

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO
PAULO - IFSP CÂMPUS CAMPINAS
TÉCNICO EM INFORMÁTICA INTEGRADO AO ENSINO MÉDIO**

LUANA IÓRIO FANTINATTI
LUCAS BIAZON PALMA
VICTOR SAMUEL DOS SANTOS

**IFOTOM: ESPECTROFOTÔMETRO DE ABSORÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA
SMARTPHONES**

CAMPINAS - SP

2025

LUANA IÓRIO FANTINATTI
LUCAS BIAZON PALMA
VICTOR SAMUEL DOS SANTOS

**IFOTOM: ESPECTROFOTÔMETRO DE ABSORÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA
SMARTPHONES**

Projeto apresentado ao curso de Técnico em
Informática Integrado ao Ensino Médio do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São
Paulo - Campus Campinas como requisito parcial
para aprovação na disciplina Projeto Integrador IV.
Orientador: Prof. Márcio André Miranda e Profa.
Thalita Biazuz Veronese.

CAMPINAS - SP

2025

RESUMO

Descrevemos o desenvolvimento de um espectrofotômetro de baixo custo voltado ao ensino, composto por protótipo físico, aplicativo móvel e serviço de processamento. O protótipo foi modelado no Blender e impresso em 3D com material preto opaco, incorporando chicanas e arranjo de feixe duplo com duas cubetas de 1 cm, espelho adesivo e rede de difração de 1000 linhas por milímetro; a fonte é um diodo emissor de luz branca. O software inclui um aplicativo em React Native (Android/iOS) e uma API em Python (FastAPI) para calibração de comprimento de onda com lasers de 532 e 650 nanômetros, geração de espectros e cálculo de absorbância. O app organiza a operação em telas sequenciais, registra metadados e oferece o módulo pedagógico iFOTOM Aprender e um bloco de notas. Resultados parciais: modelo 3D concluído com revisões óptico-mecânicas; módulo pedagógico finalizado; telas de aquisição em estágio avançado; API funcional em testes isolados; fluxos metodológicos do app e da API documentados. Custo estimado do protótipo: R\$ 358,80. O sistema ainda não foi testado de forma integrada. Próximos passos: integração completa e validação experimental (curva com permanganato de potássio, ensaio colorimétrico para nitrato a 545 nm, estudo de repetibilidade e condições ótimas).

Palavras-chave: Espectrofotometria de Absorção; protótipo 3D; espectrofotômetro; smartphone; ensino-aprendizagem.

ABSTRACT

We report the development of a low-cost, education-oriented spectrophotometer comprising a physical prototype, a mobile app, and a processing service. The prototype was modeled in Blender and 3D-printed in black material, with internal baffles and a dual-beam layout: two 1 cm cuvettes (sample/reference), an adhesive mirror, and a 1000 lines/mm diffraction grating; illumination is a white LED. The software includes a React Native app (Android/iOS) and a Python API (FastAPI) for wavelength calibration using 532 nm and 650 nm lasers, spectrum generation, and absorbance calculation. The app guides users through sequential screens, records capture metadata, and provides the pedagogical “iFOTOM Learn” module plus a notes block. Partial results: the 3D model is complete with opto-mechanical revisions; the pedagogical module is finished; acquisition screens are in an advanced stage; the API is functional in isolated tests; and end-to-end methodological flows (app and API) are documented. The estimated prototype cost is BRL 358.80. The system has not yet been tested end-to-end. Next steps: full integration and experimental validation (calibration curve with potassium permanganate, colorimetric nitrate assay at 545 nm, and studies of repeatability and optimal operating conditions).

Keywords: Absorption Spectrophotometry; 3D prototype; spectrophotometer; smartphone; teaching-learning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da luz transmitida e da luz incidente ao incidir um analito.

Figura 2: Tabela exemplificando medições de absorbância de uma substância, cujas concentrações são conhecidas.

Figura 3: Plotagem do gráfico de absorbância x concentração utilizando dados da figura 2.

Figura 4: Componentes típicos de um espectrofotômetro.

Figura 5: Software Blender e modelagem de protótipo.

Figura 6: Bibliotecas da linguagem Python.

Figura 7: Mini-spectrometer C12880MA

Figura 8: Espectrofotômetro: dual-beam smartphone visible spectrometer

Figura 9: Esquema do caminho óptico (LED, cubetas, espelho, rede de difração)

Figura 10: Modelo CAD

Figura 11: Fluxo de telas do aplicativo

Figura 12: fluxograma do processamento

Figura 13: (A) Componentes individuais antes da montagem final. (B) Estrutura principal montada, evidenciando o compartimento para as cubetas e o caminho óptico. (C) Detalhe do encaixe do smartphone para a captura de imagem do espectro.

Figura 14: Menu principal do módulo "iFOTOM Aprender", com seções de aprendizagem, soluções e desafios. (B) Módulo de teste de conhecimento. (C) Tela dos módulos teóricos. (D) Simulador interativo de cores complementares.

Figura 15: Telas referentes ao módulo pedagógico

Figura 16: Telas referentes ao sistema de bloco de notas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivos.....	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1 Princípios da Espectrofotometria de Absorção.....	10
2.1.1 Transmitância e absorbância.....	10
2.1.2 Curva de calibração.....	11
2.1.3 Lei de Lambert-Beer.....	12
2.2 Componentes Ópticos de um Espectrofotômetro.....	12
2.3. Uso de Smartphones como Detectores Ópticos.....	13
2.4. Tecnologias de Prototipagem.....	14
2.4.1. Modelagem no Blender.....	14
2.5. Tecnologia de desenvolvimento de aplicações.....	15
2.5.1. Plataforma Mobile.....	15
2.5.2. API de processamento.....	15
2.6. Projetos semelhantes.....	16
3. METODOLOGIA E MATERIAIS.....	18
4. RESULTADOS DO PROJETO.....	22
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

1 INTRODUÇÃO

A espectrofotometria é uma técnica da Química Analítica utilizada para identificar e quantificar substâncias ou componentes em amostras, baseando-se nas suas interações com a luz. O estudo das propriedades ópticas de um material se fundamenta em como ele absorve, transmite e reflete luz, dessa forma, permite análise em diversas áreas. O espectrofotômetro é o instrumento central nessa técnica que monitora a intensidade da luz absorvida por um analito (Jarujareet et al., 2023). Em razão da relação direta entre a concentração de uma substância e a quantidade de luz que ela absorve, a espectrofotometria na faixa de luz visível (VIS) tem aplicações significativas no diagnóstico clínico, pesquisas biomédicas e análises laboratoriais químicas (Grasse et al., 2016).

Em laboratórios de bioquímica, o espectrofotômetro é utilizado como medidor da resposta óptica em ensaios de imunoadsorção enzimática (ELISA) (Long; Yu; Cunningham, 2014). Além dessa aplicação, o equipamento também é usado na detecção de ácido ascórbico (vitamina C) em amostras biológicas, tal qual em testes químicos voltados à avaliação da qualidade da água (Feng, Jiansheng et al., 2021).

Devido à vasta gama de aplicações da espectrofotometria de absorção, torna-se essencial ensinar aos alunos seu funcionamento e os fenômenos ópticos envolvidos na sua utilização desde cedo nas escolas. No entanto, o acesso à instrumentação analítica é um desafio, principalmente por causa do alto custo desses equipamentos. No Brasil, o preço médio de um espectrofotômetro de absorção VIS gira em torno de R\$4 mil ¹, o que torna inviável sua compra por muitas instituições de ensino de Educação Básica, especialmente as públicas. Já em instituições de ensino com recursos, com equipamentos laboratoriais modernos, os princípios fundamentais da medição são obscurecidos por interfaces digitais, dificultando o seu aprendizado (Bogucki et al., 2019).

Desde o lançamento do primeiro smartphone da Apple, em janeiro de 2007, o avanço na potência computacional e na qualidade dos sensores de imagem tornou esses aparelhos em plataformas promissoras para a construção de espectrofotômetros educacionais. Oferecendo uma solução de baixo custo, interativa e capaz de envolver os alunos no processo de aprendizagem e ensinar os princípios fundamentais da espectrofotometria, ao mesmo tempo em que servem como ferramenta de apoio para educadores. Além disso, os smartphones

¹ <https://www.lojanetlab.com.br/produto/espectrofotometro-faixa-visivel-325-1020nm-k37-vis-kasvi-163818>

também facilitam o uso de softwares para análise de imagens, permitindo o desenvolvimento de aplicativos capazes de processar os dados obtidos, armazenar anotações e auxiliar tanto alunos quanto professores durante as atividades práticas (Jarujareet et al., 2023).

Além dos smartphones, a modelagem 3D também desempenha um papel fundamental na construção de espectrofotômetros educacionais de baixo custo. Diversos modelos foram desenvolvidos ao longo dos anos, mas aqueles que apresentaram melhores resultados em termos de desempenho, compacidade e custo-benefício foram projetados com auxílio de modelagem 3D. Essa abordagem facilita o posicionamento preciso dos componentes ópticos, garante maior estabilidade estrutural e proporciona um leve isolamento da luz ambiente. Esses dispositivos geralmente utilizam smartphones como sensores e adotam configurações ópticas como feixe duplo e grade de difração para melhorar a qualidade das medições (Grasse et al., 2016).

Diante desse cenário, este trabalho propõe a construção de um espectrofotômetro de absorção voltado para o uso educacional, com baixo custo e fácil montagem. A proposta utiliza modelagem 3D para a criação da estrutura do aparelho, um smartphone como sensor óptico e uma plataforma mobile desenvolvida especialmente para o projeto. Essa plataforma será usada para analisar as imagens capturadas, armazenar dados e anotações, além de auxiliar no estudo dos princípios da espectrofotometria e do funcionamento do equipamento.

1.1 Objetivos

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um espectrofotômetro de absorção na faixa da luz visível de baixo custo para uso em smartphones, oferecendo uma alternativa acessível para o ensino de espectrofotometria.

Esse projeto tem como objetivos específicos: a) desenvolver um protótipo físico do espectrofotômetro por meio de modelagem 3D; b) criar uma plataforma mobile para processamento de imagens e guia didático de aprendizado; c) comparar o custo-benefício do protótipo com espectrofotômetros comerciais; d) validar o desempenho analítico do protótipo por meio da análise de curvas de calibração com padrões de concentração conhecida; e) comparar a precisão e a exatidão das medições do protótipo com as de um espectrofotômetro comercial, utilizando as mesmas amostras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Princípios da Espectrofotometria de Absorção

A espectrofotometria de absorção é uma técnica analítica baseada na capacidade que átomos e moléculas possuem de absorver radiação eletromagnética em comprimentos de onda específicos. Quando a luz atinge uma amostra, parte dessa radiação é absorvida pelas partículas presentes, e o restante é transmitido. A medição da quantidade de luz transmitida em diferentes comprimentos de ondas em função da quantidade de luz que incidiu pela amostra permite identificar e quantificar substâncias com base no seu padrão de absorção (Jarujareet et al., 2023).

2.1.1 Transmitância e absorbância

A transmitância (Equação 1) é a medida de luz incidente em um comprimento de onda específico que atravessa o material sem ser absorvida ou espalhada. Normalmente, ela é expressa como a razão entre a intensidade da luz transmitida (I) e a intensidade da luz incidente (I_0) (Figura 1) (Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, 2025):

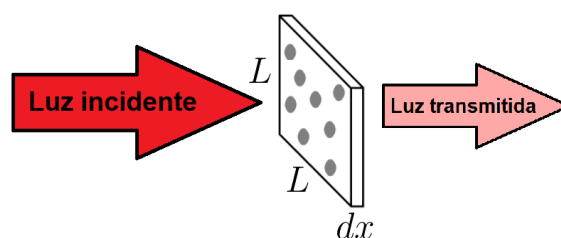
$$T = I / I_0 \quad (1)$$

A quantidade de luz absorvida por uma substância depende de sua estrutura molecular, o que faz com que diferentes compostos absorvam luz em diferentes comprimentos de onda é uma medida logarítmica da luz absorvida pela amostra. Ela é calculada como o logaritmo decimal negativo da transmitância (Equação 2):

$$A = -\log_{10}(T) \quad (2)$$

Como a estrutura molecular determina quais comprimentos de onda são mais fortemente absorvidos, a absorbância exibe máximos característicos. Na prática analítica, escolhe-se o comprimento de onda de interesse (tipicamente o pico de absorção da espécie) e, com leituras repetidas de absorbância, prossegue-se para a construção da curva de calibração (Jarujareet et al., 2023).

Figura 1 - Representação da luz transmitida e da luz incidente ao incidir um analito



Fonte: Pereira, 2019

2.1.2 Curva de calibração

A curva de calibração é uma ferramenta essencial na espectrofotometria de absorção, utilizada para relacionar a absorbância com a concentração de uma substância em solução. Para construí-la, realiza-se uma série de medições de absorbância em soluções padrão, cujas concentrações da substância de interesse são previamente conhecidas (Chapecali, s.d).

Figura 2 - Tabela exemplificando medições de absorbância de uma substância, cujas concentrações são conhecidas.

mg (%)	A
-	-
0,50	0,0150
0,75	0,0210
1,00	0,0300
1,50	0,0390
2,00	0,0600
3,00	0,0910
4,50	0,1500

Fonte: Couto, 2016

A partir dessas medições, obtêm-se pares de dados (concentração $\times$ absorbância), que são representados graficamente, com a concentração no eixo x e a absorbância no eixo y. Normalmente essa relação é linear, permitindo o ajuste de uma reta por regressão linear, expressa pela equação da reta (Equação 3). Essa relação empírica, quando acompanhada de métricas de ajuste, permite estimar concentrações desconhecidas a partir da absorbância medida, conexão que se fundamenta teoricamente na Lei de Beer–Lambert (Chapecali, s.d):

$$y = a * (x) + b \quad (3)$$

Figura 3 - Plotagem do gráfico de absorbância x concentração utilizando dados da figura 2.



Fonte: Couto, 2016

2.1.3 Lei de Lambert-Beer

A lei de Lambert-Beer ou lei de Lambert-Beer-Bouguer, afirma que a absorbância de uma substância e a sua concentração em uma solução possuem relação, quando um feixe de luz monocromático a atravessa (Lima, 2013). Esta lei é resultado de dois princípios: a lei de Lambert e a lei de Beer.

Lambert observou que, no momento em que um feixe de luz monocromática atravessa um meio transparente homogêneo, cada camada deste meio absorvia igualmente a mesma quantidade de luz que atravessava. Assim, a lei de Lambert estabelece que quanto maior o caminho óptico da luz na amostra maior será a absorção, isto é, a intensidade da luz transmitida por um meio transparente homogêneo diminui exponencialmente à medida que a espessura do meio absorvente aumenta (Mendes). Após 92 anos, o alemão August Beer, estabeleceu que a quantidade de luz absorvida é proporcional à concentração da substância absorvente presente na solução (Lima, 2013).

A combinação dessas duas leis resulta na Lei de Beer-Lambert (Equação 4):

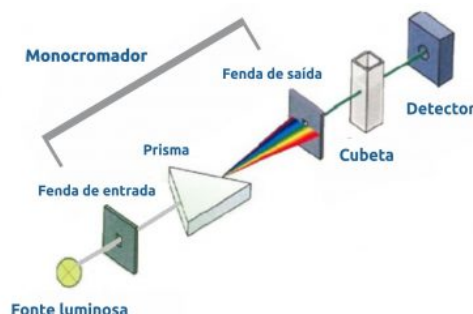
$$A = \varepsilon * l * c \quad (4)$$

onde A é a absorbância, l é o comprimento previamente conhecido do caminho da luz através da amostra, ε é o coeficiente de absorção molar e c é a concentração molar da solução. A absorbância varia proporcionalmente com a concentração. Essa proporcionalidade explica a linearidade observada na curva de calibração no intervalo adequado e também justifica a prática de trabalhar no pico do espectro da espécie (Jarujareet et al., 2023).

2.2 Componentes Ópticos de um Espectrofotômetro

O espectrofotômetro em sua base é composto por uma fonte de radiação, sistema de colimação e dispersão (monocromador), um compartimento da amostra e um detector óptico (Figura 5) (Bogucki et al., 2019).

Figura 4 - Componentes típicos de um espectrofotômetro.



Fonte: Sinergia Científica, 2021

A fonte de luz produz um espectro amplo que, por meio do monocromador, tem um comprimento de onda específico selecionado e direcionado para a amostra. Ao atravessar a amostra, a luz interage com suas propriedades químicas, fazendo com que certos comprimentos de onda sejam parcialmente ou totalmente absorvidos. Em seguida, o detector mede a intensidade da luz antes e depois de sua passagem pela amostra, permitindo avaliar a quantidade de luz absorvida e, conseqüentemente, obter informações sobre a composição da substância analisada. Geralmente, usa-se um prisma ou uma rede de difração para dispersar a luz em seus componentes espectrais, e apenas uma pequena faixa do espectro é permitida passar para a amostra. Um computador ou dispositivo analógico interpreta os dados, comparando a intensidade da luz que passa pela amostra com a intensidade da luz antes de entrar na amostra. A diferença entre essas intensidades indica quanto de cada comprimento de onda foi dado pela amostra (SP Labor, 2025).

2.3. Uso de Smartphones como Detectores Ópticos

O uso de smartphones como detectores ópticos tem se mostrado uma alternativa viável aos sistemas espectrofotometria, especialmente em contextos de baixo custo. Graças aos avanços na qualidade das câmeras digitais contidas nestes dispositivos, é possível captar com precisão variações na intensidade luminosa transmitida ou refletida por diferentes amostras, viabilizando análises quantitativas com boa reprodutibilidade (JARUJAREET et al., 2023).

Diversos estudos apontam que a câmera do smartphone, operando com parâmetros fixos como ISO e tempo de exposição, pode registrar imagens padronizadas das amostras,

sendo essas imagens utilizadas para estimativas de transmitância e cálculo de absorbância por meio de modelos baseados na Lei de Beer-Lambert (Bogucki et al., 2019).

Entre as principais vantagens do uso de smartphones, destaca-se a ampla disponibilidade dos dispositivos, sua portabilidade e a possibilidade de registro e compartilhamento digital imediato dos dados coletados. No entanto, limitações também são reconhecidas, como a dependência da qualidade do sensor da câmera, a restrição à faixa do espectro visível e a menor estabilidade de medições em comparação a espectrofotômetros dedicados (Long; Yu; Cunningham, 2014).

Ainda assim, a adoção dessa tecnologia tem sido amplamente defendida como ferramenta pedagógica eficiente, sobretudo em contextos de ensino de Química Analítica, por permitir a realização de experimentos ilustrativos com recursos limitados, mantendo os princípios fundamentais da espectrofotometria intactos (Grasse et al., 2016).

2.4. Tecnologias de Prototipagem

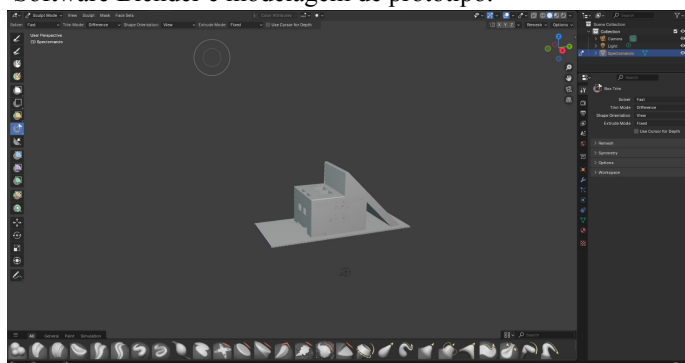
A manufatura aditiva é o conjunto de processos que constroem peças a partir de um modelo 3D, normatizados pela ABNT NBR ISO/ASTM 52900, que consolida terminologia e fundamentos do processo de construção por deposição de camadas (Norma Brasileira, 2025). Esse enquadramento normativo serve de base conceitual para projetar e fabricar gabinetes ópticos sob medida. Em projetos de instrumentação didática ou prototipagem, a capacidade de iterar geometrias com custo baixo é a principal utilidade prática.

O PLA é polímero biodegradável amplamente adotado em FDM por sua estabilidade dimensional, baixa contração e facilidade de impressão. Estudos reportam Temperatura de transição vítrea próxima de 55 °C e temperatura de fusão próxima 180 °C, faixa típica que orienta o uso do protótipo longe de fontes de calor, além de boa rigidez e menor tenacidade, útil para manter colimação e geometria em gabinetes ópticos, desde que o ambiente não exceda limites térmicos (Arandanet, 2021). Na prática, isso sustenta um gabinete rígido e estável para o caminho óptico com custo baixo, e permite iterar geometrias até minimizar luz e alinhar a cubeta a 1 cm.

2.4.1. Modelagem no Blender

O Blender é um software adotado para modelagem 3D paramétrica por malha e revisões rápidas do layout 9 (Figura 6). A documentação oficial descreve ferramentas de modelagem e análise de malha que viabilizam ajustes finos antes da exportação para fatiamento (Blender, 2025).

Figura 5 - Software Blender e modelagem de protótipo.



Fonte: Os autores

2.5. Tecnologia de desenvolvimento de aplicações

2.5.1. Plataforma Mobile

O React Native, é uma biblioteca da linguagem JavaScript, desenvolvido pela empresa Meta, que permite compartilhar a lógica de UI e de negócio entre Android e iOS, mantendo acesso a APIs nativas via Native Modules. Isso viabiliza um app multiplataforma com componentes de captura e pré-processamento uniformes (ROI, cálculo rápido no dispositivo) e bindings específicos apenas onde necessário (React Native, 2025). No ecossistema Expo, os plugins permitem injetar configurações nativas e permissões durante o prebuild, sem manter forks de projetos nativos. Isso reduz atrito na automação de builds e garante repetibilidade do ambiente de captura (Expo, 2025).

A ROI (região de interesse) da fenda é extraída com operações básicas de imagem recorte por soma por coluna, amplamente suportadas pelo OpenCV, biblioteca da linguagem Python para processamento de imagem. A ROI permite transformar o frame em vetor espectral eficiente, reduzindo latência (OpenCv, 2025).

2.5.2. API de processamento

O ecossistema ASGI em Python, define uma interface padrão entre servidores e aplicações web assíncronas, permitindo concorrência eficiente e interoperabilidade entre frameworks e servidores. Nessa base, FastAPI, é um framework ASGI moderno, com tipagem estática e geração automática de documentação interativa, recursos que favorecem contratos claros, auditabilidade e manutenção ao longo do ciclo de vida do software (FastAPI, 2025).

Do ponto de vista de modelagem e validação de dados, a biblioteca Python, Pydantic, combina anotações de tipo de Python, serialização explícitos e mensagens de erro estruturadas, reduzindo ambiguidade semântica entre cliente e servidor e elevando a confiabilidade da interface (PYDANTIC, 2025).

Já base numérica, as bibliotecas NumPy e SciPy, oferecem arrays eficientes, vetorização, operações de álgebra linear e algoritmos fundamentais (otimização, interpolação, estatística) (Numpy, 2025; SciPy, 2025). Na área processamento de imagem, OpenCV-Python, que disponibiliza os módulos de visão computacional sem dependências de GUI; essa característica é pertinente a ambientes de execução não interativos (contêineres/servidores) e evita acoplamentos desnecessários a sistemas de janelas (OpenCv, 2025).

Figura 6 - Bibliotecas da linguagem Python.



Fonte: Os autores

2.6. Projetos semelhantes

Projetos de espectroscopia e espectrofotometria de baixo custo têm evoluído em duas frentes principais: arranjos que utilizam a câmera de smartphones com elementos dispersivos simples (rede/prisma) e gabinetes impressos em 3D, e soluções que integram micro-espectrômetros dedicados em invólucros compactos. A primeira linha se consolidou em contextos educacionais e de baixo custo; a segunda, baseada em módulos como o Hamamatsu C12880MA (Figura 8), oferece maior robustez espectral em formato reduzido (340–850 nm; resolução típica ~12–15 nm)

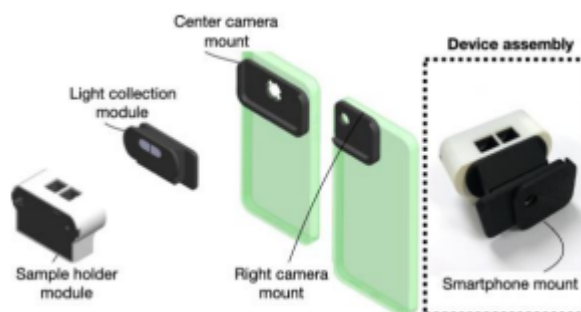
Figura 7 - Mini-spectrometer C12880MA



Fonte: Hamamatsu, 2025.

No eixo “smartphone-câmera”, destacam-se dispositivos que demonstram medições quantitativas no visível com geometrias 3D-impressas e óptica simplificada. Exemplos incluem o dual-beam smartphone visible spectrometer (Figura 9) (Jarujareet et al., 2023) e o periscopic smartphone spectrophotometer (Bruininks & Juurlink, 2022), ambos projetados para acessibilidade, reprodutibilidade didática e documentação técnica clara.

Figura 8 - Espectrofotômetro: dual-beam smartphone visible spectrometer



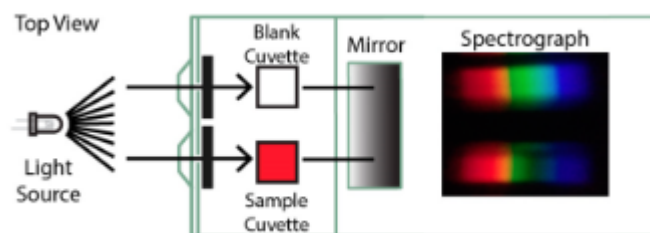
Fonte: (Jarujareet et al., 2023)

Paralelamente, soluções com micro-espectrômetros integrados têm ampliado a portabilidade sem abandonar desempenho suficiente para aplicações de campo: o projeto OSMS descreve um espectrofotômetro aberto, portátil e sem fio, enquanto a própria folha de dados do C12880MA documenta a faixa espectral e a resolução que sustentam essa classe de instrumentos compactos (Laganovska et.al, 2020).

3. METODOLOGIA E MATERIAIS

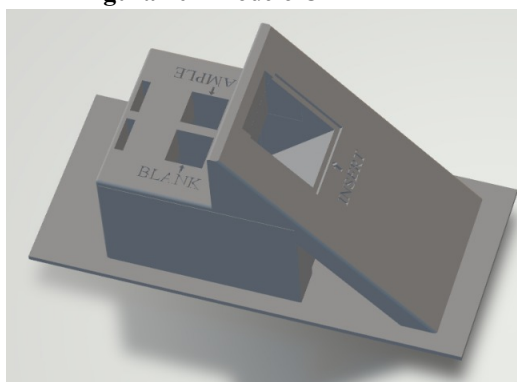
A metodologia adotada consistiu no desenvolvimento integrado de um protótipo físico de espectrofotômetro de absorção no visível e de uma plataforma de software composta por um aplicativo móvel e um serviço de processamento. O protótipo foi modelado no software Blender e fabricado por impressão tridimensional com material poliácido lático na cor preta, combinando baixo custo, rigidez e opacidade à luz ambiente (Figura 11). Para reduzir reflexões internas, as superfícies internas receberam acabamento preto fosco e foram incluídos elementos internos que interrompem trajetórias indesejadas de luz. O arranjo óptico utiliza feixe duplo com duas cubetas de vidro de um centímetro (uma para amostra e outra para referência) dispostas paralelamente, com um espelho adesivo para condução do feixe e uma rede de difração com mil linhas por milímetro para dispersar a luz antes da formação do espectro no sensor do telefone. A fonte emissora é um diodo emissor de luz branca com emissão aproximada entre quatrocentos e setecentos nanômetros (Figura 10).

Figura 9 - Esquema do caminho óptico (LED, cubetas, espelho, rede de difração)



Fonte: Bogucki , 2019.

Figura 10 - Modelo CAD

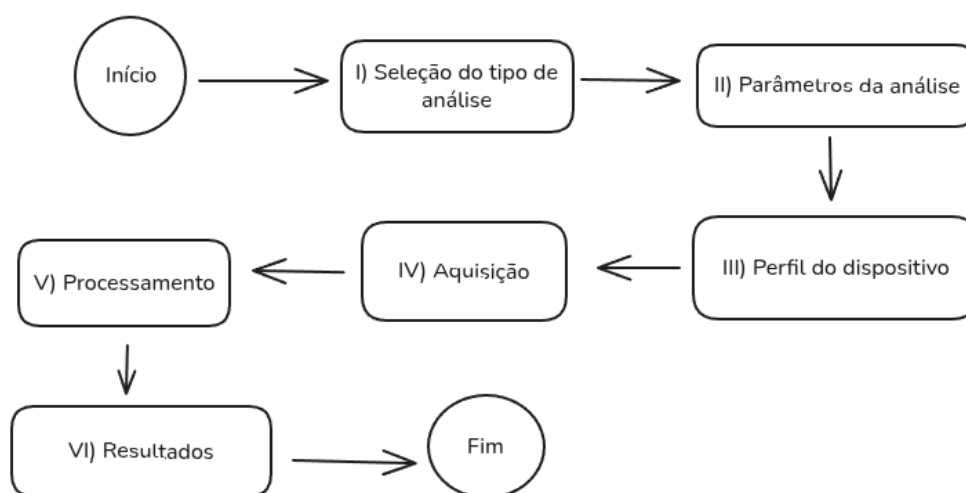


Fonte: Os autores.

A plataforma de software foi concebida em duas camadas. No aplicativo móvel, desenvolvido em React Native para atender Android e iOS, estruturou-se um fluxo com telas sequenciais que conduzem o usuário desde a escolha do modo de operação até a exportação de resultados (Figura 12). O fluxo nominal é: seleção do modo (análise quantitativa, varredura espectral, além do módulo pedagógico iFOTOM Aprender); parametrização (identificação da

análise, substância e meio, comprimento de onda de interesse quando aplicável, número de repetições, tempo de exposição, sensibilidade da câmera e balanço de branco); verificação do perfil do dispositivo e, se necessário, calibração de comprimento de onda; captura guiada com travamento de tempo de exposição, sensibilidade e balanço de branco; processamento com os perfis obtidos; e visualização de resultados, com indicadores de qualidade e opções de exportação em formatos abertos (CSV, JSON e PDF). Como o arranjo é de feixe duplo simultâneo, a imagem contém duas faixas espectrais, uma da amostra e outra da referência. O aplicativo demarca duas regiões de interesse (ROI) paralelas e, para cada quadro adquirido, integra a intensidade ao longo das linhas em cada ROI, produzindo um perfil de intensidade para amostra e um perfil para referência em função da posição de pixel. Para reduzir ruído, são adquiridos vários quadros por etapa e calculada uma média ou mediana após detecção de leituras atípicas. O aplicativo registra metadados de captura (sensibilidade da câmera, tempo de exposição e balanço de branco), verifica saturação e nível médio dentro da escala total do sensor e, quando o processamento remoto está habilitado, transmite apenas vetores numéricos e metadados ao serviço.

Figura 11 - Fluxo de telas do aplicativo



Fonte: Os autores.

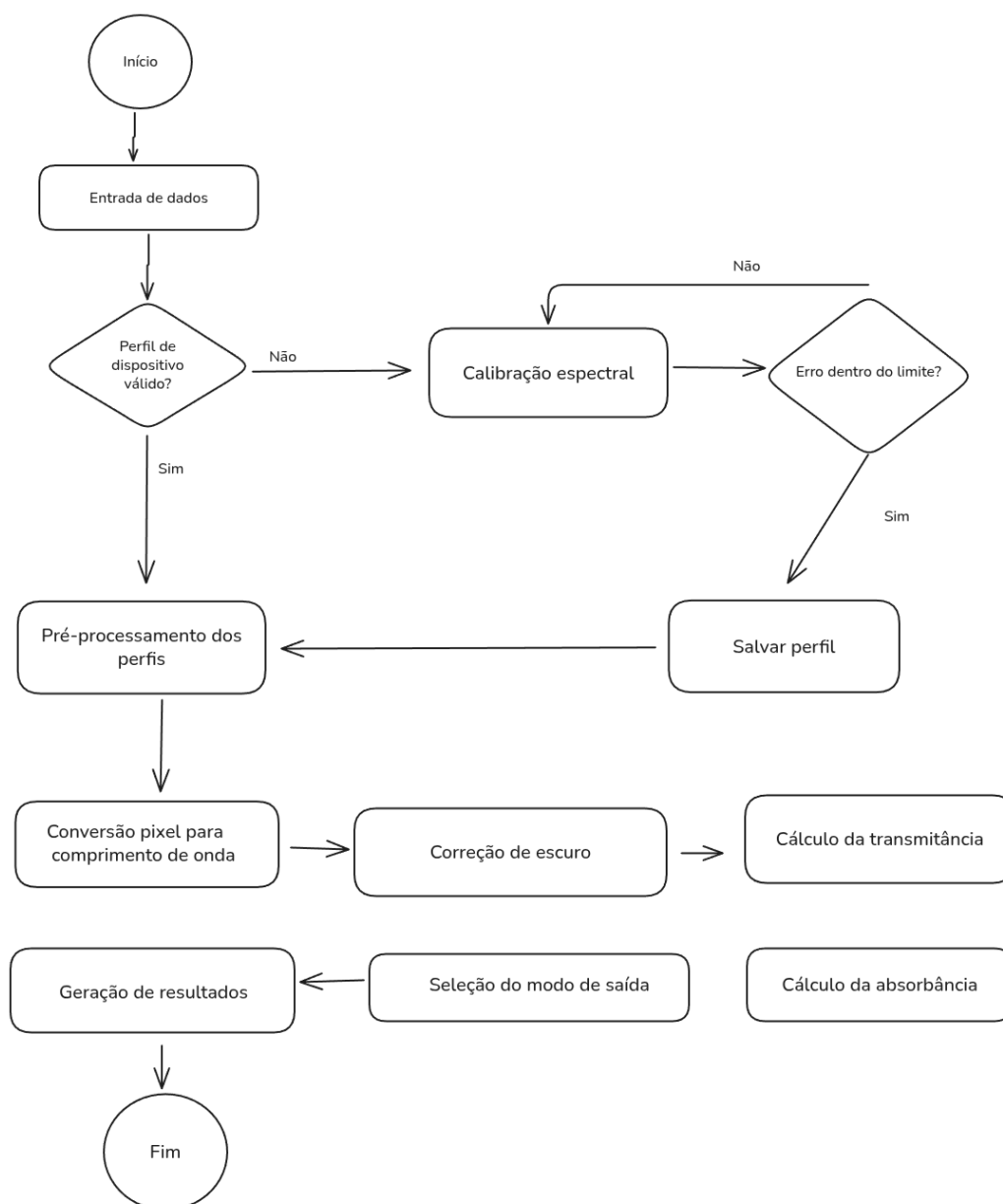
O serviço de processamento foi implementado em linguagem Python com o framework FastAPI e bibliotecas científicas para operações de imagem e cálculo. A partir das duas regiões de interesse definidas pelo aplicativo, obtêm-se os perfis de intensidade de amostra e de referência em função do pixel. A calibração espectral estabelece a correspondência entre a posição do pixel e o comprimento de onda em nanômetros com base

em fontes de referência com picos conhecidos, como um laser verde de quinhentos e trinta e dois nanômetros e um laser vermelho de seiscentos e cinquenta nanômetros. O algoritmo localiza o centro de cada pico com precisão subpixel e ajusta uma função polinomial de segunda ordem (Equação 5) que converte posição de pixel em comprimento de onda; os três coeficientes do polinômio, a região de interesse e os metadados formam o perfil do dispositivo reutilizado em análises subsequentes, e é calculado um erro médio em nanômetros para avaliar a qualidade do ajuste. Com a função de calibração definida, os perfis em pixel são convertidos para perfis em nanômetros. A transmitância é definida como a razão entre a intensidade medida com a amostra e a intensidade medida com a referência, ambas corrigidas pela medição de escuro; a absorbância é calculada como o logaritmo decimal negativo dessa transmitância (Equação 2). Em análises quantitativas, utiliza-se uma janela estreita ao redor do comprimento de onda de interesse, usualmente o comprimento de onda de absorção máxima da substância, calculando-se a absorbância média por repetição e para o conjunto final.

$$\lambda(p) = a_0 + a_1p + a_2p^2 + \dots + a_np^n \quad (5)$$

Para usabilidade e reprodutibilidade, a interface explicita os modos de análise e alinha as saídas às tarefas dos usuários. No modo quantitativo, o sistema apresenta absorbância média, desvio, coeficiente de variação e, quando uma curva de calibração já está cadastrada ou foi construída previamente, a concentração estimada com intervalo de confiança, além de sinalizações de extrapolação, saturação e divergência entre medidas de referência. No modo varredura, são apresentados os espectros de intensidade e de absorbância em função do comprimento de onda, com identificação automática de picos e do comprimento de onda de absorção máxima.

Figura 12 - fluxograma do processamento



Fonte: Os autores.

O módulo pedagógico iFOTOM Aprender, integrado ao aplicativo, oferece roteiros e simuladores que permitem variar virtualmente parâmetros conceituais, como concentração, caminho óptico e parâmetros de captura, e observar, em tempo real, os efeitos sobre a intensidade e sobre a absorbância. As atividades foram desenhadas para acompanhar o fluxo real de uso: antes da aquisição, o usuário encontra orientações sobre travas de exposição e balanço de branco; após a coleta, visualiza como leituras atípicas e saturação podem distorcer médias e conclusões. Assim, a mesma plataforma que realiza as medições também atua como ferramenta didática.

Por fim, elaborou-se uma estimativa de custos de componentes e insumos com base em preços de varejo nacional, consolidada na Tabela 1 (lista de materiais do protótipo). O valor total estimado de trezentos e cinquenta e oito reais e oitenta centavos demonstra a viabilidade econômica frente a equipamentos comerciais de entrada, cujos preços, segundo cotações recentes, partem de aproximadamente quatro mil reais. A planilha de custos foi estruturada para atualização periódica conforme disponibilidade e variação de preços.

Tabela 1 - Estimativa de custos dos componentes do Protótipo.

Componente	Especificação	Custo (R\$)
Suporte para Bateria	Modelo 18650	R\$9,31
Diodo LED Branco	5mm, Alto Brilho (28.000 MCD)	R\$0,52
Filamento para Impressão 3D	PLA Preto High Speed Premium - 1Kg	R\$108,21
Resistor de Carbono	1/4W - 56 Ohms	R\$0,07
Fita Crepe Adesiva	Larga Preta, 2 Rolos 48mm x 50m	R\$45,00
Cola Epóxi	40g	R\$25,89
Caneta Laser Verde		R\$44,90
Rede de Difração	1000 fendas/mm	R\$34,90
Caneta Laser Pointer Vermelha		R\$90,00
Custo Total Estimado		R\$ 358,80

4. RESULTADOS DO PROJETO

Os resultados obtidos até o momento concentram-se na consolidação do projeto técnico-pedagógico e na materialização dos principais artefatos de software e hardware. No eixo do hardware, foi concluído o modelo tridimensional do instrumentário no software de modelagem, abrangendo o gabinete, os alojamentos dos elementos ópticos e o acoplamento ao dispositivo móvel (Figura 14). A partir desse modelo, foram realizadas análises sistemáticas de melhoria, contemplando reforços estruturais, ajustes de tolerância para encaixes, soluções para blindagem de luz indesejada no interior do corpo do equipamento e refinamentos no posicionamento relativo da fonte, das cubetas e do elemento dispersor. Esse trabalho resultou em um conjunto de revisões de projeto que orientam a próxima rodada de fabricação.

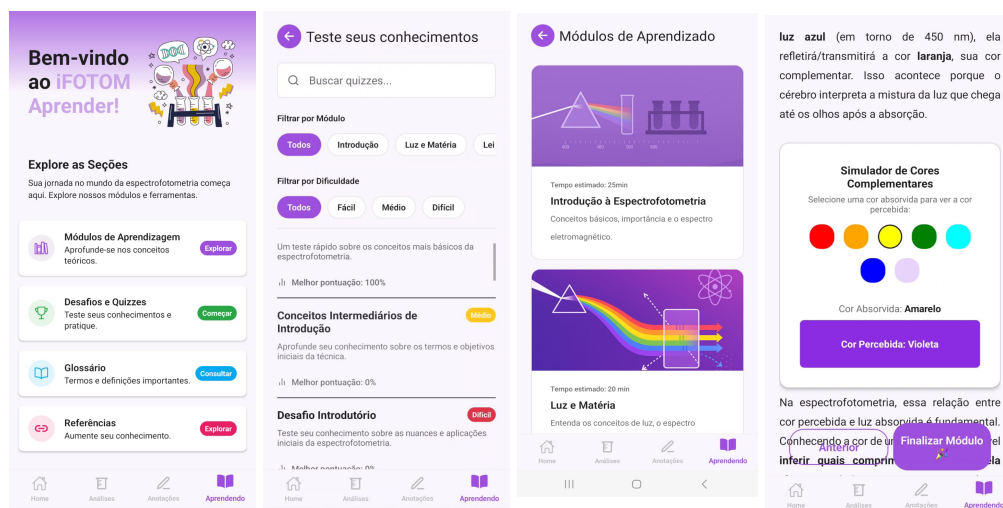
Figura 13- (A) Componentes individuais antes da montagem final. (B) Estrutura principal montada, evidenciando o compartimento para as cubetas e o caminho óptico. (C) Detalhe do encaixe do smartphone para a captura de imagem do espectro.



Fonte: Os autores.

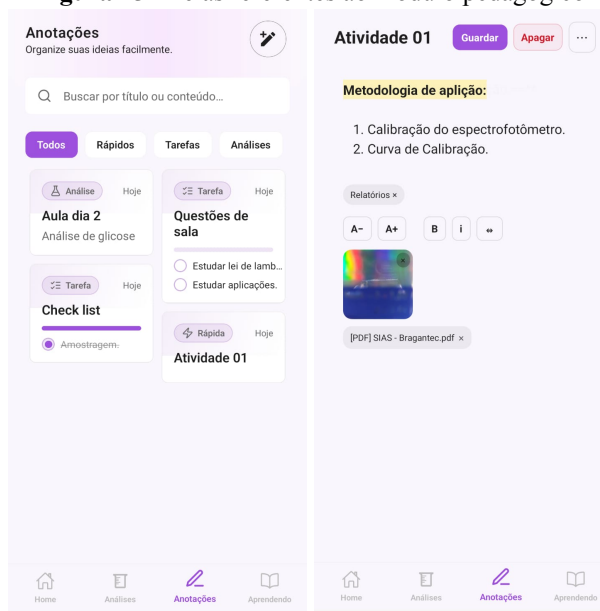
No eixo do software educacional, foi concluído o módulo pedagógico integrado ao aplicativo, com roteiros de aprendizagem e simuladores voltados à compreensão dos conceitos envolvidos na espectrofotometria de absorção (Figura 15). Em paralelo, foi desenvolvido o bloco de notas (Figura 16), recurso que permite registrar observações e organizar o estudo diretamente no aplicativo, preservando a coerência entre a exploração didática e a futura prática experimental.

Figura 14 - Menu principal do módulo "iFOTOM Aprender", com seções de aprendizagem, soluções e desafios. (B) Módulo de teste de conhecimento. (C) Tela dos módulos teóricos. (D) Simulador interativo de cores complementares.



Fonte: Os autores

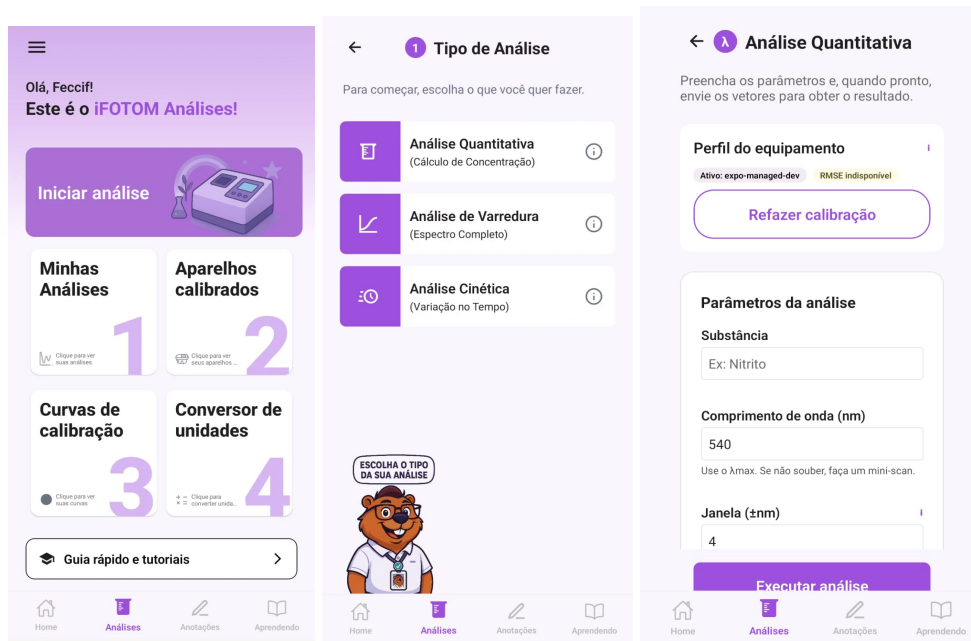
Figura 15 - Telas referentes ao módulo pedagógico



Fonte: Os autores

No eixo do software de aquisição e análise, encontram-se desenvolvidas as telas do aplicativo destinadas à captação das medições, incluindo seleção de modo, parametrização, verificação de perfil do dispositivo (Figura 17). Esse conjunto está organizado por um fluxo de telas explícito, garantindo clareza operacional e reprodutibilidade de uso.

Figura 16 - Telas referentes ao sistema de bloco de notas



Fonte: Os autores

Por fim, foi especificado e documentado o fluxo metodológico de ponta a ponta, tanto na camada do aplicativo quanto na camada de serviço de processamento. Estão definidos os contratos de dados, os pontos de integração entre aplicativo e serviço, os estados e transições relevantes, bem como as validações e saídas esperadas em cada etapa. Com isso, o projeto dispõe de uma base consistente para integração e avaliação conjunta do sistema.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do espectrofotômetro de baixo custo avançou de forma consistente e alinhada aos objetivos do projeto. Foram concluídos o modelo tridimensional do instrumento, as análises de melhoria de projeto mecânico e óptico, o módulo pedagógico integrado ao aplicativo, com roteiros, simuladores e o bloco de notas, e o desenho completo dos fluxos de telas tanto do aplicativo quanto da interface de programação de aplicações. A camada de serviço para processamento numérico está especificada e integrada conceitualmente ao aplicativo. Em termos de viabilidade, a estimativa de custo do protótipo, de trezentos e cinquenta e oito reais e oitenta centavos, permanece muito inferior ao valor de referência de equipamentos comerciais de entrada, usualmente na faixa de milhares de reais. É importante registrar explicitamente que o dispositivo ainda não foi testado em condição integrada; essa etapa é deliberadamente planejada como parte do cronograma de validação.

Como próximos passos imediatos, a prioridade será a integração final entre o protótipo físico, o aplicativo móvel e o serviço de processamento, com estabilização do fluxo de aquisição e do registro de metadados. Após a integração, será conduzida uma validação experimental sob condições controladas, com critérios objetivos de aceitação: erro médio da calibração de comprimento de onda em nanômetros dentro da meta educacional estabelecida, repetibilidade avaliada por coeficiente de variação em séries de leituras, verificação de linearidade e ausência de tendência em resíduos na faixa útil de absorbância, e checagens de robustez frente a variações operacionais comuns de sala de aula.

A estratégia de verificação experimental será realizada em três etapas sequenciais. Na primeira etapa, será validado o comportamento previsto pela Lei de Beer-Lambert utilizando permanganato de potássio. Para isso, será preparada uma solução estoque de dez milimolar e, a partir dela, serão confeccionadas diluições de cinco, dois vírgula cinco e um vírgula vinte e cinco milimolar. Será identificada, por varredura espectral, a região de máxima absorbância e, em seguida, construída a curva de calibração relacionando absorbância e concentração, com análise de linearidade e de dispersão dos pontos. Na segunda etapa, será aplicada uma metodologia colorimétrica para quantificação de nitrato a partir de nitrato de amônio, utilizando um kit comercial amplamente empregado em ensino. Serão preparados padrões de dez, vinte, trinta e quarenta partes por milhão a partir de uma solução estoque de cem partes por milhão, e as leituras serão realizadas em quinhentos e quarenta e cinco nanômetros, construindo-se a curva de calibração correspondente. Na terceira etapa, serão otimizadas as condições da reação de desenvolvimento de cor para o nitrato, com duas frentes: determinação do tempo ótimo de leitura por meio do acompanhamento da absorbância ao longo do tempo após a adição dos reagentes; e avaliação do efeito do meio tampão de fosfato, variando o pH entre aproximadamente seis vírgula cinco e oito vírgula zero para identificar a condição que maximiza a resposta analítica.

Concluídas a integração e as três etapas de verificação, o sistema estará apto a apresentar resultados comparáveis em ambiente didático, sustentando o duplo propósito do projeto: democratizar o acesso à experimentação em espectrofotometria com um dispositivo de baixíssimo custo e reduzir o efeito de “caixa-preta” típico de instrumentos comerciais, por meio de uma plataforma que une medição, transparência operacional e suporte pedagógico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANDANET. Poli(ácido láctico) (PLA). [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/3145-Poli%28acido-lactico%29-%28PLA%29.html>. Acesso em: 28 set. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR ISO/ASTM 52900: Manufatura aditiva — princípios gerais, fundamentos e vocabulário. [S. l.]: ABNT, [s. d.]. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/12354/abnt-nbriso-astm52900-manufatura-aditiva-principios-gerais-fundamentos-e-vocabulario>. Acesso em: 28 set. 2025.

BLENDER FOUNDATION. Blender 4.5 LTS Manual. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://docs.blender.org/manual/en/latest/index.html>. Acesso em: 28 set. 2025.

BOGUCKI, Ryan; GREGGILA, Mary; MALLORY, Paul; FENG, Jiansheng; SIMAN, Kelly; KHAKIPOOR, Banafsheh; KING, Hunter; SMITH, Adam. A 3D-printable dual beam spectrophotometer with multiplatform smartphone application. *Journal of Chemical Education*, [s.l.], v. 96, n. 7, p. 1527-1531, 2019. DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b00870. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.8b00870>. Acesso em: 08 abril 2025.

BRUININKS, Bram; JUURLINK, Ludo B. F. An Inexpensive 3D Printed Periscope-Type Smartphone-Based Spectrophotometer for Emission, Absorption, and Fluorescence Spectrometry. *Journal of Chemical Education*, [s. l.], v. 99, n. 5, p. 2168–2174, 2022. DOI: 10.1021/acs.jchemed.2c00060. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.2c00060>. Acesso em: 28 set. 2025.

CHAPECALI. O que é curva de calibração. Chapecó, 2020. Disponível em: <https://chapecali.com.br/glossario/o-que-e-curva-de-calibracao/>. Acesso em: 19 abr. 2025.

COUTO, C. M. Desenvolvimento de uma metodologia espectrofotométrica para determinação de chumbo em sangue. Ufba.br, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/9994>. Acesso em: 19 abr. 2025.

EXPO. Introduction to config plugins. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://docs.expo.dev/config-plugins/introduction/>. Acesso em: 28 set. 2025.

Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - Câmpus de Dracena. Disponível em: <https://www.dracena.unesp.br/Home/Graduacao/espectrofotometria.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2025.

FASTAPI. Tutorial – Guia de Usuário. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://fastapi.tiangolo.com/pt/tutorial/>. Acesso em: 28 set. 2025.

FENG, Jiansheng; KHAKIPOOR, Banafsheh; MAY, Jacob; MULFORD, Melissa; DAVIS, Joshua; SIMAN, Kelly; RUSSELL, Gabrielle; SMITH, Adam; KING, Hunter. An open-source dual-beam spectrophotometer for citizen-science-based water quality monitoring. *HardwareX*, [s.l.], v.10, p. e00241, 2021. DOI: [10.1016/j.ohx.2021.e00241](https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00241). Disponível em: [https://www.hardware-x.com/article/S2468-0672\(21\)00071-7/fulltext](https://www.hardware-x.com/article/S2468-0672(21)00071-7/fulltext). Acesso em: 03 maio 2025

GRASSE, Elise; TORCASIO, Morgan.; SMITH, A. Teaching UV–Vis Spectroscopy with a 3D-Printable Smartphone Spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, [s.l], v. 93, n. 1, p. 146–151, 2015. DOI: [10.1021/acs.jchemed.5b00654](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00654). Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.5b00654>. Acesso em: 14 abril 2025

HAMAMATSU PHOTONICS K.K. Mini-spectrometer micro series C12880MA. [S. l.], [s. d.]. Acesso em: 28 set. 2025. Disponível em: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/spectrometers/mini-spectrometer/C12880MA.html>

JARUJAREET, Ungkarn; PICHAYAWAYTIN, Grit; SRIPETCH, Pongsakun; NARUSORN Doljirapisit; SUMRIDDETCHKAJORN, Sarun; PREMPREE, Panintorn; CHAITAVON, Kosom; PUNPETCH, Pongpun; AMARIT, Ratthasart. A Low-Cost Dual-Beam Smartphone Visible Spectrometer. *Journal of Chemical Education*, [s.l], v.100, n.2, p. 546–553, 2023. DOI: [10.1021/acs.jchemed.2c00642](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00642). Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.2c00642>. Acesso em: 06 abril 2025

LAGANOVSKA, Katrina; ZOLOTARJOVS, Aleksejs; VÁZQUEZ, Mercedes; Mc DONNELL, Kirsty; LIEPINS, Janis; BEN-YOAV, Hadar; KARITANS, Varis; SMITS, Krisjanis. Portable low-cost open-source wireless spectrophotometer for fast and reliable measurements. *HardwareX*, [s. l.], v. 7, e00108, 2020. DOI: 10.1016/j.ohx.2020.e00108. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S246806722030016X>. Acesso em: 28 set. 2025.

LIMA, L. S. *Lei de Lambert–Beer*. *Revista Ciência Elementar*, v. 1, n. 1, p. 47, 2013. Disponível em: <http://doi.org/10.24927/rce2013.047>. Acesso em: 21 abr. 2025.

LONG, Kennhet; YU, Hojeong; CUNNINGHAM, Brian. Smartphone instrument for portable enzyme-linked immunosorbent assays. *Biomedical Optics Express*, [s.l], v. 5, n. 11, p. 3792–3806, 2014. DOI: [10.1364/BOE.5.003792](https://doi.org/10.1364/BOE.5.003792). Disponível em: <https://opg.optica.org/boe/fulltext.cfm?uri=boe-5-11-3792&id=301884>. Acesso em: 08 maio 2025

OPENCV. Basic operations on images. [S. l.], 2025. Disponível em: https://docs.opencv.org/4.x/d3/df2/tutorial_py_basic_ops.html. Acesso em: 28 set. 2025.

PEREIRA, Rodrigo Weber; TEIXEIRA, Cilaine Verônica; HEIDEMANN, Leonardo Albuquerque; VEIT, Eliane Angela. Episódios de modelagem sobre óptica: investigando a atenuação da luz nos oceanos. Porto Alegre: Instituto de Física, UFRGS, 2019. (Recursos Digitais para Apoio ao Professor de Física, n. 7). ISSN 2448-1572.

REACT NATIVE. Native Platform. [S. l.]: Meta Platforms, 2025. Disponível em: <https://reactnative.dev/docs/native-platform>. Acesso em: 28 set. 2025.

SINERGIA CIENTÍFICA. *Espectrofotômetro: para que serve? como funciona? quais são seus componentes?* 19 jan. 2021. Disponível em: <https://www.sinergiacycientifica.com.br/espectrofotometro-para-que-serve-como-funciona-quais-sao-seus-componentes/>. Acesso em: 28 set. 2025