \cdot \lambda$$

$d \rightarrow$ passo da rede (m); $\theta_m \rightarrow$ ângulo do máximo de ordem m (graus ou rad); $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (ordem); $\lambda \rightarrow$ comprimento de onda (m)

O máximo central ($m = 0$) ocorre em $\theta = 0$ – diretamente à frente. Os máximos de primeira ordem ($m = \pm 1$) ocorrem simetricamente dos dois lados. Para $m = 1$, a equação fica $\lambda = d \cdot \text{sen}(\theta_1)$, que é a expressão usada no experimento para determinar λ a partir de θ_1 .

No arranjo experimental deste roteiro, o laser incide perpendicularmente à rede e o anteparo está a uma distância L . Mede-se a distância y_1 entre o máximo central e o máximo de primeira ordem. O ângulo θ_1 é então:

$$\tan(\theta_1) = \frac{y_1}{L} \rightarrow \text{sen}(\theta_1) = \frac{y_1}{\sqrt{y_1^2 + L^2}}$$

Expressão exata – não requer calculadora científica, apenas as medidas y_1 e L com régua

Hecht (2017, p. 465) recomenda usar o máximo de primeira ordem ($m = 1$) e distâncias $L \geq 50$ cm para minimizar o erro relativo na medição de y_1 . A vantagem de L grande é que um erro de leitura absoluto (digamos, ± 1 mm em y_1) representa um erro proporcional menor em $\text{sen}(\theta_1)$. Essa é uma boa oportunidade para discutir **propagação de incertezas** com os alunos: se δy_1 é a incerteza em y_1 , então $\delta \text{sen}(\theta_1) \approx \delta y_1 \cdot L / \sqrt{y_1^2 + L^2}$, que diminui com L crescente.

Um CD inutilizado pode funcionar como uma **rede de difração por reflexão**, pois seus sulcos em espiral apresentam um passo médio de aproximadamente $d \approx 1,6 \times 10^{-6} = 1,6 \mu\text{m}$, valor definido pelo padrão industrial dos discos CD-ROM (capacidade de 650 MB ou 74 min). Embora o disco opere com **velocidade linear constante**, o espaçamento médio entre trilhas mantém-se praticamente uniforme ao longo de toda a superfície, característica que possibilita seu uso como rede de difração. Pequenas variações decorrentes do processo de fabricação podem introduzir erros inferiores a 5%. De acordo com Santos *et al.* (2015), para comprimentos de onda na região do visível, essa irregularidade resulta em erros também inferiores a 5%, valor considerado pedagogicamente aceitável em atividades experimentais didáticas. Em comparação, uma rede de difração laboratorial produzida por **holografia**, com **1000 linhas/mm** ($d = 1,0 \mu\text{m}$), apresenta irregularidade significativamente menor (inferior a 0,1%), permitindo medições mais precisas.

Vale destacar que, neste experimento, a difração ocorre **por transmissão**: o feixe do laser atravessa o CD (removido da carcaça), ao contrário do uso convencional em que a luz é refletida pelos sulcos. Isso implica que o CD não precisa ser necessariamente inteiro – uma parte do disco é

suficiente, ficando a critério do professor determinar o tamanho da rede de difração utilizada.

Atenção ao professor!

A forma como o CD é posicionado interfere na **horizontalidade dos picos difratados**, fazendo com que eles fiquem em planos diferentes em relação à régua de medição que serve como anteparo. Por isso, o professor deve ter **certa destreza ao posicionar o CD no suporte da rede de difração**.

2.4 O Diodo Laser: Emissão Estimulada e Tensão Limiar

A sigla **LASER** significa *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. O fenômeno de emissão estimulada foi descrito por Einstein em 1917: quando um fóton de frequência f incide sobre um átomo em estado excitado com diferença de energia $E_2 - E_1 = hf$, o átomo não simplesmente absorve o fóton – ele emite um segundo fóton **idêntico** ao primeiro (mesma frequência, mesma fase, mesma direção e mesma polarização) e decai ao estado de menor energia. O resultado é amplificação óptica coerente (TIPLER; LLEWELLYN, 2014, p. 490).

Um **diodo laser** – o componente dentro do apontador usado neste experimento – é baseado em uma junção **p-n** de material semicondutor, tipicamente arseneto de gálio-alumínio (GaAlAs) para a faixa vermelha ($\lambda \approx 630 - 680$ nm). Na junção, elétrons da banda de condução (do lado **n**) se recombinam com lacunas da banda de valência (do lado **p**). A diferença de energia entre as bandas – o **gap de energia** E_g – é liberada como um fóton de energia $E_g = hf = hc/\lambda$. Isso fixa a frequência de emissão: o comprimento de onda do laser é determinado pelo material semicondutor, não pela tensão aplicada (TIPLER; LLEWELLYN, 2014, p. 495).

A **tensão limiar** U_0 é a tensão mínima de polarização direta para que a emissão estimulada supere as perdas internas da cavidade óptica do laser (reflexão parcial nas faces do cristal, absorção, espalhamento). Abaixo de U_0 , elétrons e lacunas se recombinam espontaneamente, emitindo fótons em direções e fases aleatórias — o diodo comporta-se como um LED incoerente. Acima de U_0 , a emissão estimulada domina: os fótons se multiplicam em cascata dentro da cavidade, produzindo luz coerente, monocromática e colimada. Essa transição manifesta-se como um **joelho abrupto** na curva corrente-tensão ($I - V$): acima de U_0 , a corrente cresce muito mais rapidamente com a tensão do que abaixo (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 833).

É importante que o professor compreenda que U_0 não é exatamente igual a hf/e . Há três fontes de desvio: (1) perdas resistivas na própria junção semicondutora e nos contatos metálicos, que elevam U_0 ; (2) efeitos de temperatura (U_0 diminui com T crescente, porque a população de portadores aumenta termicamente); e (3) a aproximação de que toda a energia elétrica é convertida

em um único fóton – na prática, há eficiência quântica < 1 . Oliveira *et al.* (2020, p. 843) discutem essas fontes e concluem que o erro sistemático resultante é de 2–5%, coerente com os resultados experimentais obtidos.

2.4.1 Derivação Completa da Equação Experimental de h

A relação fundamental é a conservação de energia na tensão limiar: a energia que o campo elétrico fornece a cada elétron ao submetê-lo a uma diferença de potencial U_0 deve ser aproximadamente igual à energia do fóton emitido:

$$e \cdot U_0 \approx h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$e = 1,602 \times 10^{-19}$ C (carga elementar); $c = 2,998 \times 10^8$ m/s (velocidade da luz no vácuo)

Isolando h :

$$h = \frac{e \cdot U_0 \cdot \lambda}{c}$$

Substituindo $\lambda = d \cdot \text{sen}(\theta_1)/m$ (equação da rede, 1.^a ordem, $m = 1$):

$$h = \frac{e \cdot U_0 \cdot d \cdot \text{sen}\theta_1}{c \cdot m}$$

Equação experimental final. Todas as grandezas do lado direito são mensuráveis diretamente no experimento ou conhecidas como constantes universais.

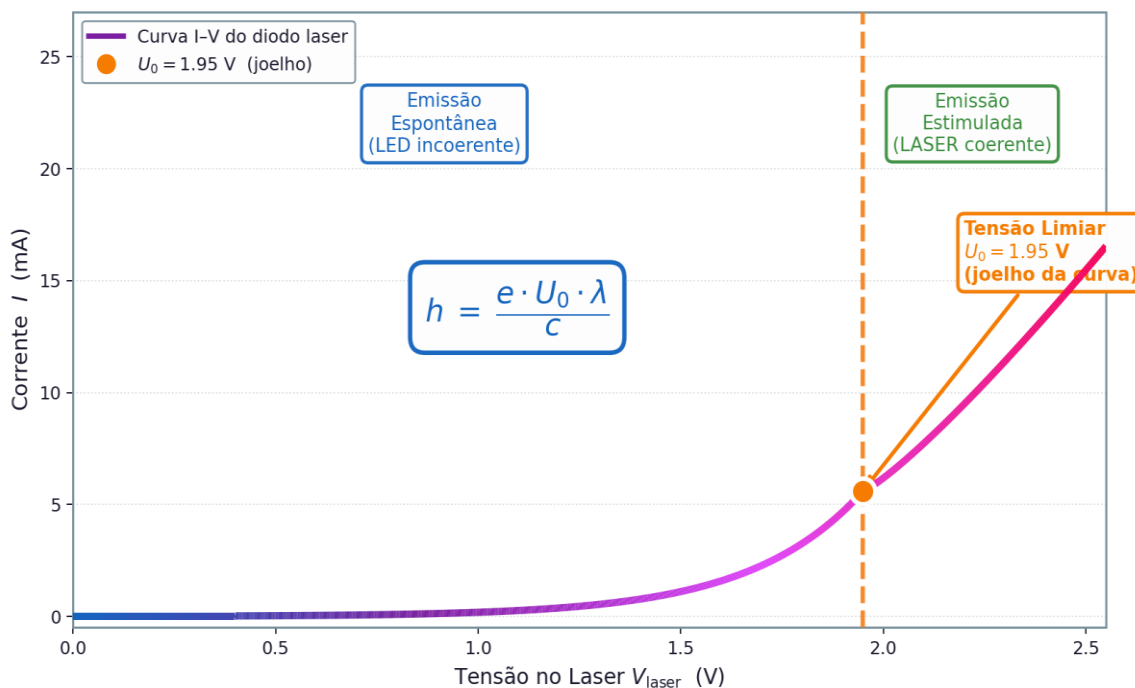
Essa equação é elegante justamente porque conecta dois experimentos independentes: a difração determina λ (e, portanto, f) por meio de régua e geometria; o Arduino determina U_0 por meio da curva $I \times V$. A combinação das duas medições permite calcular h sem qualquer equipamento caro. Os resultados da aplicação piloto deste produto educacional são apresentados abaixo (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 843):

Tabela 2: Resultados experimentais da aplicação piloto

Grandeza	Rede Laboratorial	Rede com CD	Valor CODATA
Tensão limiar U_0 (V)	1,97	1,94	—
Espaçamento d (m)	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	—
$\text{sen}(\theta_1)$	0,651	0,386	—
h calculado ($\times 10^{-34}$ J·s)	6,85	6,40	6,626
Erro relativo (%)	3,38	3,41	—

Fonte: Adaptado de Oliveira, I. N. *et al.* (2020).

Figura 2: Curva $I \times V$ do Diodo Laser: Identificação da Tensão Limiar U_0



Fonte: Elaborado pelo autor com base em OLIVEIRA, I. N. *et al.* (2020).

2.5 O Circuito Arduino: PWM, Filtro RC e Aquisição de Dados

O Arduino Uno é baseado no microcontrolador ATmega328P, operando a 16 MHz com 32 KB de memória flash e 2 KB de SRAM. Possui 6 entradas analógicas com **conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits** e 6 pinos com capacidade de **modulação por largura de pulso (PWM)**. Martinazzo *et al.* (2014, p. 2) demonstraram que o Arduino "**reduz a distância entre a física teórica e a instrumentação científica, tornando o aluno agente da medição, não apenas receptor dos resultados**".

O pino digital 6 gera um sinal PWM a 490 Hz: alterna entre 0 V e 5 V com um **ciclo de trabalho** (*duty cycle*) programável de 0 a 255. A tensão média produzida é:

$$V_{\text{médio}} = \left(\frac{\text{PWM}}{255} \right) \times 5,0 \text{ V}$$

PWM → valor inteiro de 0 a 255; $V_{\text{médio}}$ varia de 0 a 5 V com resolução de $\approx 19,6$ mV/passos

O sinal PWM puro é pulsado – não pode ser aplicado diretamente ao laser, que exigiria tensão DC estável para produzir emissão coerente contínua. Para suavizá-lo, usa-se um **filtro RC passivo de primeira ordem**: resistor $R = 47 \Omega$ em série com capacitor $C \geq 10 \mu\text{F}$ entre o nó de saída e o GND. A **frequência de corte** do filtro é:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2\pi \times 47 \times 10^{-5}} \approx 338 \text{ Hz}$$

Como f_c (338 Hz) $<$ f_{PWM} (490 Hz), o filtro atenua a componente pulsada e entrega tensão DC com ripple $<$ 5% ao laser

Com $C = 100 \mu\text{F}$ (opção para curvas mais suaves), $f_c \approx 34$ Hz e o ripple cai para $<$ 0,5%. A constante de tempo do filtro é $\tau = RC$: com $C = 10 \mu\text{F}$, $\tau \approx 0,47$ ms; com $C = 100 \mu\text{F}$, $\tau \approx 4,7$ ms. O código aguarda *delay* (100 ms) após cada passo de PWM – tempo suficiente para o capacitor estabilizar em qualquer uma das opções. Para uma discussão detalhada do dimensionamento do filtro, ver Oliveira *et al.* (2020, p. 834).

O ADC do Arduino tem **10 bits de resolução**, o que significa $2^{10} = 1024$ níveis de quantização no intervalo 0–5 V. A resolução de tensão é:

$$\Delta V_{\text{ADC}} = \frac{5,0 \text{ V}}{1023} \approx 4,9 \text{ mV por bit}$$

$$\text{Fórmula de conversão: } V = \left(\frac{\text{leitura}_{\text{ADC}}}{1023} \right) \times 5,0 \text{ V}$$

A **corrente no laser** é medida indiretamente pela lei de Ohm: o ADC no pino A1 mede a queda de tensão V_R no resistor de 47Ω . A corrente é $I = V_R/R$. A resolução de corrente resultante é $\Delta I = \Delta V_{\text{ADC}}/R \approx 4,9 \text{ mV} / 47 \Omega \approx 0,10 \text{ mA}$ – suficiente para detectar com clareza o joelho da curva $I \times V$, que ocorre tipicamente com variação de corrente da ordem de $1 - 5 \text{ mA}$ ao longo da transição (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 836).

Segurança com Laser – Leia antes de qualquer aula

Apontador laser de classe 3R (1–5 mW, visível) ou classe 2 (≤ 1 mW) podem representar risco à visão em caso de exposição direta e prolongada. O reflexo natural de piscar ($\approx 0,25$ s) oferece

proteção contra exposições acidentais, mas não substitui os cuidados de segurança. Antes de qualquer montagem experimental, instrua os alunos a: (1) nunca apontar o laser para os olhos de qualquer pessoa; (2) não direcionar o feixe para superfícies espelhadas, pois os reflexos podem ser perigosos; (3) ao ligar o dispositivo, certificar-se de que o anteparo esteja devidamente posicionado. O uso de óculos de proteção para laser (filtro para 630–680 nm, custo aproximado de R\$ 15,00) é fortemente recomendado. Em caso de exposição acidental, recomenda-se procurar imediatamente atendimento oftalmológico.

3 MATERIAIS, MONTAGEM DO CIRCUITO E CÓDIGO ARDUINO

Todo o material listado abaixo pode ser obtido em lojas de eletrônica. O custo total por bancada de experimento fica entre R\$ 80,00 e R\$ 120,00, muito abaixo de equipamentos de laboratório convencionais para o mesmo experimento (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 829).

3.1 Lista de Materiais — Experimento com Arduino

Tabela 3: Materiais necessários para experiências com Arduino (por grupo)

Material	Qtd.	Onde Comprar	Custo Aprox. (R\$)
Placa Arduino Uno (ATmega328P, 16 MHz)	1/grupo	Lojas de eletrônica / Mercado Livre	40,00 – 60,00
Resistor 47 Ω (1/4 W, tolerância 5%)	1/grupo	Lojas de eletrônica	0,50
Capacitor eletrolítico 10–100 μF / 16 V	1/grupo	Lojas de eletrônica	1,50
Apontador laser vermelho (~ 650 nm, < 1 mW)	1/grupo	Papelaria / Mercado Livre	15,00–25,00
Protoboard (400 pontos)	1/grupo	Lojas de eletrônica	15,00
Fios jumper macho-macho (20 cm)	10/grupo	Lojas de eletrônica	8,00
Cabo USB tipo A-B (Arduino para PC)	1/grupo	Laboratório de informática	Já tem
Computador com Excel e Arduino IDE	1/grupo	Laboratório de informática	Já tem

Fonte: Elaborado pelo autor com base em OLIVEIRA, I. N. *et al.* (2020).

3.2 Lista de Materiais — Banco Ótico Artesanal

Tabela 4: Materiais para montagem do banco ótico artesanal (por grupo)

Material	Quantidade	Como Obter
CD inutilizado (riscado ou virgem)	1/grupo	Peça aos alunos — recicle
Prancha de MDF ou madeira (30 × 10 cm)	1/grupo	Madeiraira / sucata
Suporte vertical para anteparo (10 cm altura)	1/grupo	Papelão dobrado + clips
Papel A4 branco (anteparo)	2 folhas/grupo	Já tem
Régua milimetrada 30 cm	1/grupo	Já tem
Fita adesiva dupla face ou cola quente	1 rolo	Já tem

Fonte: Elaborado pelo autor com base em OLIVEIRA, I. N. *et al.* (2020); SANTOS, E. S. *et al.* (2015).

Sem laboratório de informática?

O experimento pode ser feito sem Arduino e sem computador: use um multímetro para medir U_0 - aumente a tensão de uma bateria + potenciômetro e registre onde o laser acende com nitidez. Santos *et al.* (2015) demonstraram que essa versão simplificada determina λ com erro inferior a 6%, o que é pedagogicamente válido para o ensino médio e pode até ser mais didático para turmas sem familiaridade prévia com eletrônica.

3.3 Instalação de Software

1. Arduino IDE (gratuito): arduino.cc/en/software – Windows, macOS e Linux. Instale o driver CH340 se o Arduino for uma cópia compatível.
2. PLX-DAQ (Parallax Data Acquisition): pesquise "PLX-DAQ Parallax download" – arquivo .xls com macro VBA. Ao abrir no Excel, habilite macros em "Opções de segurança". Conexão: selecione a porta COM correta e velocidade 9600 baud.
3. Teste básico: conecte o Arduino, selecione Ferramentas > Placa > Arduino Uno e Ferramentas > Porta > COM[n]. Faça upload do exemplo Blink (Arquivo > Exemplos > 01.Basics > Blink) e confirme que o LED L pisca.

Figura 3 – Link de acesso do software PLX-DAQ

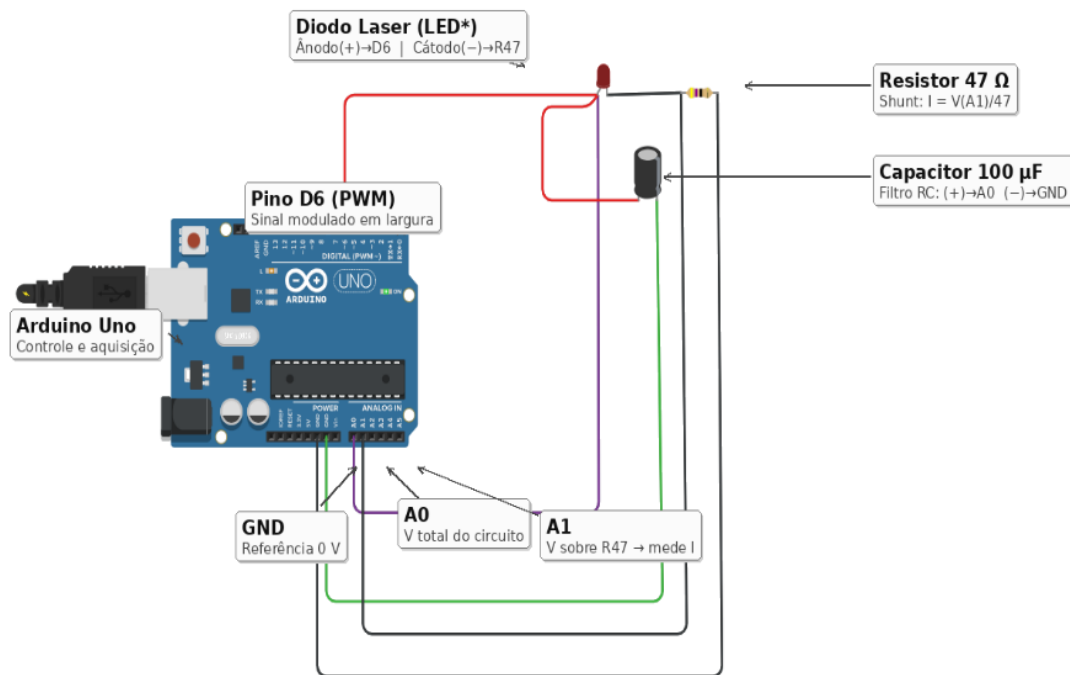


Fonte: PARALLAX INC. (2026)

3.4 Montagem do Circuito — Guia Passo a Passo

Esta seção apresenta, de forma sequencial e detalhada, como montar o circuito experimental que permite medir a curva característica $I \times V$ do diodo laser. Cada passo descreve **o quê conectar** e **por quê aquela conexão importa** para o experimento. Sugerimos que o professor realize a montagem junto com os alunos, verbalizando cada etapa em voz alta: esse diálogo transforma a prática de bancada em uma aula de circuitos em tempo real. Utilize sempre a Figura 4 como referência visual durante toda a montagem.

Figura 4: Circuito experimental para medição da curva $I \times V$ do diodo laser — arranjo completo montado na plataforma Tinkercad, com Arduino Uno, filtro RC passivo (capacitor de $100 \mu\text{F}$), resistor shunt de 47Ω e representação do diodo laser (LED utilizado apenas como equivalência elétrica no simulador). O pino D6 fornece o sinal PWM; os pinos A0 e A1 realizam, respectivamente, a leitura da tensão total do circuito e da queda de tensão sobre o resistor shunt.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Oliveira *et al.* (2020).

A Figura 4 apresenta o arranjo completo desenvolvido na plataforma Tinkercad. Como o simulador não dispõe do componente diodo laser, foi utilizado um LED como representação elétrica equivalente – substituição válida apenas no ambiente virtual. No experimento real, utilize sempre o diodo laser indicado na lista de materiais.

⚠ Antes de começar — segurança e organização

Não conecte o cabo USB ao computador enquanto a montagem não estiver completa e verificada. Separe todos os componentes sobre a bancada antes de iniciar: Arduino Uno, protoboard, diodo laser, capacitor eletrolítico ($100 \mu\text{F}$), resistor shunt (47Ω) e fios. Identifique as polaridades antes de conectar qualquer peça.

- **Conecte o pino D6 (PWM) ao ânodo (+) do laser** – Use um fio para ligar o pino digital D6 do Arduino ao terminal positivo (ânodo) do diodo laser. Este pino gera o sinal PWM que, ao variar a largura dos pulsos, controla a tensão média entregue ao laser.
- Pergunta para a turma:** “O que acontece com o brilho do laser se aumentarmos o valor do PWM?”

- **Conecte o pino A0 e o capacitor (+) ao mesmo nó do ânodo** – No mesmo ponto onde chegou o fio do D6, conecte também: (a) um fio ao pino analógico A0 do Arduino e (b) o terminal positivo do capacitor eletrolítico. Este nó exerce dupla função: alimenta o laser e fornece ao pino A0 a leitura da tensão total do circuito.

● **Atenção — Polaridade do capacitor eletrolítico**

O capacitor eletrolítico é polarizado: a perna mais longa é o positivo (+) e o lado com a faixa branca marcada com “–” é o negativo. Inversão de polaridade pode danificá-lo com faísca e odor forte. Mostre aos alunos como identificar a polaridade antes de inserir o componente na protoboard.

- **Conecte o terminal negativo (–) do capacitor ao GND** – A perna curta do capacitor (lado com faixa branca) vai para o GND do Arduino. Este é o momento de explicar o papel do capacitor: ele suaviza o sinal PWM pulsado (0–5 V), convertendo-o em uma tensão quase contínua. Analogia útil: “o capacitor funciona como um reservatório que amortece as oscilações”. Sem ele, o laser piscaria em vez de variar sua intensidade gradualmente (Oliveira *et al.*, 2020).

● **Atenção — Polaridade do diodo laser**

O diodo laser também é polarizado. A perna mais longa é o ânodo (+); a mais curta, o cátodo (–). A inversão de polaridade pode queimar o componente permanentemente e de forma silenciosa — sem fumaça nem cheiro. Oriente os alunos a conferir a polaridade duas vezes antes de energizar o circuito.

- **Conecte o cátodo (–) do laser ao resistor shunt (47 Ω)** – Use um fio para ligar o terminal negativo (cátodo) do diodo laser a um dos terminais do resistor de 47 Ω. Este ponto de junção é o nó de medição de corrente: toda a corrente que passa pelo laser passa também pelo resistor. **Pergunta para a turma: “Como podemos calcular a corrente se só conseguimos medir tensão?”**
- **Conecte o pino A1 ao mesmo nó (cátodo / resistor)** – No mesmo ponto onde o cátodo encontra o resistor, conecte também um fio ao pino analógico A1. Este pino mede a queda de tensão sobre o resistor shunt. A corrente é então calculada pela Lei de Ohm: $I = V(A1) \div 47 \Omega$. Esse é o momento de revisar a Lei de Ohm com os alunos (Oliveira *et al.*, 2020, p. 834).

- **Conecte o segundo terminal do resistor ao GND** – A outra ponta do resistor shunt vai para o GND do Arduino, completando o circuito. Esse mesmo barramento GND já recebeu o terminal negativo do capacitor (Passo 3). Ter um único ponto de referência é fundamental: garanta que as leituras de A0 e A1 sejam comparadas na mesma base de potencial e que o cálculo da tensão no laser seja correto: $V(\text{laser}) = V(\text{A0}) - V(\text{A1})$.

Com o circuito montado, o Arduino controla e mede tudo de uma vez: o pino D6 gera o PWM que alimenta o laser; A0 lê a tensão total; A1 lê a tensão sobre o resistor. A tensão real no laser é $V(\text{A0}) - V(\text{A1})$ e a corrente é $V(\text{A1}) \div 47 \Omega$. Cada par de leituras fornece um ponto da curva $I \times V$ (Oliveira *et al.*, 2020, p. 834).

Verificação antes de energizar

Confirme: (1) polaridade do capacitor – inversão pode danificá-lo com faísca; (2) terminais do laser – inversão pode queimá-lo permanentemente; (3) pinos A0 e A1 nos pontos corretos — inversão não danifica, mas os dados ficam errados. Somente após verificação completa, conecte o cabo USB ao computador.

3.5 Código Arduino — Varredura $I \times V$ com Saída PLX-DAQ

O código a seguir realiza uma varredura automática de PWM de 0 a 255 em passos unitários, medindo a tensão e a corrente no diodo laser a cada passo e enviando esses dados em tempo real para o Excel via PLX-DAQ. O resultado é a curva $I \times V$ que permite identificar a tensão limiar U_0 – o valor que usaremos para calcular h . Baseado em Oliveira *et al.* (2020, p. 836). Copie e cole no Arduino IDE:

```
int i, j, Npontos = 50;
float valorA0;
float valorA1;
float VOLT;
float CORR;
float DV;
float ResSerieLaser = 47.0; // Valor da resistência shunt (Ω)
#define LED 13
#define PWMPin 6

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(2000); // Aguarda PLX-DAQ conectar
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL, Tensao (V), Corrente (mA)");
  pinMode(LED, OUTPUT);
}
```

```

pinMode(PWMPin, OUTPUT);
analogReference(DEFAULT);
analogWrite(PWMPin, 0); // Tensão inicial = 0 V
delay(1000);
}

void loop() {
  digitalWrite(LED, HIGH); // LED aceso: varredura em andamento
  for (i = 5; i <= 245; i++) {
    analogWrite(PWMPin, i); // Define o PWM
    delay(100); // Aguarda estabilização
    valorA0 = 0;
    for (j = 0; j < Npontos; j++) { delay(2); valorA0 +=
analogRead(0); }
    valorA0 = valorA0 / Npontos; // Média de 50 leituras
    valorA1 = 0;
    for (j = 0; j < Npontos; j++) { delay(2); valorA1 +=
analogRead(1); }
    valorA1 = valorA1 / Npontos; // Média de 50 leituras
    DV = (valorA0 - valorA1);
    CORR = (5000.0 * valorA1 / 1023.0) / ResSerieLaser; // Corrente
(mA)
    VOLT = (5.0 * DV / 1023.0); // Tensão (V)
    Serial.print("DATA,"); // Palavra-chave do PLX-DAQ
    Serial.print(VOLT, 4);
    Serial.print(",");
    Serial.println(CORR, 5);
  }
  digitalWrite(LED, LOW);
  analogWrite(PWMPin, 0); // Desliga o laser
  delay(5000); // Pausa antes de repetir
}

```

3.5.1 Como ler o código linha a linha

A função `setup()` é executada uma única vez ao ligar o Arduino. Ela inicia a comunicação serial a 9600 baud, aguarda 2 segundos para o PLX-DAQ conectar, envia o comando `CLEARDATA` (que apaga dados anteriores na planilha) e o comando `LABEL` (que cria os cabeçalhos das colunas no Excel). Em seguida, configura os pinos e garante que o laser começa com tensão zero.

A função `loop()` realiza a varredura em si. O laço `for` percorre os valores de PWM de 5 a 245 – equivalente a varrer a tensão de 0,1 V a 4,8 V em passos de $\approx 19,6$ mV. A cada passo, o código aguarda 100 ms para o capacitor estabilizar e depois tira a média de 50 leituras de A0 e A1 (com atraso de 2 ms entre cada uma) para reduzir o ruído elétrico. A tensão no laser é calculada por $VOLT = 5,0 \times (A0 - A1) \div 1023$ e a corrente por $CORR = 5000 \times A1 \div (1023 \times 47)$. Cada par de valores é enviado ao Excel pela linha `DATA, VOLT, CORR`.

Por que dividir por 1023 e não por 1024?

O ADC do Arduino tem 10 bits de resolução: isso gera $2^{10} = 1024$ níveis possíveis, numerados de 0 a 1023. O nível 0 corresponde a 0 V e o nível 1023 corresponde a 5 V. A fórmula correta é $V = (\text{leitura} \div 1023) \times 5,0 \text{ V}$. Usar 1024 no denominador subestimaria ligeiramente toda tensão calculada – um erro sistemático que se propagaria até o valor final de h .

3.5.2 A Comunicação Serial e o Uso do PLX-DAQ

Durante a coleta, o obstáculo mais comum na bancada é a falha de comunicação entre o Arduino e o Excel. Ela ocorre por dois motivos distintos, fáceis de evitar conhecendo a causa:

Problema 1 — Conflito de porta COM (Monitor Serial aberto)

O sistema operacional permite que apenas um programa por vez acesse a porta USB do Arduino. Se a janela do Monitor Serial da Arduino IDE estiver aberta, ela trava a porta – e o PLX-DAQ não consegue se conectar, resultando em ausência total de dados no Excel.

Solução: após fazer o upload do código, feche completamente o Monitor Serial (ou feche a própria IDE). Depois abra o arquivo PLX-DAQ no Excel, selecione a porta COM correta, clique em Connect e pressione o botão Reset no Arduino para reiniciar a varredura do início.

Problema 2 — Textos soltos no código (conflito de sintaxe)

O PLX-DAQ reconhece apenas linhas que começam com DATA, CLEARDATA ou LABEL. Se o código contiver linhas como `Serial.print("Tensão atual: ")` – criadas para visualização humana no Monitor Serial –, o PLX-DAQ interrompe a leitura ao encontrá-las, quebrando o gráfico no meio da varredura.

Solução: o código acima já está limpo para uso com PLX-DAQ. Não adicione nenhuma linha `Serial.print()` com texto livre enquanto a macro estiver conectada. Se quiser depurar o código pelo Monitor Serial, crie uma versão separada com os textos de diagnóstico.

Problemas comuns e soluções

Laser não acende: verifique a polaridade dos terminais – inversão impede a emissão. Curva $I \times V$ plana ou muito ruidosa: aumente o capacitor para 100 μF e o delay para 200 ms – isso aumenta τ

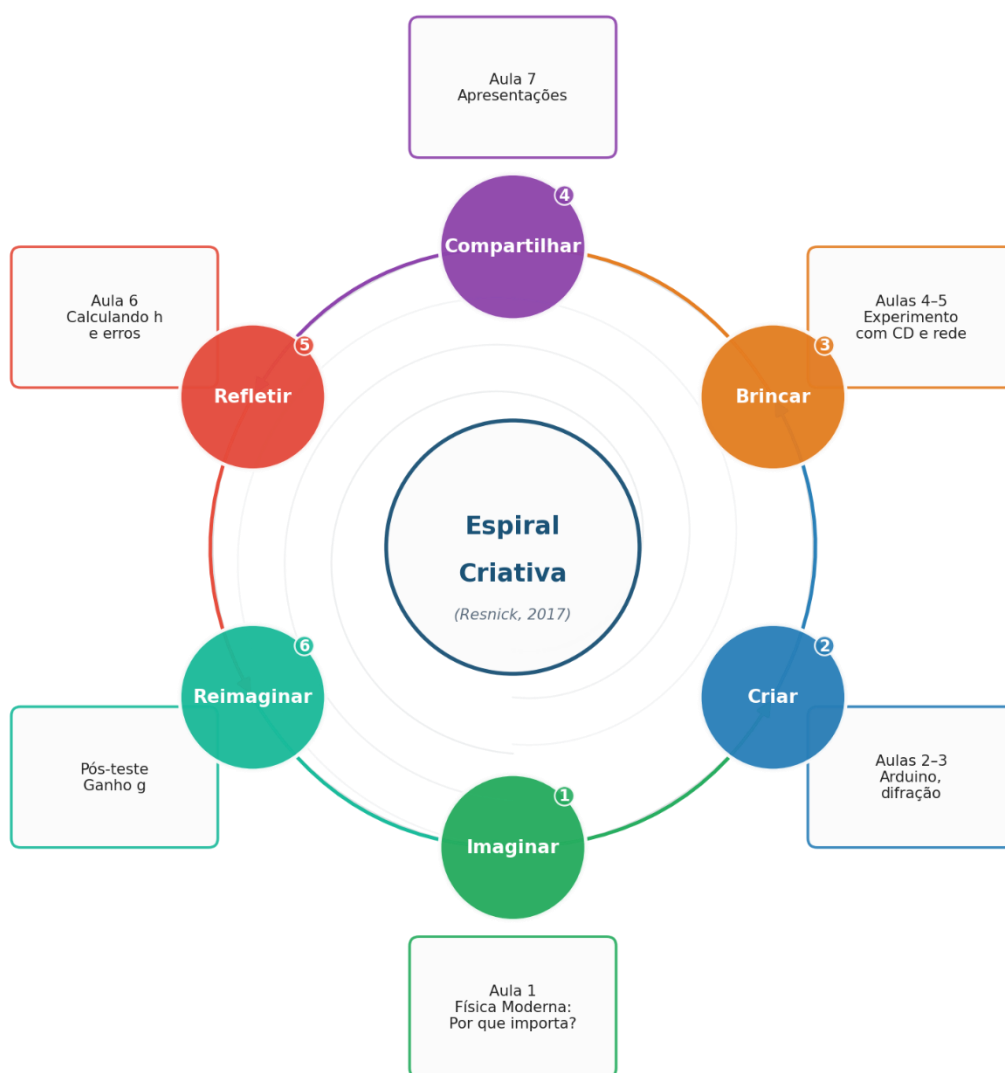
e suaviza o sinal. Dados não aparecem no Excel: verifique se a macro PLX-DAQ está habilitada (Arquivo > Opções > Central de Confiabilidade) e se a porta COM selecionada no PLX-DAQ é a mesma do Arduino IDE. Padrão de difração fraco: afaste o anteparo para $L = 50\text{--}80$ cm e escureça ao máximo a sala. Orientações adaptadas de Oliveira *et al.* (2020, p. 839).

PARTE 2 — ROTEIRO

4 ROTEIRO DETALHADO DAS 7 AULAS

O roteiro foi estruturado segundo os princípios da aprendizagem ativa (RESNICK, 2017; PAPERT, 1980) e do ensino por investigação (MOREIRA, 2021). Cada aula inclui objetivos mensuráveis, roteiro detalhado de condução, scripts de fala e articulação com os instrumentos de avaliação. Adapte à sua realidade – o roteiro é um guia, não uma camisa de força.

Figura 5: Espiral Criativa de Resnick aplicada às 7 Aulas



Fonte: Adaptado de RESNICK (2017).

Tabela 5: Visão geral das 7 aulas: temas, duração e focos principais

Aula	Tema	Duração	Foco Principal
1	Física Moderna: por que importa?	100 min	Motivação, diagnóstico, história da ciência
2	Conhecendo o Arduino	100 min	Eletrônica prática, PWM e filtro RC
3	Luz, ondas e difração	100 min	Teoria ondulatória + 1. ^a medição de λ
4	Experimento com CD artesanal	100 min	Coleta de dados – rede artesanal
5	Experimento com rede laboratorial	100 min	Coleta, comparação e análise de erros
6	Calculando a constante de Planck	100 min	Cálculo de h e erro relativo
7	Apresentações e reflexão final	100 min	Comunicação científica e síntese

Fonte: Autoria própria.

4.1 AULA 1 — Física Moderna: Por Que Isso Importa?

Objetivos

- Levantar concepções prévias sobre física moderna e física quântica (diagnóstico formativo)
- Criar motivação genuína por meio da narrativa histórica da Catástrofe do Ultravioleta
- Conectar a física quântica com tecnologias do cotidiano dos alunos
- Apresentar h como a "constante que governa o mundo tecnológico que eles já usam"

4.1.1 Minutos 0 -15 — Diagnóstico inicial (Questionário A)

Peça que os alunos respondam individualmente ao Questionário A no Caderno do Estudante, sem consultar nenhuma fonte. Não corrija – apenas ouça e registre no quadro as palavras que emergirem. Moreira (2021, p. e20200451) descreve essa estratégia de **levantamento de concepções alternativas** como "condição sine qua non para um ensino significativo de física moderna": sem mapear de onde os alunos partem, é impossível planejar para onde levá-los.

O QUE DIZER PARA OS ALUNOS:

"Olhem para o quadro. Cada palavra aqui é um ponto de partida. Algumas estão certas, algumas incompletas, algumas equivocadas – e tudo bem. Nosso trabalho nas próximas

semanas é construir uma compreensão sólida, não decorar fórmulas."

4.1.2 Minutos 15–50 — A Catástrofe do Ultravioleta como narrativa

Conte a história da Catástrofe do Ultravioleta como narrativa dramática, não como aula expositiva. Neves (1998, p. 74) demonstrou que **"o ensino da ciência por meio de sua história humaniza o conhecimento e cria condições para que o aluno compreenda a ciência como processo, não como produto acabado"**. Use o simulador PhET "Radiação do Corpo Negro" (phet.colorado.edu) se houver projetor disponível.

O QUE DIZER PARA OS ALUNOS:

"Imaginem que é 1900. A física está em crise total. Os melhores físicos do mundo – Rayleigh e Jeans – criaram equações que preveem uma coisa absurda: um objeto aquecido deveria irradiar energia infinita em frequências altas. Infinita! Isso obviamente não acontece – se acontecesse, não daríamos conta de olhar para uma lâmpada sem nos queimarmos. Alguém vai ter que quebrar uma regra muito antiga para resolver isso. Esse alguém é Max Planck. E a regra que ele vai quebrar vai mudar tudo."

4.1.3 Minutos 50–80 — Conexão com tecnologia cotidiana

Peça que os alunos tirem os smartphones. Mostre que a tela OLED usa elétrons que recombina e emitem fótons ($E = hf$), que o sensor da câmera detecta fótons individualmente pelo efeito fotoelétrico. Caruso e Oguri (2016, p. 5) argumentam que **"a conexão entre física moderna e tecnologia cotidiana é o principal veículo motivacional para o ensino médio"**, e que essa conexão é raramente explorada no currículo tradicional.

4.1.4 Minutos 80–100 — Questionário A e fechamento

Como usar o Questionário A

Não atribua nota. Use as respostas para calibrar a Aula 2: se a maioria marcou **"não entendi"** na questão sobre quantização, reserve tempo extra na Aula 2 para a analogia das moedas. Se alguns já mencionaram LEDs ou lasers corretamente, valorize em voz alta – isso cria motivação por reconhecimento. Resnick (2017, p. 87): avaliação formativa serve **"para ajustar a instrução, não para classificar alunos"**.

4.2 AULA 2 — Conhecendo o Arduino

Objetivos

- Identificar fisicamente todos os componentes da placa Arduino Uno
- Compreender o mecanismo do PWM e sua relação com tensão média
- Entender o papel do filtro RC na suavização do sinal PWM
- Realizar a primeira montagem funcional (LED + Blink) como prática de confiança
- Concluir a montagem completa do circuito do experimento

4.2.1 Minutos 0–20 — Exploração física da placa

Distribua um Arduino para cada grupo. Peça que identifiquem os componentes conforme a Atividade B do Caderno do Estudante. Martinazzo *et al.* (2014, p. 2) demonstraram que **"a simples exploração física e visual da placa Arduino antes de qualquer programação reduz significativamente a ansiedade tecnológica de estudantes do ensino médio"**, com aumento mensurável de engajamento nas etapas seguintes. Não pule essa etapa por parecer óbvia – ela é psicologicamente fundamental.

O QUE DIZER PARA OS ALUNOS:

"Vocês estão segurando um computador completo. Esse chip no centro tem processador de 16 MHz, 32 KB de memória e pode ser programado para controlar qualquer coisa – robôs, estufas hidropônicas, sintetizadores de som. Custa R\$ 40,00. Nas próximas semanas, vamos usá-lo para medir uma das constantes mais fundamentais da física."

4.2.2 Minutos 20–60 — LED piscando e introdução ao PWM

Monte Arduino + LED + resistor de 220 Ω . Faça upload do exemplo Blink. Quando o LED piscar, use o momento para explicar o PWM: o pino alterna 490 vezes por segundo entre 0 V e 5 V. Variando o duty cycle de 0 a 255, varia-se a tensão média de 0 a 5 V com passos de ≈ 20 mV. Papert (1980, p. 73) chama esses primeiros objetos funcionando de *hard fun* — atividades desafiadoras e imediatamente recompensadoras, que criam engajamento sustentado para as etapas seguintes.

O QUE DIZER PARA OS ALUNOS:

"O LED está piscando 1 vez por segundo. Mas e se eu quiser que ele fique num brilho médio? O Arduino faz isso ligando e desligando 490 vezes por segundo – o olho percebe como brilho médio. É exatamente assim que vamos controlar o laser: variaremos devagar

o duty cycle de 0 a 255 e mediremos a corrente em cada ponto. O gráfico resultante vai mostrar exatamente onde o laser liga – e esse ponto é o U_0 que usaremos para calcular h ."

4.2.3 Minutos 60–90 — Montagem do circuito do experimento

Com a confiança construída pelo LED funcionando, guie a montagem do circuito completo conforme o roteiro da Seção 3 (filtro RC + laser). Não faça upload do código ainda – apenas monte e verifique ponto a ponto. A verificação antes da energização é etapa crítica de segurança e de ensino da metodologia experimental (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 834).

4.2.4 Minutos 90–100 — Questionário B e fechamento

Nos 10 minutos finais, peça que os alunos respondam ao **Questionário B** do Caderno do Estudante, que avalia a compreensão dos conceitos de eletrônica e PWM trabalhados na aula. Não atribua nota — use as respostas para identificar grupos que precisam de suporte extra no início da Aula 3. Alunos que marcarem “Não entendi” em três ou mais itens devem receber atenção individualizada durante a montagem da Aula 2/3 (RESNICK, 2017, p. 87).

4.3 AULA 3 — Luz, Ondas e Difração

Objetivos

- Explicar a natureza ondulatória da luz com fundamento histórico (Young, 1801)
- Demonstrar o padrão de difração com laser e rede – demonstração investigativa
- Ensinar como medir y_1 e L com régua e calcular λ pela equação $d \cdot \sin(\theta) = m \cdot \lambda$
- Realizar a primeira medição real de λ com os alunos (Atividade C do Caderno)

O QUE DIZER PARA OS ALUNOS:

"Pergunta rápida: luz é onda ou partícula?" [Ouça as respostas.] "A resposta honesta é: as duas coisas ao mesmo tempo. Hoje vamos ver a parte onda – vamos fazer a luz se dividir e interferir, como faria qualquer onda. No experimento do Arduino, vamos ver o lado partícula – e aí h entra em cena."

4.3.1 Minutos 0–30 — Introdução histórica e exposição da teoria ondulatória

Inicie a aula com a pergunta do quadro acima (“Luz é onda ou partícula?”) e escute as respostas sem corrigi-las. Apresente brevemente a experiência de Thomas Young (1801): desenhe no quadro duas fendas e o padrão de franjas resultante, enfatizando que esse resultado provou o comportamento ondulatório da luz muito antes de qualquer laser. Utilize o simulador PhET “Interferência de Ondas” (phet.colorado.edu) se houver projetor disponível. Nos últimos 10 minutos desse bloco, explique o conceito de rede de difração e a equação fundamental $d \cdot \sin(\theta) = m \cdot \lambda$, mostrando o que cada grandeza representa e como serão medida no experimento (HECHT, 2017, p. 455).

4.3.2 Minutos 30–70 — Demonstração investigativa com laser e CD

Escureça a sala. Aponte o laser no CD. Deixe os alunos observarem por 30 segundos antes de oferecer qualquer explicação. Santos *et al.* (2015) descrevem essa estratégia como **"demonstração investigativa"**: o professor provoca a observação antes de oferecer a explicação, criando o desequilíbrio cognitivo que Piaget (apud CARUSO; OGURI, 2016, p. 12) considerava condição necessária para a aprendizagem genuína.

O QUE DIZER PARA OS ALUNOS:

"O que vocês estão vendo? [pausa]

Um ponto virou cinco, sete pontos. Por quê? Porque a luz se comporta como onda: ao passar pelos sulcos do CD, as ondas de cada sulco se espalharam e interferiram entre si – construtivamente onde a diferença de caminho é múltipla de λ , destrutivamente nos pontos intermediários. Thomas Young viu exatamente isso em 1801 com luz solar. Nós vemos agora com laser – e daqui a pouco vamos medir esse comprimento de onda com uma régua de 30 cm."

4.3.3 Minutos 70–90 — Cálculo de λ com a turma

Guie o preenchimento da Atividade C do Caderno do Estudante. Calcule θ_1 e λ no quadro, passo a passo, com as medidas da turma. Enfatize o resultado: os alunos determinaram com régua e lápis uma grandeza de 650 nanômetros – menos que a milésima parte da espessura de um fio de cabelo. A comparação com o valor esperado (630–680 nm para laser vermelho típico) permite uma primeira discussão sobre erros de medição.

4.3.4 Minutos 90-100 — Questionário C e fechamento

Nos 10 minutos finais, peça que os alunos respondam ao **Questionário C** do Caderno do Estudante, que avalia a compreensão da difração, do comprimento de onda λ e da equação da rede. Não atribua nota – use as respostas para verificar se a turma está pronta para a coleta de dados das Aulas 4 e 5. Grupos com dificuldade em calcular $\text{sen}(\theta)$ devem ser identificados para atendimento individual no início da Aula 4 (RESNICK, 2017, p. 87).

4.4 AULAS 4 e 5 — Os Experimentos

Objetivos

- Aula 4: coletar U_0 e λ com rede artesanal (CD) – banco ótico + Arduino + PLX-DAQ
- Aula 5: repetir com rede laboratorial ($d = 1,0 \mu\text{m}$) e comparar os dois métodos
- Observar a curva I-V em tempo real e identificar o joelho que define U_0
- Preencher as fichas de autoavaliação (D), coavaliação (E) e diário de bordo (F)

Monte um banco ótico de demonstração na sua mesa antes de cada aula e confirme que os dados aparecem no PLX-DAQ com o joelho visível. Isso evita perda de tempo durante a coleta e permite demonstrar ao vivo o que os grupos devem buscar. O processo de coleta com o PLX-DAQ é detalhado por Oliveira *et al.* (2020, p. 834–837), com orientações específicas para ambientes de laboratório escolar.

O QUE DIZER PARA OS ALUNOS:

"Olhem para o gráfico se construindo na tela. No início, a corrente cresce muito devagar – o laser está no regime de emissão espontânea, incoerente, como um LED. De repente, ela dispara – o laser entrou no regime de emissão estimulada. Esse joelho, esse ponto de inflexão, é o U_0 . Identifiquem-no com cuidado: é ele que vamos usar para calcular h ."

Se um grupo obtiver erro > 10%

Provavelmente houve erro na medição de y_1 (paralaxe ao usar um lado apenas da rede, em vez de fazer a média dos dois lados) ou na identificação do U_0 (escolha do ponto errado na curva I-V). Peça que refaçam apenas a medição suspeita – não o experimento inteiro. Essa situação é pedagogicamente valiosa: é o momento para ensinar propagação de incertezas, habilidade prevista na BNCC (BRASIL, 2018) nas competências de análise de dados científicos.

4.5 AULA 6 — Calculando a Constante de Planck

🎯 Objetivos

- Aplicar $h = \frac{(e \cdot U_0 \cdot d \cdot \sin \theta_1)}{c \cdot m}$ com os dados coletados nas Aulas 4 e 5
- Calcular o erro relativo em relação ao valor CODATA ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)
- Discutir as fontes de incerteza e a diferença de precisão entre as duas redes
- Comparar os resultados dos grupos e calcular a média da turma

🗨️ O QUE DIZER PARA OS ALUNOS:

"Vocês têm U_0 . Vocês têm λ . Vocês têm as constantes e e c , que qualquer físico tem decoradas. Agora calculem h – a mesma constante que Max Planck levou meses para determinar em 1900, e que ele próprio chamou de ato de desespero (PAIS, 1995). Vocês têm 20 minutos."

Ao final, escreva todos os valores de h no quadro. Calcule a média da turma e o erro relativo médio. A análise comparativa entre os dois métodos é especialmente rica: Santos *et al.* (2015) apontam que a discussão das diferenças de precisão entre rede artesanal e laboratorial **"desenvolve nos alunos a capacidade de avaliar criticamente instrumentos de medição e suas limitações – uma competência central do pensamento científico"**.

4.6 AULA 7 — Apresentações e Reflexão Final

🎯 Objetivos

- Cada grupo apresenta seus resultados à turma (5–7 min): método, resultado, erros e aprendizado
- Discussão coletiva sobre o significado físico de h e as diferenças entre os grupos
- Aplicar o pós-teste (Questionário G) e calcular o ganho normalizado g
- Avaliar as apresentações com a Ficha H

🗨️ O QUE DIZER PARA OS ALUNOS:

"Hoje vocês são os cientistas. Apresentem como se fosse num congresso de física: o que vocês fizeram, como fizeram, o que deu errado, o que aprenderam e qual foi o valor de h que vocês encontraram. A turma vai fazer perguntas."

Reserve os 15 minutos finais para reflexão coletiva. Resnick (2017, p. 91) descreve essa etapa como "reflexão compartilhada" – "o momento em que a aprendizagem individual se transforma em conhecimento coletivo, consolidando e expandindo o que cada pessoa construiu". A pergunta "O que mais surpreendeu vocês nesse processo?" costuma gerar as respostas mais ricas de todo o roteiro.

PARTE 3 — AVALIAÇÃO

5 AVALIAÇÃO FORMATIVA: INSTRUMENTOS E ORIENTAÇÕES

Toda avaliação proposta neste roteiro é formativa. Resnick (2017, p. 86) define: "a avaliação formativa é aquela que acontece durante o processo de aprendizagem e que serve para orientá-la, não para registrá-la". Os instrumentos podem ser adaptados para compor nota se o contexto escolar exigir, mas o propósito original é o ajuste contínuo do ensino.

Tabela 6: Instrumentos de avaliação formativa: quando aplicar e como usar

Instrumento	Quando Aplicar?	O Que Avalia?	Como Usar?
Questionário A (pré-teste)	Fim da Aula 1	Concepções prévias sobre física moderna	Calibrar profundidade das Aulas 2–3
Questionário B	Fim da Aula 2	Compreensão de eletrônica e PWM	Identificar grupos que precisam de suporte
Questionário C	Fim da Aula 3	Difração, λ e equação da rede	Verificar se a Aula 4 pode avançar
Autoavaliação D	Fim das Aulas 4–6	Participação e autonomia individual	Conversa individual com alunos menos engajados
Coavaliação E	Fim das Aulas 4–6	Dinâmica de colaboração no grupo	Mediar desequilíbrios de participação
Diário de Bordo F	Fim das Aulas 4–6	Processo, reflexão e registro científico	Ler e anotar insights para a próxima aula
Pós-teste G	Fim da Aula 7	Aprendizado consolidado	Calcular g; comparar com Questionário A
Avaliação de Apresentação H	Durante a Aula 7	Apresentação oral e comunicação científica	Feedback escrito individualizado por grupo

Fonte: Autoria própria.

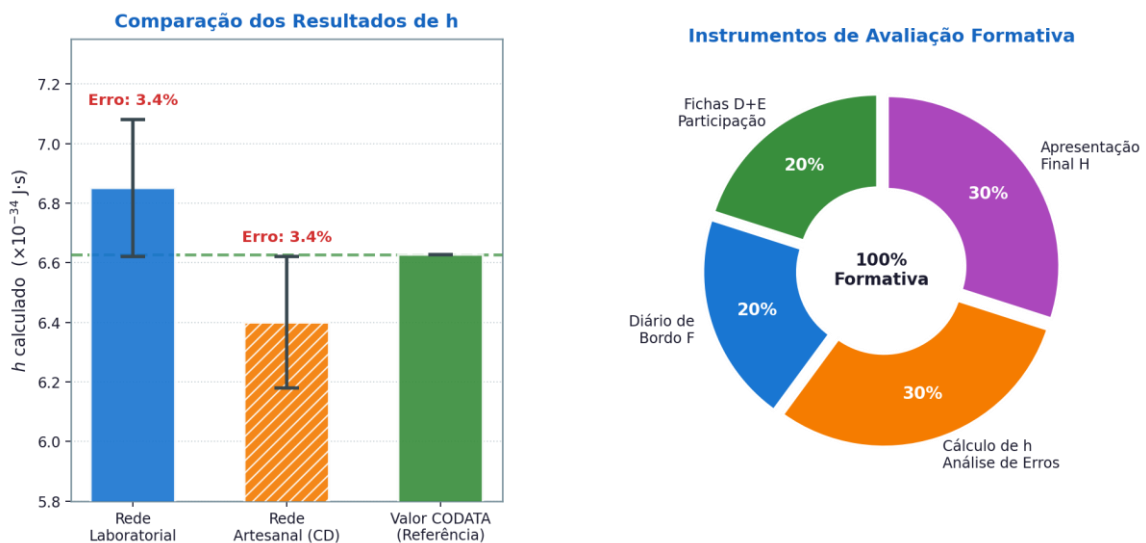
5.1 Como Interpretar o Pós-Teste: o Ganho Normalizado g

O índice g , proposto por Hake (1998, p. 65) e adotado amplamente na pesquisa em ensino de física, compara pré-teste e pós-teste de forma independente do nível inicial da turma:

$$g = \frac{\% \text{ acertos pós} - \% \text{ acertos pré}}{100 - \% \text{ acertos pré}}$$

$g < 0,30 \rightarrow$ ganho baixo | $0,30 \leq g < 0,70 \rightarrow$ ganho médio | $g \geq 0,70 \rightarrow$ ganho alto (HAKE, 1998)

Figura 6: Comparação dos resultados de h e instrumentos de avaliação



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Oliveira (2020).

Na aplicação piloto, o ganho médio foi $g = 0,68$ – muito próximo do nível alto –, com destaque para o conceito de quantização da energia ($g = 0,71$). Esse resultado indica que a experiência experimental foi especialmente eficaz para a compreensão desse conceito central da física quântica (MOREIRA, 2021, p. e20200451).

5.2 Como Ler o Diário de Bordo (Ficha F)

O diário de bordo é o instrumento mais rico e mais subestimado desta proposta. Resnick (2017, p. 88) descreve o diário de processo como um espaço onde o aprendiz "**exterioriza seu pensamento e, ao fazê-lo, o organiza e o aprofunda**". Não o leia buscando respostas corretas. Leia buscando:

- Dificuldades que o grupo não verbalizou em voz alta mas registrou no papel – podem revelar obstáculos conceituais que passariam despercebidos
- Conexões inesperadas com outros conhecimentos – sinal de aprendizagem transferível

- Medições que parecem inconsistentes de uma entrada para outra – pode indicar erro na coleta de dados que vale retomar
- Mudanças de ideia entre entradas – o sinal mais claro de aprendizagem ocorrendo

5.3 Critérios para Compor Nota (opcional)

Tabela 7: Sugestão de pesos para composição de notas (adaptável ao contexto escolar)

Instrumento	Peso Sugerido	Justificativa
Participação: Fichas D + E	20%	Engajamento no processo (RESNICK, 2017)
Diário de Bordo F	20%	Reflexão e registro científico autêntico
Cálculo de h e análise de erros	30%	Competência técnico-científica (BRASIL, 2018)
Apresentação final H	30%	Comunicação científica (MOREIRA, 2021)

Fonte: Autoria própria.

REFERÊNCIAS – GUIA DO PROFESSOR

- BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: MEC, 2018. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- CARUSO, F.; OGURI, V. Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- HAKE, R. R. Interactive-engagement versus traditional methods: a six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, College Park, v. 66, n. 1, p. 64-74, jan. 1998. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- HECHT, E. Óptica. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2017.
- MARTINAZZO, C. A. et al. Arduino: uma tecnologia no ensino de física. *Revista Perspectiva*, Erechim, v. 38, n. 143, p. 21-30, 2014.
- MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 43, p. e20200451, 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0451>
- NEVES, M. C. D. A história da ciência no ensino de física. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 5, n. 1, 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*, Florianópolis, v. 37, n. 2, p. 828-848, ago. 2020. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2020v37n2p828>
- PAIS, A. Sutil é o Senhor: a ciência e a vida de Albert Einstein. Tradução de Fernando Parente e Viriato Esteves. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.
- PAPERT, S. *Mindstorms: children, computers, and powerful ideas*. Nova York: Basic Books, 1980.
- PARALLAX INC. PLX-DAQ v2 – Data Acquisition for Excel. Disponível em: <https://www.parallax.com/package/plx-daq/>. Acesso em: 27 fev. 2026.
- PENHA, Gabriel Serrão. Investigando a constante de Planck por meio de uma abordagem experimental: Uma proposta construcionista para o ensino de Física. 2025. 156 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Rede - Ensino de Física em Rede Nacional/CCET) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.
- RESNICK, M. *Lifelong Kindergarten: cultivating creativity through projects, passion, peers, and play*. Cambridge: 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. <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p824>
- TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. Física moderna. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.



INVESTIGANDO A CONSTANTE DE PLANCK

Caderno de Atividades do Estudante

PARTE 2






Este caderno é SEU. Escreva, risque, rabisque, anote tudo.

Nome: _____

Turma: _____ Escola: _____

Data de início: ____/____/____

O que você vai fazer nessas semanas

-  Montar um experimento óptico com CD e laser
-  Construir e programar um circuito com Arduino
-  Coletar dados reais e calcular uma constante fundamental da física
-  Apresentar seus resultados para a turma
-  Registrar tudo no diário de bordo deste caderno



A validação dos experimentos e os procedimentos detalhados de coleta e análise de dados encontram-se fundamentados na obra de Penha (2025).

AULA 1

6 FÍSICA MODERNA: O MUNDO DO MUITO PEQUENO

Antes de começar, olhe ao redor. Smartphone no bolso? Lâmpada de LED no teto? Tudo isso existe graças à física quântica. Como afirmam Caruso e Oguri (2016, p. 3), **"os fundamentos da física quântica estão incorporados de forma irreversível à civilização tecnológica contemporânea"**. Essa é a teoria que Max Planck começou a construir em 1900 ao propor uma ideia que ele mesmo chamou de "ato de desespero" (PAIS, 1995, p. 438): a energia vem em pacotinhos.

ATIVIDADE A — O que você já sabe?

Responda individualmente, sem consultar nada. Não existe resposta errada – o objetivo é mapear seu ponto de partida (MOREIRA, 2021).

1. Escreva tudo que você sabe – ou acha que sabe – sobre física quântica ou física moderna:

2. Você já ouviu falar da Constante de Planck? O que você sabe sobre ela?

3. Liste 3 tecnologias do seu cotidiano que podem ter relação com a física quântica:

a) _____

b) _____

c) _____

6.1 Questionário A — Verificação de Conceitos Iniciais

Para cada afirmação, marque com X o que melhor representa seu entendimento neste momento. Não há respostas certas ou erradas: este é um instrumento de diagnóstico formativo (RESNICK, 2017):

Pergunta	Entendi bem	Mais ou menos	Não entendi
Por que a energia é emitida em valores discretos (quanta)?	()	()	()
Como a temperatura afeta a cor da luz emitida?	()	()	()
O que são fótons? Consegue dar um exemplo?	()	()	()
Por que corpos quentes emitem luz visível?	()	()	()
Consegue explicar a relação $E = h \times f$?	()	()	()

6.2 Leitura: A história que mudou a física

Era 14 de dezembro de 1900. Max Planck, físico alemão de 42 anos, apresentou uma proposta que ele mesmo considerava provisória e matematicamente forçada: a energia não podia ter qualquer valor – só existia em múltiplos inteiros de um valor mínimo, o **quantum** (quantidade mínima indivisível de energia). O tamanho de cada quantum é determinado pela expressão $E = h \times f$, em que h é a constante de Planck e f , a frequência da radiação (TIPLER; LLEWELLYN, 2014, p. 94).

O problema que motivou essa hipótese radical era o chamado "espectro do corpo negro". A física clássica previa que objetos aquecidos deveriam emitir energia infinita em frequências altas – algo obviamente impossível. Tipler e Llewellyn (2014, p. 88) descrevem esse impasse como "a crise mais profunda da física clássica, que só poderia ser resolvida com uma ruptura conceitual radical". Essa ruptura foi a quantização da energia.

Planck resolveu o problema com uma fórmula que funcionava — mas ao custo de aceitar que energia não é contínua: ela vem em pacotes. O tamanho de cada pacote é determinado pela constante h – a constante de Planck – multiplicada pela frequência da luz (CARUSO; OGURI, 2016).

A fórmula mais importante deste curso

$$E = h \times f$$

E → energia do fóton (joules) | h → $6,626 \times 10^{-34}$ J·s | f → frequência da luz (hertz). Cada "pacotinho" de luz (fóton) tem uma energia que depende diretamente de sua frequência. Luz azul (f alta) tem fótons mais energéticos que luz vermelha (f baixa). Não existe meio fóton (TIPLER; LLEWELLYN, 2014).

ATIVIDADE A2 — Após a Aula — Reflexão

Após ouvir a explicação do professor, responda com base no que compreendeu:

1. Na sua própria linguagem: o que é a "quantização da energia"? Por que isso era uma ideia tão radical em 1900 (PAIS, 1995)?

2. O professor mostrou que LEDs usam física quântica. Por que a cor de um LED é sempre a mesma, independentemente da voltagem aplicada? (Dica: pense na relação $E = h \times f$ e na faixa de frequências que o LED emite — TIPLER; LLEWELLYN, 2014.)

3. O que mais te surpreendeu ou deixou com curiosidade nesta aula?

AULA 2

7 CONHECENDO O ARDUINO: SEU LABORATÓRIO DE BOLSO

Você está prestes a programar um computador para controlar um laser e coletar dados científicos. Martinazzo *et al.* (2014, p. 2) demonstraram que o uso do Arduino no ensino médio "reduz a distância entre a física teórica e a instrumentação científica, tornando o aluno agente da medição, não apenas receptor dos resultados". Não precisa ser engenheiro. Precisa ser curioso.

ATIVIDADE B — Explorando a Placa Arduino

Com o Arduino na mão, observe a placa e identifique os componentes abaixo. Este mapeamento físico reduz a ansiedade tecnológica e aumenta o engajamento nas etapas seguintes (MARTINAZZO *et al.*, 2014).

Componente	Descrição	Para que serve no experimento
Microcontrolador ATmega328P	O "cérebro" da placa — 8 bits, 16 MHz	Processa o código e controla o laser
Pinos digitais 0–13	Saídas e entradas digitais (0 ou 5 V)	Pino 6 → sinal PWM para o laser
Pinos analógicos A0–A5	Conversão analógico-digital (10 bits, 0–5 V)	A0 e A1 → medir tensão e corrente
Porta USB tipo B	Conecta ao computador	Upload do código + envio de dados via serial
LED "L" (pino 13, builtin)	LED embutido na placa	Pisca para confirmar que o código está rodando
Pino GND	Terra elétrico (referência 0 V)	Referência de tensão para todo o circuito
Pino 5V	Saída regulada de 5 volts	Alimentação de sensores (não usaremos aqui)

7.1 O que é PWM e Por Que Precisamos?

O Arduino Uno não possui conversor digital-analógico (DAC). Para gerar tensões intermediárias, utiliza modulação por largura de pulso (PWM): o pino alterna entre 5 V e 0 V em alta frequência (490 Hz no pino 6), e o valor médio – percebido pelo circuito como uma tensão analógica – depende da razão entre o tempo em 5 V e o período total (MARTINAZZO *et al.*, 2014). Com o filtro RC, esse sinal pulsado é suavizado em uma tensão DC estável, permitindo varrer continuamente a tensão aplicada ao laser de 0 a 5 V (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Analogia do Ventilador (para fixar o conceito)

Imagine um ventilador com botão Liga/Desliga. Se você ligar e desligar muito rápido – tipo 100 vezes por segundo – e ficar metade do tempo ligado, o ventilador vai girar como se estivesse na metade da potência. O PWM faz exatamente isso com o laser: varia o "tempo ligado" para controlar a tensão média aplicada (adaptado de MARTINAZZO *et al.*, 2014).

7.2 Questionário B — Componentes Eletrônicos

Marque seu nível de compreensão após a aula (instrumento formativo – sem nota):

Conceito	Entendi bem	Mais ou menos	Não entendi
Para que serve o pino GND?	()	()	()
Por que precisamos de um resistor com o laser?	()	()	()
O que é e para que serve o PWM?	()	()	()
O que faz o capacitor no filtro RC?	()	()	()
Como o Arduino envia dados para o Excel?	()	()	()

7.3 Roteiro de Montagem do Circuito — Verifique Cada Etapa

O circuito foi validado experimentalmente por Oliveira *et al.* (2020). Siga os passos e marque o que já foi feito:

- Conectar pino GND do Arduino à trilha negativa do protoboard
- Conectar pino 6 (PWM) a uma linha do protoboard

- Inserir resistor shunt de 47Ω entre o cátodo (–) do laser e o GND (medidor de corrente)
- Inserir capacitor de $10\text{--}100 \mu\text{F}$ entre essa linha e o GND (respeitar polaridade!)
- Conectar o laser: ânodo (+) ao nó D6-capacitor, cátodo (–) ao resistor shunt
- Conectar pino A0 ao nó do ânodo do laser (mesmo ponto de D6 e capacitor +) — medição de tensão total
- Conectar pino A1 ao nó cátodo-resistor shunt — medição de corrente: $I = V(A1) \div 47 \Omega$
- Mostrar a montagem ao professor antes de conectar o Arduino ao computador

Observações e dificuldades encontradas na montagem:

Por que o resistor shunt de 47Ω fica entre o cátodo do laser e o GND, e não em série antes do laser? O que essa posição permite medir? (Dica: pense na lei de Ohm aplicada ao shunt de corrente — TIPLER; LEWELLYN, 2014.)

AULA 3

8 LUZ, ONDAS E O MISTÉRIO DOS PONTOS COLORIDOS

Já reparou nos pontos coloridos que aparecem quando uma luz bate em um CD? Isso é difração – e é a mesma física que vamos usar para medir a constante de Planck. Santos *et al.* (2015) demonstraram que o CD funciona como uma rede de difração de baixo custo, com espaçamento entre sulcos de aproximadamente $1,6 \times 10^{-6}$ m, "suficiente para produzir padrões de difração visíveis e mensuráveis com luz laser de apontador comercial".

8.1 O Fenômeno de Difração

Quando a luz passa por uma abertura ou por uma superfície com ranhuras finas e igualmente espaçadas, ela se espalha e interfere consigo mesma. O resultado é um padrão de franjas – máximos e mínimos de intensidade luminosa – que chamamos de padrão de difração. A posição dos máximos depende diretamente do comprimento de onda λ da luz. Conforme explica Hecht (2017, p. 461), "a rede de difração separa a luz em suas componentes espectrais com uma precisão superior à de qualquer prisma de vidro". A equação fundamental da rede é:

$$d \cdot \text{sen}(\theta) = m \cdot \lambda,$$

em que d é o espaçamento entre as linhas da rede (em metros), θ é o ângulo do máximo de difração, m é a ordem do máximo (usaremos $m = 1$) e λ é o comprimento de onda da luz que queremos calcular (HECHT, 2017).

ATIVIDADE C — Minha Primeira Medição do Padrão de Difração

Após a demonstração do professor, observe o padrão formado pelo laser na parede e registre:

1. Quantos pontos de luz você observou no anteparo? Descreva o padrão com suas palavras:

2. Complete a tabela de medições com os valores obtidos com a régua:

Grandeza medida	Símbolo	Valor medido	Unidade
Distância rede → anteparo	L		cm
Distância máximo central → 1.º máximo lateral	y_1		cm
Espaçamento da rede (fornecido pelo professor)	d	fornecido	m

3. Cálculo do ângulo θ_1 usando trigonometria (HECHT, 2017):

$$\tan(\theta_1) = y_1 \div L = \underline{\hspace{2cm}} \div \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\theta_1 = \arctan(\underline{\hspace{2cm}}) = \underline{\hspace{2cm}}^\circ$$

$$\text{sen}(\theta_1) = \underline{\hspace{2cm}}$$

4. Cálculo do comprimento de onda λ (aplicando $d \cdot \text{sen}(\theta_1) = 1 \cdot \lambda$):

$$\lambda = d \times \text{sen}(\theta_1) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m} \times \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ nm}$$

5. O apontador laser vermelho típico emite entre 630 nm e 680 nm. Seu resultado está dentro desse intervalo? O que pode ter causado eventuais desvios? (SANTOS *et al.*, 2015)

8.2 Questionário C — Difração

Pergunta	Entendi bem	Mais ou menos	Não entendi
O que é um padrão de difração?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Como o espaçamento d da rede afeta o padrão?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Como calcular λ a partir das medições de L e y_1 ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Por que o CD funciona como rede de difração?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

AULAS 4 E 5

9 MÃOS NA MASSA: COLETANDO OS DADOS

Estas são as aulas centrais de todo o roteiro. Você vai usar o Arduino para varrer a tensão aplicada ao laser e observar exatamente quando ele começa a emitir luz coerente – a tensão limiar U_0 . Oliveira *et al.* (2020, p. 833) descrevem essa etapa como "a fase mais rica do experimento, pois permite ao estudante observar em tempo real a transição do regime espontâneo para o regime estimulado de emissão de radiação". Registre tudo com cuidado – você precisará desses dados na Aula 6.

9.1 Como operar o PLX-DAQ para coletar dados

O PLX-DAQ é uma planilha Excel com macro que recebe os dados enviados pelo Arduino via porta serial. Antes de iniciar a varredura, siga estes passos: (1) abra o arquivo PLX-DAQ no Excel e habilite as macros (Arquivo → Opções → Central de Confiabilidade → Configurações de Macro → Habilitar todas as macros); (2) na aba do PLX-DAQ, selecione a porta COM correspondente ao Arduino (a mesma usada na Arduino IDE) e a velocidade de 9600 baud; (3) clique em **Connect** — a planilha ficará aguardando dados; (4) abra a Arduino IDE e faça upload do código de varredura $I \times V$; os dados começarão a aparecer automaticamente nas colunas da planilha; (5) ao final da varredura (quando o Arduino parar de enviar), clique em **Disconnect** e gere o gráfico de dispersão (Tensão \times Corrente) para identificar o joelho da curva $I \times V$. Dúvidas? Consulte o professor antes de coletar dados (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 836).

9.2 Experimento 1 — Rede Artesanal com CD (Aula 4)

O CD inutilizado funciona como rede de difração graças a seus sulcos em espiral, com espaçamento de aproximadamente $1,6 \times 10^{-6}$ m. Embora o espaçamento não seja perfeitamente regular como em redes laboratoriais, Santos *et al.* (2015) demonstraram que o erro introduzido por essa irregularidade é "inferior a 5% para comprimentos de onda no visível", o que é aceitável para fins didáticos.



ATIVIDADE D1 — Coleta de Dados — Rede Artesanal

Com o banco ótico montado com CD, preencha a tabela e registre as observações:

Grandeza	Símbolo	Valor medido	Unidade
Distância rede → anteparo	L		cm
Distância ao 1.º máximo lateral	y_1		cm
$\text{sen}(\theta_1)$ calculado	$\text{sen } \theta$		—
Passo da rede (CD)	d	$\approx 1,6 \times 10^{-6}$	m
Tensão limiar do laser (gráfico I-V)	U_0		V
Ordem de difração usada	m	1	—

Como você identificou o ponto de tensão limiar U_0 no gráfico? Descreva o que observou na curva I-V e como determinou o "joelho" da curva (OLIVEIRA *et al.*, 2020):

Que dificuldades o grupo encontrou durante a montagem ou a coleta? Como as resolveram?

9.3 Experimento 2 — Rede Laboratorial (Aula 5)

A rede laboratorial possui 1000 linhas/mm, o que equivale a um espaçamento $d = 1,0 \times 10^{-6}$ m – mais preciso e regular que o CD. Hecht (2017, p. 465) explica que "redes de difração com maior densidade de linhas produzem ângulos de difração maiores, facilitando a medição e reduzindo o erro relativo".

ATIVIDADE D2 — Coleta de Dados — Rede Laboratorial

Repita o experimento com a rede laboratorial e preencha:

Grandeza	Símbolo	Valor medido	Unidade
Distância rede → anteparo	L		cm
Distância ao 1.º máximo lateral	y_1		cm
$\text{sen}(\theta_1)$ calculado	$\text{sen}\theta$		—
Passo da rede laboratorial	d	$1,0 \times 10^{-6}$	m
Tensão limiar do laser (gráfico I-V)	U_0		V

O padrão de difração da rede laboratorial é visualmente diferente do CD? Descreva as diferenças e explique por que ocorrem, com base na equação $d \times \text{sen}(\theta) = m \times \lambda$ (HECHT, 2017):

9.4 Ficha E — Coavaliação do Grupo

Avalie o desempenho do seu grupo (escala 1 a 5). A coavaliação é um instrumento de desenvolvimento da aprendizagem colaborativa (RESNICK, 2017):

Afirmação	1	2	3	4	5
O grupo trabalhou de forma colaborativa e respeitosa	()	()	()	()	()
Todos participaram de maneira equilibrada	()	()	()	()	()
O grupo soube superar dificuldades com criatividade	()	()	()	()	()
Houve boa comunicação entre os membros	()	()	()	()	()
O grupo atingiu os objetivos propostos	()	()	()	()	()

O que o grupo poderia fazer diferente para melhorar o trabalho coletivo?

Lembrete — Ficha D (Autoavaliação Individual)

Ao final de cada uma das Aulas 4, 5 e 6, preencha individualmente a **Ficha D — Autoavaliação Individual**, localizada na seção da Aula 7 deste caderno. Ela será utilizada pelo professor para acompanhar sua participação e autonomia ao longo do processo experimental (RESNICK, 2017).

AULA 6

10 CALCULANDO A CONSTANTE DE PLANCK

Você tem todos os dados. Agora é hora de fazer o cálculo que une difração e laser, óptica e física quântica, em um único número: h . Oliveira *et al.* (2020, p. 831) derivam a fórmula experimental a partir da igualdade entre a energia do fóton emitido ($E = hc/\lambda$) e o trabalho elétrico realizado sobre o elétron ($E = eU_0$):

A Fórmula Experimental (OLIVEIRA *et al.*, 2020)

$$h = \frac{e \times U_0 \times d \times \text{sen } \theta_1}{c \times m}$$

$e = 1,602 \times 10^{-19}$ C (carga do elétron) | $c = 2,998 \times 10^8$ m/s (velocidade da luz) | $m = 1$ (primeira ordem)

Você mediu: U_0 (Aulas 4 e 5), d e $\text{sen}(\theta_1)$ (Aulas 3, 4 e 5)

 **ATIVIDADE F1 — Calculando h com a Rede Artesanal**

Use os dados da Aula 4 e a fórmula acima. Mostre todos os passos do cálculo.

Valores que vou usar:

$e = 1,602 \times 10^{-19}$ C $U_0 =$ _____ V $d =$ _____ m $\text{sen}(\theta_1) =$ _____ $c =$
 $2,998 \times 10^8$ m/s

Cálculo passo a passo (escreva cada operação — não pule etapas):

Meu resultado: $h =$ _____ J·s

Erro relativo em relação ao valor real ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ J·s – CODATA apud TIPLER;

LLEWELLYN, 2014):

$$\text{Erro (\%)} = \frac{|h_{\text{experimental}} - h_{\text{real}}|}{h_{\text{real}}} \times 100 = \underline{\hspace{2cm}} \%$$

 **ATIVIDADE F2 — Calculando h com a Rede Laboratorial**

Repita o cálculo com os dados da Aula 5:

$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \quad U_0 = \underline{\hspace{1cm}} \text{ V} \quad d = \underline{\hspace{1cm}} \text{ m} \quad \text{sen}(\theta_1) = \underline{\hspace{1cm}}$$

Cálculo passo a passo:

Meu resultado: $h = \underline{\hspace{2cm}}$ J·s

Erro relativo: $\underline{\hspace{1cm}}$ %

10.1 Comparação e Análise dos Resultados

Experimento	h calculado (J·s)	h real (CODATA)	Erro (%)
Rede artesanal (CD)		$6,626 \times 10^{-34}$	
Rede laboratorial		$6,626 \times 10^{-34}$	
Média da turma		$6,626 \times 10^{-34}$	

1. Qual dos dois experimentos deu resultado mais próximo do valor real? Por que você acha que isso aconteceu? (Pense no espaçamento d de cada rede – SANTOS *et al.*, 2015.)

2. Liste pelo menos 3 fontes de incerteza experimental que podem ter afetado seus resultados:

- Fonte 1: _____
- Fonte 2: _____
- Fonte 3: _____

3. Oliveira *et al.* (2020, p. 843) obtiveram erros entre 2,5% e 5,0% com Arduino em condições similares. Seu grupo ficou dentro desse intervalo? O que isso indica sobre a qualidade da medição?

AULA 7

11 APRESENTAÇÃO FINAL: VOCÊ É O CIENTISTA

Chegou a hora de compartilhar o que você fez e aprendeu. Papert (1980, p. 8) argumenta que a aprendizagem mais profunda acontece quando "o aprendiz constrói algo partilhável" – algo que existe no mundo e pode ser mostrado, discutido e criticado. A apresentação é exatamente esse momento. Resnick (2017) a denomina "reflexão compartilhada" e a descreve como o ponto onde a aprendizagem individual se transforma em conhecimento coletivo.

11.1 Roteiro de Preparação da Apresentação

Organize sua apresentação em 5 a 7 minutos. Use os dados do seu caderno como base.

Parte	O Que Apresentar	Tempo sugerido
1. O problema	O que é a constante de Planck (h) e qual sua importância? (CARUSO; OGURI, 2016)	~1 min
2. O método	Como vocês montaram o experimento? O que fizeram?	~2 min
3. Os resultados	Quais valores de h encontraram? Qual foi o erro?	~2 min
4. O que aprendemos	O que funcionou, o que deu errado, o que surpreendeu?	~1 min
5. Conclusão	Uma frase que resuma o aprendizado do grupo	~30 seg

11.2 Ficha D — Autoavaliação Individual

Marque com X (1 = discordo totalmente, 5 = concordo totalmente). A autoavaliação é uma prática de metacognição – pensar sobre o próprio pensamento (RESNICK, 2017):

Afirmação	1	2	3	4	5
Participei ativamente de todas as etapas	()	()	()	()	()
Contribuí com ideias e ajudei meus colegas	()	()	()	()	()
Compreendi os conceitos físicos do experimento	()	()	()	()	()
Demonstrei autonomia para resolver problemas	()	()	()	()	()
Me senti motivado(a) ao participar das atividades	()	()	()	()	()

O que aprendi de mais importante neste projeto – em Física e sobre trabalho científico:

11.3 Questionário G — Pós-Teste

Responda individualmente. Suas respostas serão comparadas com o Questionário A para calcular o ganho de aprendizagem normalizado (g) proposto por Hake (1998) e aplicado neste contexto por Moreira (2021):

1. O que é a constante de Planck e qual é sua importância na física moderna? (CARUSO; OGURI, 2016)

2. A relação entre energia e frequência de um fóton é:

- Quanto maior a energia, menor a frequência.
- Quanto maior a frequência, maior a energia. ($E = h \times f$)
- Energia e frequência são grandezas independentes.
- Não sei responder.

3. No experimento, o que nos permitiu calcular o comprimento de onda λ do laser?

- O gráfico $I \times V$ gerado pelo Arduino.
- A tensão limiar U_0 do diodo laser.
- A medição do padrão de difração na rede [$d \times \text{sen}(\theta) = m \times \lambda$].
- O resistor de 47Ω do circuito.

4. O que é a tensão limiar U_0 do laser e por que ela é importante para o cálculo de h ? (OLIVEIRA *et al.*, 2020)

5. O uso do Arduino facilitou o experimento em comparação com um método puramente manual? Justifique com base na sua experiência (MARTINAZZO *et al.*, 2014):

6. Nível de aprendizado percebido (1 a 5): 1 2 3 4 5

7. Você gostaria de fazer outros experimentos como este? Sim Talvez Não

11.4 Ficha H — Avaliação de Apresentação

Avalie a apresentação do grupo indicado (1 = Insuficiente, 2 = Regular, 3 = Bom, 4 = Muito Bom, 5 = Excelente). Esta ficha é usada pelo professor durante a Aula 7 para registrar o desempenho comunicativo de cada grupo (MOREIRA, 2021):

Grupo avaliado: _____ Aula: ____/____/_____

Critério de Avaliação	1	2	3	4	5
Clareza na apresentação do problema e do método experimental					
Precisão na descrição dos resultados obtidos e do erro relativo calculado					
Qualidade da análise: identificação das fontes de erro e comparação entre redes					
Capacidade de responder perguntas da turma com coerência científica					
Trabalho em equipe e participação equilibrada de todos os membros					

Pontuação total (soma): _____ / 25 Média ($\div 5$): _____

Feedback escrito para o grupo (pontos fortes e sugestões de melhoria):

12 DIÁRIO DE BORDO — FICHA F

O diário de bordo é o instrumento mais rico desta sequência. Resnick (2017, p. 88) descreve o diário de processo como um espaço onde o aprendiz "**exterioriza seu pensamento e, ao fazê-lo, o organiza e o aprofunda**". Seja honesto: o que deu certo, o que deu errado e o que o grupo aprendeu com cada um.

Grupo: _____

Membros:

 ENTRADA 1 — Aula 4

Data: ____/____/____

Objetivo da aula (com suas palavras — sem copiar do caderno):

O que fizemos — resumo das atividades desenvolvidas pelo grupo:

Principais dificuldades encontradas (técnicas, conceituais ou de colaboração):

Como o grupo resolveu (ou tentou resolver) essas dificuldades:

Aprendizado mais importante do dia:

Dúvidas que ficaram para o professor responder na próxima aula:

 ENTRADA 2 — Aula 5

Data: ____/____/____

O que o grupo fez de diferente em relação à Aula 4?

Comparação dos resultados: rede artesanal vs. rede laboratorial. O que foi diferente? Santos *et al.* (2015) e Oliveira *et al.* (2020) obtiveram diferenças comparáveis. Como se explicam?

O que o grupo melhorou no processo experimental?

Algo que nos surpreendeu hoje (resultado inesperado, dificuldade superada, conexão nova):

 ENTRADA 3 — Aula 6

Data: ____/____/____

Nosso valor de h — rede artesanal: _____ J·s | Erro: _____% em relação a $6,626 \times 10^{-34}$ J·s

Nosso valor de h — rede laboratorial: _____ J·s | Erro: _____%

O que mais nos orgulhamos neste projeto? Por quê?

O que faríamos diferente se repetíssemos o experimento? (Pense nas fontes de erro identificadas — OLIVEIRA *et al.*, 2020.)

Uma frase que resume o aprendizado do grupo ao longo de todo o projeto:

REFERÊNCIAS — CADERNO DO ESTUDANTE

CARUSO, F.; OGURI, V. Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HECHT, E. Óptica. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2017.

MARTINAZZO, C. A. et al. Arduino: uma tecnologia no ensino de física. Revista Perspectiva, Erechim, v. 38, n. 143, p. 21-30, 2014.

MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 43, p. e20200451, 2021.

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, Florianópolis, v. 37, n. 2, p. 828-848, 2020.

PAIS, A. Sutil é o Senhor: a ciência e a vida de Albert Einstein. Tradução de Fernando Parente e Viriato Esteves. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

PAPERT, S. Mindstorms: children, computers, and powerful ideas. Nova York: Basic Books, 1980.

PENHA, Gabriel Serrão. Investigando a constante de Planck por meio de uma abordagem experimental: Uma proposta construcionista para o ensino de Física. 2025. 156 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Rede - Ensino de Física em Rede Nacional/CCET) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

RESNICK, M. Lifelong Kindergarten: cultivating creativity through projects, passion, peers, and play. Cambridge: 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. <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p824>

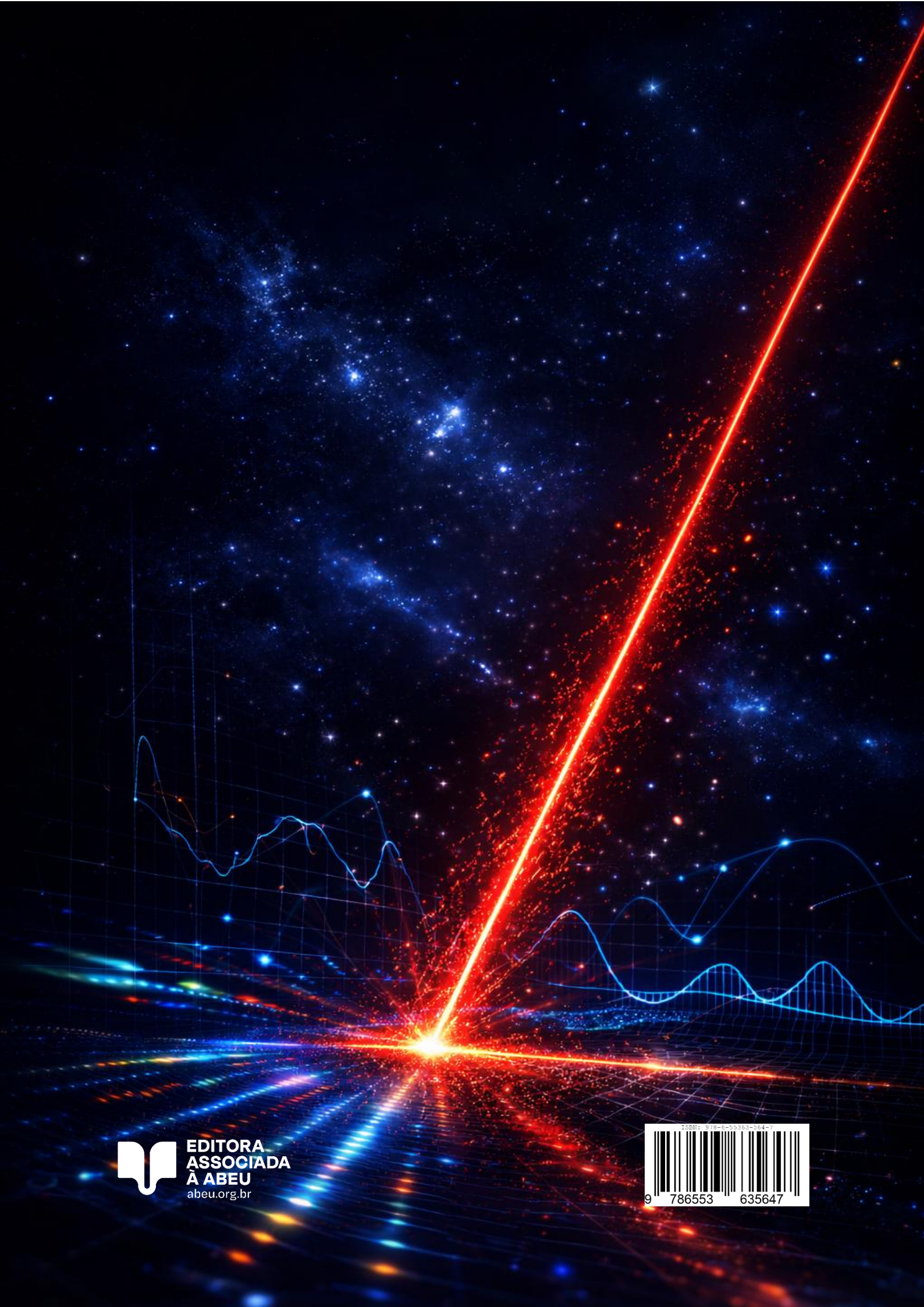
TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. Física moderna. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

"A ciência não é apenas um corpo de conhecimento. É uma forma de pensar."

— Carl Sagan

Realizado o Depósito legal na Biblioteca Nacional conforme a Lei nº 10.994, de 14 de dezembro de 2004.

TÍTULO	ROTEIRO DE APRENDIZAGEM ATIVA PARA A INVESTIGAÇÃO DO QUANTUM: determinação da constante de Planck por meio de experimentos acessíveis no ensino médio
AUTORES	Gabriel Serrão Penha Edson de Carvalho
SUPORTE	Digital
PROJETO GRÁFICO	Edson de Carvalho
ILUSTRAÇÃO DA CAPA	Edson de Carvalho
PÁGINAS	73
FORMATO	210 x 297 mm
TIPOGRAFIA	Adobe Garamond Pro CORPO Balham e Aquiline Two TÍTULOS



**EDITORA
ASSOCIADA
À ABEU**
abeu.org.br



9

786553

635647