

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELÉTRICA

Jakson da Rocha Almeida

**Desenvolvimento de um Analisador de Espectro Óptico de Baixo Custo para
Faixa Visível: Calibração Automatizada via Visão Computacional**

Juiz de Fora
2026

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Almeida, Jakson da Rocha.

Desenvolvimento de um Analisador de Espectro Óptico de Baixo Custo para Faixa Visível : Calibração Automatizada via Visão Computacional / Jakson da Rocha Almeida. – 2026.

63 f. : il.

Orientador: Alexandre Bessa dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia Elétrica. Engenharia Elétrica, 2026.

1. Analisador de espectro óptico.
 2. Calibração automatizada.
 3. Visão computacional.
 4. Espectro visível.
- I. Sobrenome, Nome do orientador, orient. II. Título.

Jakson da Rocha Almeida

**Desenvolvimento de um Analisador de Espectro Óptico de Baixo Custo para
Faixa Visível: Calibração Automatizada via Visão Computacional**

Trabalho de conclusão de curso apresentado á Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Alexandre Bessa dos Santos

Juiz de Fora

2026

Jakson da Rocha Almeida

**Desenvolvimento de um Analisador de Espectro Óptico de Baixo Custo para
Faixa Visível: Calibração Automatizada via Visão Computacional**

Trabalho de conclusão de curso apresentado á
Faculdade de Engenharia Elétrica da Universi-
dade Federal de Juiz de Fora como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Aprovada em 6 de fevereiro de 2026

BANCA EXAMINADORA

Professor Alexandre Bessa dos Santos - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Doutor Felipe Oliveira Barino - Banca
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor André Luiz Marques Marcato - Banca
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho à minha família, que me apoiou em todos os passos desta jornada, e a todos que contribuíram para minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmãos por todo o apoio durante esses anos de estudos longe de casa. Seu amor e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse trilhar este caminho.

Agradeço ao Professor André Luiz Marques Marcato por ter me introduzido à Iniciação Científica. Durante os quatro anos em que trabalhamos juntos, aprendi ROS, simulação de drones e visão computacional — áreas diretamente relacionadas à minha formação em Engenharia Elétrica com habilitação em Robótica e Automação Industrial.

Agradeço em especial ao Professor Alexandre Bessa dos Santos, orientador deste trabalho, com quem atuei nos últimos dois anos na área de instrumentação óptica. O presente trabalho dá continuidade a uma Iniciação Científica desenvolvida em seu laboratório.

Agradeço ao Felipe Oliveira Barino, que também integra o LITel e me apresentou ao projeto OSA Visível que deu origem a este TCC, compartilhando seu conhecimento e dedicando tempo para me acompanhar neste percurso.

Por fim, agradeço a tantos outros professores e colegas que, de diversas formas, contribuíram para a minha formação acadêmica. São muitas pessoas que merecem meu reconhecimento; opto por não nominar individualmente para não correr o risco de omitir alguém. A todos, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Analisador de Espectro Óptico (OSA) de baixo custo para a faixa visível (380–750 nm), combinando o espectrômetro OSA Visível (impresso em 3D) e a interface OSA Visível (software customizado). A calibração abrange duas dimensões metrológicas: (i) o eixo de comprimento de onda, por técnicas de visão computacional que mapeiam a relação pixel– λ com luz branca e lasers de referência (532 nm e 650 nm), incluindo cálculo de centróide, limiarização e regressão linear via OpenCV e Pillow; e (ii) o eixo de intensidade, mediante comparação com o espectrômetro ThorLabs (CCT11) e modelagem polinomial dos canais RGB para capturar o comportamento de saturação do sensor CMOS. A validação experimental demonstrou incertezas expandidas entre $\pm 0,13$ nm e $\pm 0,29$ nm (100 amostras temporais) e concordância com o espectrômetro ThorLabs, com diferenças inferiores a 3 nm para os picos verde e vermelho. O modelo de combinação de canais alcança $R^2 = 0,9999$ na predição da intensidade. Os experimentos incluem repetibilidade temporal, comparação em λ e caracterização de intensidade com fonte PWM. Ao reduzir custos de mais de 30 mil dólares (USD) (OSA comercial) para menos de 200 dólares (USD), esta solução democratiza a análise espectral para aplicações educacionais e de pesquisa.

Palavras-chave: analisador de espectro óptico; calibração automatizada; visão computacional; espectro visível; calibração de intensidade; espectrômetro ThorLabs.

ABSTRACT

This work presents the development of a low-cost Optical Spectrum Analyzer (OSA) for visible light spectra (380–750 nm), combining the OSA Visível spectrometer (3D-printed) and the OSA Visível interface (custom software). Calibration addresses two metrological dimensions: (i) the wavelength axis, through computer vision techniques that map the pixel– λ relationship using white light and reference lasers (532 nm and 650 nm), including centroid calculation, thresholding, and linear regression via OpenCV and Pillow; and (ii) the intensity axis, by comparison with a ThorLabs spectrometer (CCT11) and polynomial modeling of RGB channels to capture the CMOS sensor saturation behavior. Experimental validation yielded expanded uncertainties between ± 0.13 nm and ± 0.29 nm (100 temporal samples) and agreement with the ThorLabs spectrometer, with differences under 3 nm for the green and red peaks. The channel combination model reaches $R^2 = 0.9999$ for intensity prediction. The experiments encompass temporal repeatability, wavelength comparison, and intensity characterization with a PWM-controlled source. By reducing costs from over \$30,000 USD (commercial OSA) to under \$200 USD, this solution democratizes spectral analysis for educational and research applications.

Keywords: optical spectrum analyzer; automated calibration; computer vision; visible spectrum; intensity calibration; ThorLabs spectrometer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – O espectro eletromagnético, com a seção de luz visível expandida. . . . | 17 |
| Figura 2 – Comparação entre perfis Gaussiano (vermelho) e Lorentziano (azul) padronizados. O HWHM ($w/2$) é 1. | 25 |
| Figura 3 – Exemplo de saturação no espetrômetro ThorLabs CCT11 (software ThorSpectra): topo plano do pico spectral em LED verde com <i>Integration Time</i> elevado e potência 100% da fonte PWM. Intensidade em 2^{16} bits. | 26 |
| Figura 4 – Arquitetura do espetrômetro OSA Visível: (1) Luz incidente, (2) Fenda óptica, (3) Grade de difração, (4) Webcam CMOS. Adaptado de (21). . . | 29 |
| Figura 5 – Janela principal da interface OSA Visível: (1) Visualização do espectro em tempo real, (2) Gráfico de intensidade $I(\lambda)$ vs. comprimento de onda, (3) Painel de controle e calibração. | 31 |
| Figura 6 – Setup experimental para calibração por lasers: módulos LaserLine iZi (verde 532 nm e vermelho 650 nm) e respectivas fontes de alimentação. | 35 |
| Figura 7 – Módulos laser em 520 nm e 532 nm: opções de potência, tipo de feixe (ponto, linha, cruz) e encapsulamento. | 36 |
| Figura 8 – Módulos laser em 635 nm e 650 nm: opções de potência, tipo de feixe e encapsulamento. | 37 |
| Figura 9 – Reta de calibração $\lambda(x) = a \cdot x + b$ ajustada via regressão linear utilizando lasers de referência (532 nm e 650 nm). | 38 |
| Figura 10 – Janela de calibração da interface OSA Visível: (1) Botão "Calibrar Luz Branca" para calibração automática preliminar, (2) Botões "Iniciar Laser (Verde/Vermelho)" para calibração absoluta passo a passo. | 39 |
| Figura 11 – Espectro do OSA Visível (interface) para LED vermelho em diferentes níveis de PWM, <i>antes</i> da calibração de intensidade: 5% (formato esperado), 50% e 100% (espectro distorcido por saturação do canal R e reconstrução pelos demais canais). | 41 |
| Figura 12 – Setup do experimento de caracterização: (1) Fonte de luz com LEDs verde, vermelho e azul e controle PWM; (2) Espetrômetro OSA Visível; (3) Interface OSA Visível. | 42 |
| Figura 13 – Setup do experimento de caracterização: (1) Fonte de luz com LEDs verde, vermelho e azul e controle PWM; (2) Espetrômetro ThorLabs. | 43 |
| Figura 14 – Interface do <i>Peaks Viewer</i> : visualização do espectro, seleção de região para ajuste de curva Lorentziana e extração de λ e intensidade do pico. | 44 |
| Figura 15 – Interface da aplicação web de cadastro de dados: tabelas para duty cycle, λ de pico e intensidade por LED (verde, vermelho, azul), com suporte a OSA Visível (por canal) e espetrômetro ThorLabs. | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 16 – Setup experimental do Experimento 1: fonte de luz RGB conectada via fibra óptica ao espectrômetro ThorLabs CCT11 para caracterização de comprimento de onda. | 46 |
| Figura 17 – Evolução temporal dos comprimentos de onda dos 3 picos principais RGB (100 amostras, ~ 10 s entre aquisições) – OSA Visível. | 49 |
| Figura 18 – Distribuição dos comprimentos de onda dos 3 picos principais RGB (100 amostras) – OSA Visível. | 50 |
| Figura 19 – Evolução temporal dos comprimentos de onda dos 3 picos principais RGB (100 amostras) – espectrômetro ThorLabs CCT11. | 51 |
| Figura 20 – Distribuição dos comprimentos de onda dos 3 picos principais RGB (100 amostras) – espectrômetro ThorLabs CCT11. | 52 |
| Figura 21 – Resposta de intensidade do espectrômetro ThorLabs em função do duty cycle para os LEDs verde, vermelho e azul. Média de 5 tomadas com ajuste linear. | 53 |
| Figura 22 – Resposta do canal R do OSA Visível em função do duty cycle para os LEDs verde, vermelho e azul. Ajuste polinomial de grau 2 (média de 5 tomadas). . | 54 |
| Figura 23 – Resposta do canal G do OSA Visível em função do duty cycle para os LEDs verde, vermelho e azul. Ajuste polinomial de grau 2 (média de 5 tomadas). . | 54 |
| Figura 24 – Resposta do canal B do OSA Visível em função do duty cycle para os LEDs verde, vermelho e azul. Ajuste polinomial de grau 2 (média de 5 tomadas). . | 55 |
| Figura 25 – Comparação entre intensidade medida pelo ThorLabs e predita pelo modelo de combinação de canais (verde, vermelho, azul) em função do duty cycle. | 56 |
| Figura 26 – Conceito de interface <i>web</i> (SaaS) para o OSA Visível: landing page com armazenamento em nuvem, suporte a múltiplos dispositivos e análise em tempo real. | 59 |
| Figura 27 – Conceito de painel <i>web</i> : conexão ao host OSA, transmissão da webcam e gráfico de espectro em tempo real. | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Comparativo de Requisitos Metrológicos: OSA Comercial vs. OSA Visível | 20 |
| Tabela 2 – Parâmetros Chave da Calibração Linear do OSA Visível | 21 |
| Tabela 3 – Algoritmos de Visão Computacional Aplicados à Calibração | 24 |
| Tabela 4 – Componentes principais do espectrômetro OSA Visível e especificações técnicas | 28 |
| Tabela 5 – Parâmetros de calibração obtidos experimentalmente | 37 |
| Tabela 6 – Estatísticas dos 3 picos principais RGB identificados pelo OSA Visível (100 amostras temporais) | 48 |
| Tabela 7 – Estatísticas dos 3 picos principais RGB identificados pelo espectrômetro ThorLabs (100 amostras selecionadas) | 50 |
| Tabela 8 – Comparação direta: OSA Visível vs. espectrômetro ThorLabs (3 picos principais RGB) | 52 |
| Tabela 9 – Parâmetros do ajuste linear do espectrômetro ThorLabs: $y = a \cdot x + b$ (intensidade vs. duty cycle %) | 53 |
| Tabela 10 – Coeficientes dos polinômios $f_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$ do OSA Visível por fonte e canal | 55 |
| Tabela 11 – Coeficientes da combinação linear α_i por fonte | 56 |
| Tabela 12 – Métricas do modelo de combinação de canais por fonte | 56 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| ADC | Analog-to-Digital Converter (Conversor Analógico-Digital) |
| CMOS | Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (Semicondutor de Óxido Metálico Complementar) |
| COTS | Commercial Off-The-Shelf (Componentes Comerciais Prontos para Uso) |
| CRI | Color Rendering Index (Índice de Reprodução de Cor) |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplexing (Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Densa) |
| FBG | Fiber Bragg Grating (Rede de Bragg em Fibra) |
| FWHM | Full Width at Half Maximum (Largura Total à Meia Altura) |
| HCN | Cianeto de Hidrogênio (Hydrogen Cyanide) |
| IEC | International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional) |
| IR | Infravermelho (Infrared) |
| LED | Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz) |
| LITel | Laboratório de Instrumentação e Telemetria |
| LPG | Long-Period Grating (Rede de Longo Período) |
| MAE | Mean Absolute Error (Erro Absoluto Médio) |
| MVP | Minimum Viable Product (Produto Mínimo Viável) |
| OSA | Optical Spectrum Analyzer (Analizador de Espectro Óptico) |
| OSNR | Optical Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído Óptico) |
| POC | Point-of-Care (Ponto de Cuidado) |
| PWM | Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso) |
| RGB | Red, Green, Blue (Vermelho, Verde, Azul) |
| RMS | Root Mean Square (Raiz Quadrada da Média dos Quadrados) |
| RMSE | Root Mean Square Error (Erro Quadrático Médio) |
| ROI | Region of Interest (Região de Interesse) |
| SaaS | Software as a Service (Software como Serviço) |
| SNR | Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído) |
| UFJF | Universidade Federal de Juiz de Fora |
| USD | United States Dollar (Dólar Americano) |
| UV-Vis | Ultravioleta-Visível |
| VIS | Visível (faixa espectral) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| λ | Comprimento de onda |
| λ_0 | Posição central do pico espectral |
| $\lambda(x)$ | Relação comprimento de onda–pixel |
| T | Limiar ótimo de limiarização (método de Otsu) |
| I | Intensidade (pixel ou espectral) |
| I_0 | Intensidade máxima do pico (perfil Lorentziano) |
| $I(x, y)$ | Intensidade do pixel na posição (x,y) |
| $\bar{I}(x, y)$ | Intensidade média temporal |
| $M(x, y)$ | Máscara binária após limiarização |
| R^2 | Coeficiente de determinação |
| n | Ordem de difração |
| d | Espaçamento da grade de difração |
| θ | Ângulo de difração |
| α | Ângulo de incidência |
| a, b | Coeficientes da regressão linear $\lambda(x) = a \cdot x + b$ |
| m, c | Inclinação e intercepto da reta espectral ($y = m \cdot x + c$) |
| x_c, y_c | Coordenadas do centróide |
| x_{peak} | Posição do pico de intensidade |
| x | Posição horizontal (pixel) ou duty cycle (%) |
| N | Número de quadros na média temporal |
| H | Altura da imagem (pixels) |
| k | Nível de intensidade digital (0–255) |
| γ | Parâmetro de largura do perfil Lorentziano (FWHM = 2γ) |
| σ | Desvio padrão do perfil Gaussiano |
| a_i, b_i, c_i | Coeficientes do polinômio $f_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$ por canal |
| α_i | Coeficientes da combinação linear de canais (modelo intensidade) |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 17 |
| 2.1 | FUNDAMENTOS DA ESPECTROSCOPIA ÓPTICA | 17 |
| 2.2 | ANALISADORES DE ESPECTRO ÓPTICO: ARQUITETURAS E METROLOGIA | 18 |
| 2.3 | FUNDAMENTAÇÃO DO MAPEAMENTO COMPRIMENTO DE ONDA-PIXEL | 20 |
| 2.4 | APLICAÇÃO DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA CALIBRAÇÃO AUTOMATIZADA | 22 |
| 2.5 | MODELAGEM DE PERFIS ESPECTRAIS E DETECÇÃO DE PICOS | 23 |
| 2.6 | SATURAÇÃO EM SENSORES CMOS E MODELAGEM DA RESPOSTA DE INTENSIDADE | 24 |
| 2.7 | O PROCESSO HÍBRIDO DE CALIBRAÇÃO DO OSA VISÍVEL . . . | 25 |
| 3 | METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE E SOFTWARE | 27 |
| 3.1 | FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA E TRABALHOS CORRELATOS | 27 |
| 3.2 | CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÔMETRO OSA VISÍVEL | 27 |
| 3.3 | DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE OSA VISÍVEL | 30 |
| 3.4 | PROCESSO DE CALIBRAÇÃO AUTOMATIZADA | 32 |
| 3.5 | EXPERIMENTO DE CARACTERIZAÇÃO DE FONTE E RELAÇÃO OSA VISÍVEL–THORLABS | 39 |
| 3.6 | CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS E LIMITAÇÕES | 43 |
| 4 | RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALIDAÇÃO | 46 |
| 4.1 | DESCRIÇÃO DO SETUP EXPERIMENTAL | 46 |
| 4.2 | EXPERIMENTO 1: ANÁLISE DE REPETIBILIDADE TEMPORAL COM OSA VISÍVEL | 47 |
| 4.3 | EXPERIMENTO 2: VALIDAÇÃO CRUZADA COM OSA COMERCIAL (THORLABS) | 48 |
| 4.4 | EXPERIMENTO 3: CARACTERIZAÇÃO DE INTENSIDADE E MODELAGEM POR COMBINAÇÃO DE CANAIS | 52 |
| 5 | CONCLUSÃO | 57 |
| 5.1 | TRABALHOS FUTUROS | 58 |
| | REFERÊNCIAS | 61 |

1 INTRODUÇÃO

O Analisador de Espectro Óptico (OSA) é um instrumento metrológico cuja importância reside na sua capacidade de quantificar a distribuição de potência da radiação eletromagnética em função do comprimento de onda (λ). Tradicionalmente, o campo de estudo da espectrofotometria Ultravioleta-Visível (UV-Vis) abrange a região que vai de aproximadamente 190 nm a 900 nm (1). Dentro deste intervalo, a faixa visível (VIS) é estritamente definida, compreendendo comprimentos de onda entre aproximadamente 400 nm (violeta) e 700 nm (vermelho).

Esta região espectral é particularmente crítica, pois as transições de energia atômicas e moleculares que ocorrem neste domínio são a base de diversas aplicações químicas, biológicas e de metrologia de cor. A radiação UV e VIS possui energia suficiente para induzir transições entre diferentes níveis de energia eletrônica em moléculas (1). Quando a radiação eletromagnética interage com a matéria, diversos fenômenos podem ocorrer, incluindo reflexão, espalhamento, absorção, fluorescência/fosforescência e reações fotoquímicas (1).

A relevância do OSA na faixa visível está intrinsecamente ligada à capacidade de quantificar a presença de compostos ou biomarcadores que exibem absorção seletiva nesta faixa. Por exemplo, a utilização da faixa visível (em especial o vermelho, 660 nm) para diagnósticos, como na oximetria de pulso (2), não é acidental, mas sim uma consequência direta das diferenças de absorção espectral entre a hemoglobina oxigenada e a desoxigenada. Essa sensibilidade à composição química enfatiza a necessidade fundamental de calibração ultra-precisa do eixo de comprimento de onda (λ). Um desvio mínimo no mapeamento espectral pode resultar em erros significativos na medição da concentração, particularmente em regiões de alta inclinação do espectro de absorção.

Um Analisador de Espectro Óptico (OSA) é um instrumento de precisão projetado para medir e exibir a distribuição de potência óptica de uma fonte de luz sobre um determinado intervalo de comprimento de onda (3). Os três parâmetros-chave quantificados por um OSA são o comprimento de onda, o nível de potência e a Relação Sinal-Ruído Óptico (*Optical Signal-to-Noise Ratio - OSNR*) (3). É crucial distinguir a funcionalidade de um OSA de um espectrofotômetro tradicional de bancada. O termo OSA é frequentemente empregado para medir a distribuição espectral de potência de uma fonte de luz (Potência vs. λ) (3), sendo amplamente utilizado em telecomunicações para caracterizar lasers. No contexto da caracterização de sensores de fibra óptica, como *Long-Period Gratings* (LPGs) e *Fiber Bragg Gratings* (FBGs), o OSA atua como um interrogador espectral, medindo a atenuação ou o pico de reflexão (4).

Analisadores de Espectro Óptico comerciais que operam na faixa visível apresentam custos elevados, frequentemente superiores a 30 mil dólares (USD), conforme pesquisa realizada em março de 2025 (6). Isso restringe significativamente o acesso desses equipa-

mentos para muitas instituições acadêmicas e laboratórios de pequeno porte, limitando o desenvolvimento de pesquisas e o ensino prático de espectroscopia. A precisão na calibração do comprimento de onda é importante em plataformas de espectroscopia, uma vez que a resolução espectral impacta diretamente a capacidade do sistema de identificar e quantificar biomarcadores biomédicos com sensibilidade clínica (2).

Como alternativa, o desenvolvimento de soluções de baixo custo tem ganhado destaque na literatura científica. O espectrômetro OSA Visível foi desenvolvido com uma abordagem inovadora, utilizando impressão 3D, uma webcam e uma grade de difração, totalizando menos de 200 dólares (USD), tornando-o uma solução acessível para pesquisa e ensino.

Este trabalho propõe uma solução de baixo custo baseada no espectrômetro OSA Visível (hardware aberto) e na interface OSA Visível (software customizado), desenvolvido pelo Laboratório de Instrumentação e Telemetria (LITel/UFJF). O princípio fundamental é o mesmo dos OSAs tradicionais: a luz, após interagir com a amostra ou sensor, é dispersa (geralmente por uma grade de transmissão simples) e, em vez de atingir um detector de varredura ou um *array* de fotodiodos especializado, é capturada pelo sensor CMOS (2). O sensor CMOS, que é um detector de intensidade, torna-se o principal *array* de detecção espectral do sistema.

O diferencial deste trabalho reside no uso de técnicas de visão computacional para calibração automática, substituindo métodos manuais ou baseados em hardware dedicado. O desafio metrológico em sistemas de visão é duplo: converter dados de imagem (coordenada de pixel) em dados espetrais (comprimento de onda, λ) e assegurar que a intensidade registrada reflita corretamente a potência óptica incidente (2). O sensor CMOS, embora otimizado para o VIS (400 nm a 700 nm) devido ao filtro infravermelho (2), captura a informação através de uma matriz de filtros Bayer (RGB). Isso significa que a medição não é puramente espectral, mas sim uma resposta de cor que deve ser desmembrada. O processo de dispersão óptica mapeia λ para uma posição física no sensor (p). A relação entre p e λ não é trivialmente linear e é altamente suscetível a desalinhamentos físicos da grade de difração, à temperatura e a não-uniformidades na montagem.

A visão computacional é o meio que realiza a conversão de pixel-para-wavelength (2). Esta etapa proporciona a calibração do eixo λ , transformando uma imagem de difração (dados de pixel RGB) em um espetro quantitativo (Intensidade vs. λ). A calibração desenvolvida neste trabalho combina duas etapas principais: (i) captura do espetro contínuo de luz branca, com detecção do centróide e ajuste inicial de uma reta via regressão linear; e (ii) correlação direta entre picos de intensidade de lasers (532 nm e 650 nm) e suas posições na imagem, definindo a relação comprimento de onda-posição de pixel. Já o eixo de intensidade (potência) é validado por meio da comparação com

um espetrômetro de referência, permitindo modelar a resposta dos canais RGB do OSA Visível em função da irradiância incidente.

Ao contrário dos OSAs tradicionais, que garantem a precisão através de componentes ópticos e eletrônicos caros (monocromadores de alta qualidade, arquiteturas de feixe duplo) (1), o método deste trabalho utiliza software (visão computacional) para compensar as deficiências inerentes ao hardware óptico de baixo custo. Essa abordagem representa uma mudança de paradigma metrológico, onde a garantia de precisão migra da engenharia óptica de *hardware* para a engenharia algorítmica de *software*. O algoritmo de calibração deve ser robusto o suficiente para realizar a compensação de instabilidade da fonte de luz e a correção de ruído via *software*, replicando funções que os sistemas ópticos de alto custo executam em *hardware* (1).

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um Analisador de Espectro Óptico de baixo custo para a faixa visível (400–700 nm), integrando hardware acessível e software customizado com calibração automatizada via visão computacional. A calibração do instrumento deve garantir a precisão nas duas dimensões metrológicas: a escala de Wavelength (Eixo X) e a escala de Potência (Eixo Y) (3), replicando a funcionalidade de um OSA comercial.

Os objetivos específicos incluem:

- Desenvolver o espetrômetro OSA Visível de baixo custo (impresso em 3D);
- Implementar a interface OSA Visível para análise espectral com interface intuitiva;
- Criar sistema de calibração automatizada utilizando técnicas de visão computacional que realize a conversão precisa de pixel-para-wavelength (2);
- Validar a precisão do eixo λ através de experimentos de repetibilidade temporal e comparação com espetrômetro ThorLabs (CCT11), utilizando uma fonte de luz RGB;
- Validar a calibração do eixo de intensidade mediante comparação com o espetrômetro ThorLabs e modelagem da relação entre os canais RGB do OSA Visível e as medições do equipamento de referência, utilizando uma fonte com controle de intensidade por PWM;
- Reduzir custos de mais de 30 mil dólares (USD) (OSA comercial) para menos de 200 dólares (USD);
- Alcançar precisão de calibração de ± 2 nm na faixa visível e incertezas expandidas compatíveis com aplicações educacionais e de pesquisa.

A metodologia adotada comprehende o desenvolvimento de hardware baseado em impressão 3D, implementação de algoritmos de visão computacional em Python, calibração híbrida com luz branca e lasers de referência, e validação experimental em duas frentes complementares. Na primeira frente, uma fonte de luz RGB com picos espectrais característicos (azul, verde e vermelho) é utilizada para avaliar a repetibilidade temporal do OSA Visível e para comparar os comprimentos de onda medidos com os do espectrômetro ThorLabs. Na segunda frente, uma fonte com controle PWM (LEDs verde, vermelho e azul acionados individualmente, com duty cycle variável) permite caracterizar a resposta de intensidade de ambos os equipamentos e modelar a relação entre os canais RGB do OSA Visível e as medições do ThorLabs. As duas fontes são distintas e foram projetadas para atender aos requisitos específicos de cada validação; sua descrição detalhada encontra-se no Capítulo 3. Os métodos de calibração por visão envolvem: localização geométrica da linha de difração na imagem (2); mapeamento espectral com fontes de referência; e processamento de dados para extrair a curva intensidade vs. comprimento de onda (2).

A importância dos OSAs não se restringe somente ao laboratório de pesquisa, estendendo-se a setores de alta tecnologia, saúde e manufatura. Nas telecomunicações, o OSA monitora a precisão do comprimento de onda para garantir que os canais estejam corretamente separados em redes DWDM (3). Na caracterização de sensores de fibra óptica, como FBGs e LPGs, o OSA permite quantificar a sensibilidade com precisões da ordem de 0.037 nm/kPa (5). Em aplicações biomédicas, como a oximetria de pulso, a precisão na faixa visível (especialmente em 660 nm) é crítica para diagnósticos precisos (2). O desenvolvimento de um método de calibração por visão computacional habilita diretamente a transição industrial para dispositivos *Point-of-Care* (POC) em ambientes com recursos limitados.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre espectroscopia óptica e analisadores de espectro; o Capítulo 3 detalha a metodologia de desenvolvimento do hardware e software, incluindo os algoritmos de visão computacional e a descrição dos experimentos de validação; o Capítulo 4 descreve os resultados experimentais, abrangendo repetibilidade temporal, comparação em comprimento de onda, caracterização de intensidade e modelagem por combinação de canais; e o Capítulo 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do Analisador de Espectro Óptico de baixo custo. Inicialmente, são apresentados os princípios de difração e dispersão, fundamentais para o funcionamento do espectrômetro. Posteriormente, são discutidos os Analisadores de Espectro Óptico, suas arquiteturas e métodos de calibração, com ênfase nas técnicas modernas e na calibração por visão computacional. Por fim, é apresentado o processo híbrido de calibração desenvolvido neste trabalho.

2.1 FUNDAMENTOS DA ESPECTROSCOPIA ÓPTICA

A espectroscopia óptica é uma ferramenta importante para a caracterização da matéria, explorando a interação entre a radiação eletromagnética e as propriedades atômicas e moleculares de uma amostra. A radiação ultravioleta (UV) e a luz visível representam uma pequena fração do espectro eletromagnético, que inclui outras formas de radiação como rádio, infravermelho (IR), raios cósmicos e raios X (1). A Figura 1 ilustra o espectro eletromagnético completo, com a região visível expandida em destaque. O Analisador de Espectro Óptico (OSA) de baixo custo, denominado OSA Visível (espectrômetro e interface), é projetado para operar na faixa de luz visível (VIS, 380-750 nm). Neste intervalo, a absorção de energia luminosa tipicamente desencadeia transições eletrônicas em moléculas ou íons, permitindo a identificação e quantificação de compostos químicos através de seus espectros característicos.

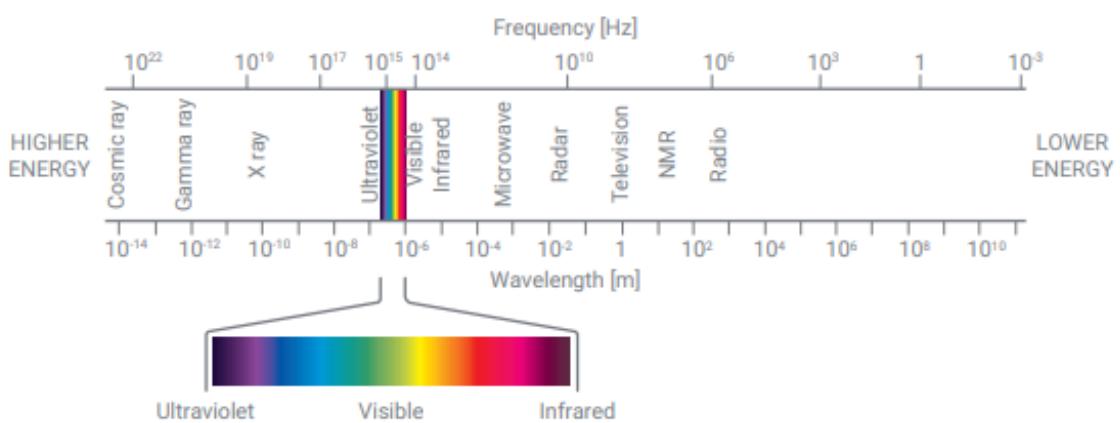


Figura 1 – O espectro eletromagnético, com a seção de luz visível expandida.

Fonte: (1).

2.1.1 O princípio da difração de Fraunhofer e grades ópticas

A separação dos diferentes comprimentos de onda que incidem sobre o detector do OSA é realizada por um elemento dispersor, neste caso, uma grade de difração. A difração de Fraunhofer (também chamada de difração de campo distante) descreve o padrão de difração que ocorre quando as ondas planas incidem sobre o objeto dispersor e o padrão é observado a uma distância suficientemente longa ou no plano focal de uma lente de imagem, que é o arranjo típico de um espectrômetro (8).

A relação para a dispersão angular de uma grade de difração é dada pela Equação da Grade:

$$n\lambda = d(\sin \theta + \sin \alpha) \quad (2.1)$$

Nesta equação, n representa a ordem de difração (geralmente $n = 1$ é utilizado), λ é o comprimento de onda da luz, d é a constante da grade (espaçamento entre as linhas, $d = 1 \mu\text{m}$ para a grade de 1000 linhas/mm usada no espectrômetro OSA Visível), α é o ângulo de incidência da luz na grade, e θ é o ângulo de difração.

A relação entre o comprimento de onda (λ) e a posição física do pixel (x) no detector, resultante dessa dispersão, é inherentemente não linear, pois envolve funções trigonométricas de ângulo. No entanto, em sistemas compactos de baixo custo, como o espectrômetro OSA Visível, o detector captura apenas uma porção angular muito pequena do espectro. Esta limitação angular permite que o mapeamento seja modelado, em primeira aproximação, por uma Regressão Linear ($\lambda(x) = a \cdot x + b$) (9). Reconhece-se que essa simplificação linear requer uma calibração rigorosa e absoluta, que é justamente fornecida pelos pontos de referência de lasers de comprimento de onda conhecido, como será detalhado nas seções subsequentes.

2.2 ANALISADORES DE ESPECTRO ÓPTICO: ARQUITETURAS E METROLOGIA

O Analisador de Espectro Óptico (OSA) é um instrumento essencial para medir a distribuição de potência óptica em função do comprimento de onda (10).

2.2.1 Definição e arquitetura do espectrômetro OSA Visível

Historicamente, OSAs utilizavam arquiteturas baseadas em monocromadores sintonizáveis (varredura), onde um filtro óptico ajustável resolvia os componentes espetrais individualmente. Em contraste, o OSA Visível utiliza uma arquitetura baseada em *array* de detectores (grade/CMOS), que captura todo o espetro simultaneamente, melhorando a velocidade de aquisição (11). A estrutura emprega uma grade de difração como elemento dispersor e um sensor CMOS (típico de webcams) como detector, combinando simplicidade

e baixo custo. A especificação detalhada dos componentes e a descrição da construção encontram-se no Capítulo 3.

O sinal de luz, depois de disperso, é discretizado pelo sensor CMOS. A intensidade digital no pixel (x, y) é representada pela equação de amostragem:

$$I(x, y) = \sum_{k=0}^{255} k \cdot P(k|x, y) \quad (2.2)$$

onde k é o nível de intensidade (de 0 a 255) e $P(k|x, y)$ é a probabilidade do pixel (x, y) registrar a intensidade k .

2.2.2 Metrologia de OSAs: padrões e a justificativa para a solução de baixo custo

A calibração de OSAs de alta precisão é regida por normas internacionais, como a IEC 62129, que detalham procedimentos para garantir a rastreabilidade da medição de comprimento de onda e potência (13). Métodos tradicionais de calibração utilizados em equipamentos de laboratório envolvem:

1. Fontes de Referência Estáveis: Uso de lasers altamente estabilizados, cujos comprimentos de onda são monitorados simultaneamente por um *wavemeter* de altíssima acurácia. (18) discutiram a necessidade de caracterizar com precisão as fontes ópticas em medições de fibras ópticas e apresentaram técnicas de calibração para OSAs (17).
2. Células de Gás: Utilização de células de referência (e.g., HCN) que fornecem picos de absorção fixos e bem conhecidos em faixas específicas (17).
3. Modelagem Polinomial Avançada: Empregando lâmpadas de arco (neon, argônio) para gerar múltiplos picos espectrais conhecidos, ajustados por polinômios de segunda ou terceira ordem para mapear a relação comprimento de onda-pixel. (19) empregam métodos de calibração precisos utilizando parâmetros do sistema para espectrômetros de grade (9).

O custo desses métodos e dos equipamentos comerciais é proibitivo, variando de mais de 30 mil a mais de 100 mil dólares (USD) para modelos de alta performance. Diante dessa realidade, o sistema OSA Visível representa uma abordagem estratégica para democratizar a análise espectral. A substituição da instrumentação metrológica de ponta pela inteligência algorítmica (visão computacional) permite alcançar acurácia adequada a um custo total inferior a 200 dólares (USD), justificando a inovação do processo de calibração automatizada.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre OSAs comerciais e o OSA Visível desenvolvido neste trabalho.

Tabela 1 – Comparativo de Requisitos Metrológicos: OSA Comercial vs. OSA Visível

| Modelo (Referência) | Faixa Espectral (nm) | Custo Estimado (USD) | Acurácia Típica | Método de Calibração |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|---|
| OSA201C (6) | 350-1100 | > 30 mil USD | Sub-nm | Interno, Rastreado a Padrões |
| CCT11 (7) | 350-700 | 3–6 mil USD | < 0,5 nm | Referência nos experimentos |
| AQ6380 (25) | 350-1750 | 100–200 mil USD | Sub-pm | Padrões de Gás/Wavemeter (17) |
| espectrômetro OSA Visível | 380-750 | < 200 USD | Incerteza exp. < 0,3 nm | Híbrido (Visão Computacional + Laser) |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

2.2.3 Resolução espectral e resolução amostral

É fundamental distinguir resolução espectral de resolução amostral em OSAs (?). A **resolução espectral** (*wavelength resolution*) refere-se à capacidade física do instrumento de separar componentes espectrais individuais. Ela é determinada pela largura e formato do filtro óptico (monocromador ou, em espetrômetros de grade, pela fenda e pela dispersão): uma fenda estreita permite distinguir detalhes espectrais finos, enquanto uma fenda larga favorece a medição precisa da potência total de picos largos. A **resolução amostral** (*min. sampling resolution*) refere-se à densidade de pontos ao longo do eixo de comprimento de onda — o menor passo (*step size*) entre amostras. Um passo de amostragem grosso pode provocar perda de detalhes entre pontos, mesmo quando a óptica seria capaz de resolvê-los (?). Em OSAs de varredura, há tipicamente uma relação entre ambas (e.g., várias amostras por unidade de resolução espectral); em espetrômetros baseados em *array* de detectores, como o OSA Visível, a resolução amostral é fixada pelo número de pixels e pela dispersão (nm/pixel).

2.3 FUNDAMENTAÇÃO DO MAPEAMENTO COMPRIMENTO DE ONDA-PIXEL

A calibração de comprimento de onda, ou calibração espectral, é o processo crucial que estabelece a correspondência exata entre o índice de pixel no sensor CMOS (coordenada x) e o valor absoluto do comprimento de onda (λ).

2.3.1 O desafio da relação $\lambda(x)$: dispersão física e distorções do sistema

A transformação do ângulo de difração (θ) em posição de pixel (x) é influenciada pela geometria do sistema e pelas imperfeições do hardware. Em espetrômetros construídos

com peças COTS (*Commercial Off-The-Shelf*) e impressão 3D, existem fontes de erro que desviam a relação $\lambda(x)$ do ideal, como desalinhamentos angulares da grade, curvatura de campo do sensor e tolerâncias mecânicas na montagem.

2.3.2 A Modelagem de Primeira Ordem: Regressão Linear ($\lambda(x) = a \cdot x + b$)

Para simplificar o processamento e, dado que o OSA Visível opera em uma faixa espectral relativamente estreita (380-750 nm), o mapeamento é modelado com um ajuste de primeira ordem (9). A relação linear entre o pixel e o comprimento de onda é definida por:

$$\lambda(x) = a \cdot x + b \quad (2.3)$$

onde a é o fator de dispersão (nm/pixel) e b é o *offset* de comprimento de onda.

O método de calibração do OSA Visível utiliza o princípio de Mínimos Quadrados (*Least Squares*) para determinar a e b , mas com uma ênfase particular na calibração por pontos fixos. Os lasers de referência Verde ($\lambda_{verd} = 532$ nm) e Vermelho ($\lambda_{verm} = 650$ nm) fornecem dois pontos metrológicos de ancoragem absoluta.

Os coeficientes a e b são calculados diretamente a partir da posição dos picos de intensidade desses lasers (x_{verd} e x_{verm}):

$$a = \frac{\lambda_{verm} - \lambda_{verd}}{x_{verm} - x_{verd}}, \quad b = \lambda_{verd} - a \cdot x_{verd} \quad (2.4)$$

Utilizar dois pontos fixos é fundamental. Um único ponto definiria apenas o *offset* b , mas deixaria a taxa de dispersão a (nm/pixel) sujeita a erros sistêmicos. A determinação de ambos os parâmetros por dois pontos de referência garante que o escalonamento da dispersão angular seja corretamente aplicado em toda a faixa de operação do espectrômetro, minimizando o erro de inclinação.

2.3.3 Metrologia de acurácia: o conceito de erro RMS

A acurácia do mapeamento comprimento de onda-pixel é avaliada utilizando o Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* - RMS), uma métrica padrão na metrologia espectral que quantifica a magnitude média do erro entre os valores medidos e os valores de referência (9).

O processo híbrido de calibração demonstra melhoria de precisão em relação ao ajuste preliminar: a ancoragem com lasers de referência refine os parâmetros e reduz o erro residual. A validação experimental (Capítulo 4) reporta incertezas expandidas e concordância com espectrômetro de referência.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros chave da calibração linear do OSA Visível.

Tabela 2 – Parâmetros Chave da Calibração Linear do OSA Visível

| Parâmetro Metrológico | Ajuste Preliminar (Luz Branca) | Ajuste Final (Lasers 532/650 nm) | Significado Físico |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Coeficiente a (nm/pixel) | -0,06 | 1,475 | Taxa de dispersão (nm por pixel) |
| Coeficiente b (nm) | 203,14 | 195,7 | Intercepto (Wavelength Offset) |
| Precisão (validação) | — | ±0,13–0,29 nm | Incerteza expandida, Exp. 1 (Cap. 4) |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

2.4 APLICAÇÃO DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA CALIBRAÇÃO AUTOMATIZADA

A Visão Computacional é o diferencial tecnológico que permite ao OSA Visível executar calibrações de forma automatizada, robusta e precisa, substituindo métodos manuais demorados ou dependentes de hardware dedicado.

2.4.1 Processamento digital do sinal espectral (imagens CMOS)

O *pipeline* de processamento digital é crucial para extrair o dado espectral da imagem bruta capturada pela webcam. Uma etapa inicial essencial é a Média Temporal (*Frame Averaging*). Em sensores CMOS de baixo custo, o ruído aleatório (como ruído de disparo ou ruído térmico) é significativo. Para a calibração com lasers, o software captura $N = 20$ quadros em um curto intervalo e calcula a intensidade média $\bar{I}(x, y)$:

$$\bar{I}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(x, y) \quad (2.5)$$

O cálculo da média temporal melhora drasticamente a Relação Sinal-Ruído (SNR), permitindo a detecção mais precisa dos picos de intensidade dos lasers. Após a média, a imagem é convertida para escala de cinza, simplificando a análise da intensidade luminosa.

2.4.2 Segmentação e limiarização adaptativa de imagem (método de Otsu)

Para isolar o espectro (o sinal de interesse) do fundo escuro e do ruído residual da imagem, é necessária uma etapa de segmentação. O Método de Otsu é um algoritmo automático de limiarização global que opera maximizando a variância entre classes (*foreground* vs. *background*) no histograma de intensidade da imagem (23).

O Otsu calcula o limiar ótimo T que melhor divide os pixels da imagem em duas classes, garantindo que o sinal espectral, mesmo que difuso, seja completamente capturado. Isso resulta em uma máscara binária $M(x, y)$:

$$M(x, y) = \begin{cases} I_{gray}(x, y), & \text{se } I_{gray}(x, y) \geq T \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.6)$$

A aplicação de um limiar adaptativo torna o processo de calibração robusto a variações na iluminação da fonte de luz branca e às condições ambientais, eliminando a necessidade de ajustes manuais do limiar.

2.4.3 Localização de fontes: centróide e detecção de picos

A visão computacional é usada para duas tarefas críticas de localização: o centróide para o espectro contínuo e a detecção de pico para os lasers de referência.

Cálculo do Centróide: O centróide (x_c, y_c) representa o centro de massa ponderado pela intensidade dos pixels ativos dentro da máscara M (24):

$$x_c = \frac{\sum_{x,y} x \cdot M(x, y)}{\sum_{x,y} M(x, y)}, \quad y_c = \frac{\sum_{x,y} y \cdot M(x, y)}{\sum_{x,y} M(x, y)} \quad (2.7)$$

Este cálculo é vital, pois o espetrômetro OSA Visível, devido à sua construção 3D com tolerâncias inerentes, pode apresentar um desalinhamento rotacional do espectro no sensor CMOS. O centróide fornece um ponto de referência central que permite à regressão linear preliminar definir corretamente a orientação espacial da linha espectral na imagem (a inclinação da reta $y = mx + c$), compensando o desalinhamento mecânico antes da calibração absoluta.

Detecção de Picos: Para os lasers de referência, a posição de comprimento de onda é determinada pelo pixel de máxima intensidade. A posição do pico (x_{peak}) é determinada pelo argumento máximo da função intensidade $I(x)$ ao longo da linha espectral:

$$x_{peak} = \arg \max_x I(x) \quad (2.8)$$

Esta precisão na localização dos picos é o que garante a acurácia metrológica final da calibração, fornecendo os pontos fixos necessários para a determinação dos coeficientes a e b .

A Tabela 3 resume os algoritmos de visão computacional aplicados à calibração.

2.5 MODELAGEM DE PERFIS ESPECTRAIS E DETECÇÃO DE PICOS

A extração de parâmetros úteis de um espectro (comprimento de onda central, intensidade e largura de pico) requer modelos que descrevam a forma das linhas espetrais.

Tabela 3 – Algoritmos de Visão Computacional Aplicados à Calibração

| Algoritmo (Referência) | Propósito | Impacto Metrológico | Justificativa para Baixo Custo |
|---------------------------|---------------------------|---|---|
| Média Temporal | Aumento do SNR | Reduz erro aleatório na intensidade | Mitiga o ruído inerente a sensores CMOS de baixo custo |
| Limiarização Otsu (23) | Segmentação ROI espectral | Isolamento do sinal de interesse | Automatiza o processo, tornando-o robusto a variações de iluminação |
| Cálculo de Centróide (24) | Localização geométrica | Define a orientação espacial da dispersão | Compensa desalinhamentos mecânicos da estrutura 3D |
| Regressão Linear | Mapeamento $\lambda(x)$ | Converte pixel para nm com precisão funcional | Eficácia metrológica com baixo custo computacional |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Perfis espectrais são tipicamente modelados por curvas Lorentzianas ou Gaussianas, cada uma associada a diferentes mecanismos físicos de alargamento (14).

O perfil Lorentziano está ligado ao alargamento homogêneo: o efeito atua da mesma forma sobre todos os átomos ou moléculas. As causas principais incluem o tempo de vida finito do estado excitado (alargamento natural) e colisões entre átomos (alargamento por pressão). Matematicamente, a Lorentziana é expressa por

$$I(\lambda) = I_0 \frac{\gamma^2}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \gamma^2} \quad (2.9)$$

onde I_0 é a intensidade máxima, λ_0 a posição central do pico e γ está relacionado à largura à meia altura (FWHM = 2γ). O decaimento da curva da Lorentziana é lento ($\propto 1/\lambda^2$).

A Gaussiana tem a forma $I(\lambda) = I_0 \exp(-(λ - λ_0)^2/(2σ^2))$, com FWHM = $2σ\sqrt{2 \ln 2}$. Ela decai mais rapidamente que a da Lorentziana. A Figura 2 ilustra a comparação visual entre os dois perfis padronizados.

Em condições reais, perfis de Voigt (convolução Gaussiana–Lorentziana) podem ser necessários; em sistemas de baixo custo, a escolha entre Gaussiana e Lorentziana é frequentemente empírica, baseada na qualidade do ajuste aos dados (14).

O refinamento dos parâmetros (posição, largura, amplitude) é feito por ajuste de mínimos quadrados não lineares, com algoritmos como Levenberg-Marquardt (16). A precisão do ajuste depende da relação sinal-ruído e da forma do perfil; para uma mesma

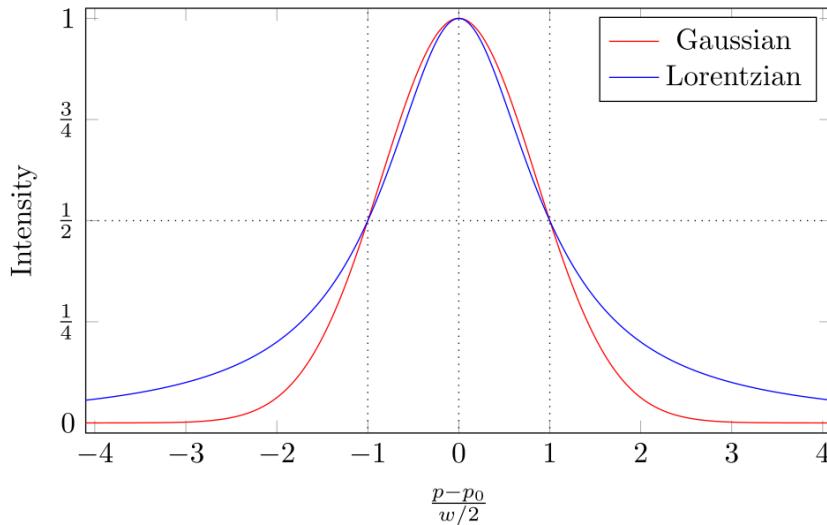


Figura 2 – Comparação entre perfis Gaussiano (vermelho) e Lorentziano (azul) padronizados. O HWHM ($w/2$) é 1.

Fonte: (14).

SNR, Gaussianas permitem localização de centróide mais precisa, enquanto Lorentzianas oferecem melhor estimativa da área total devido à extensão de suas caudas.

2.6 SATURAÇÃO EM SENSORES CMOS E MODELAGEM DA RESPOSTA DE INTENSIDADE

A calibração do eixo de intensidade (potência) em espectrômetros que utilizam webcams exige atenção à saturação do sensor. A saturação ocorre quando o sinal excede a capacidade do conversor analógico-digital (ADC) ou do poço de potencial do pixel, causando achatamento dos picos e perda de linearidade entre irradiância incidente e intensidade registrada (15). Em sensores CMOS de 8 bits, a escala é limitada a 0–255 níveis; o achatamento transforma perfis Gaussianos ou Lorentzianos em estruturas de topo plano. A Figura 3 ilustra um caso real: no software ThorSpectra do espectrômetro ThorLabs CCT11, o *Integration Time* foi de propósito aumentado com a fonte de PWM em 100% de potência; em consequência, o sinal saturou. No ThorLabs, a intensidade é expressa em 2^{16} bits (0–65535); o topo plano do pico verde indica que o limite foi excedido.

Antes da saturação abrupta, o sensor pode entrar em regime de “saturação suave”: a resposta torna-se não linear (compressão de ganho) enquanto a relação irradiância–contagem digital ainda é contínua. Este comportamento é particularmente relevante em webcams com matriz Bayer, onde o crosstalk entre canais RGB e o processamento interno (demosaicing) introduzem desafios adicionais.

Para modelar a resposta intensidade–duty cycle em uma faixa definida onde a saturação suave predomina, um polinômio de grau 2 ($f(x) = ax^2 + bx + c$) pode capturar

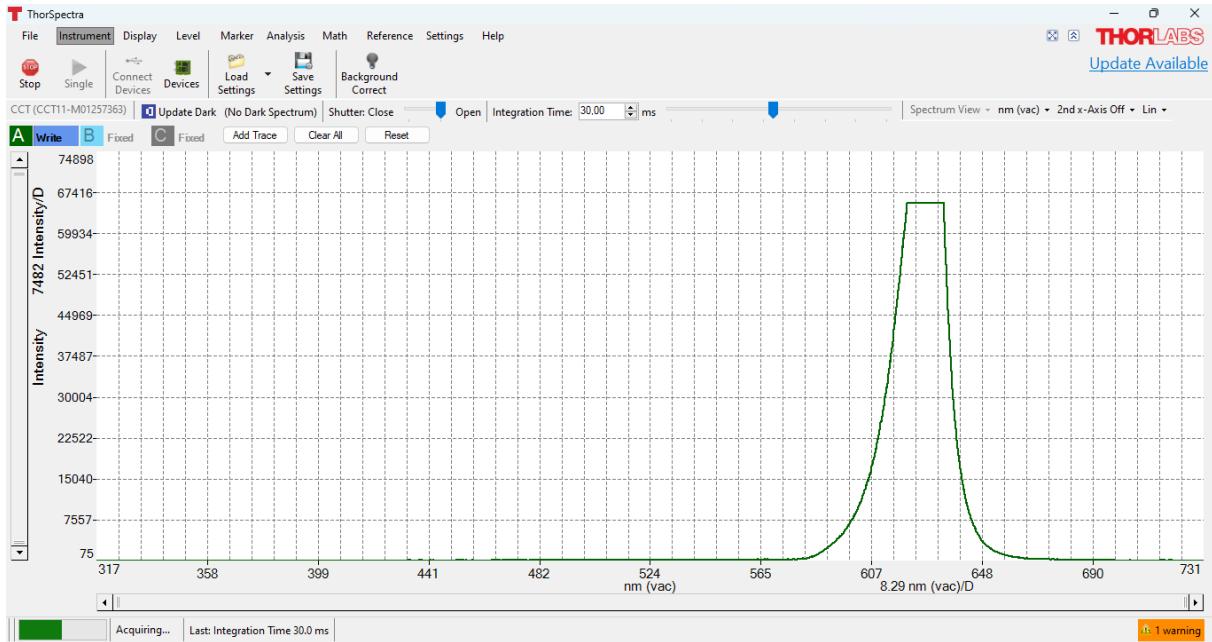


Figura 3 – Exemplo de saturação no espetrômetro ThorLabs CCT11 (software ThorSpectra): topo plano do pico espectral em LED verde com *Integration Time* elevado e potência 100% da fonte PWM. Intensidade em 2^{16} bits.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

a concavidade para baixo típica da compressão de ganho. Os coeficientes quadráticos negativos ($a < 0$) refletem a diminuição do ganho à medida que a irradiância aumenta. É importante notar que o polinômio de segundo grau é adequado apenas para uma região limitada do domínio: se extrapolado, a concavidade para baixo levaria a intensidades que diminuem e eventualmente tornam-se negativas para valores altos de x , em vez de atingir um determinado patamar como em uma saturação real. Portanto, o modelo polinomial deve ser utilizado estritamente dentro da faixa experimental calibrada.

2.7 O PROCESSO HÍBRIDO DE CALIBRAÇÃO DO OSA VISÍVEL

O processo de calibração da interface OSA Visível combina a visão computacional (Seções 2.4 e 2.5) com referências metrológicas de comprimento de onda conhecido. Consiste em duas etapas: (i) calibração preliminar com luz branca, para obter a orientação espacial do espectro na imagem (centróide, regressão da reta espectral) e os parâmetros iniciais a e b ; e (ii) calibração absoluta com lasers Verde (532 nm) e Vermelho (650 nm), para calibrar a escala: o software captura 20 quadros com média temporal, determina as posições dos picos (x_{532}, x_{650}) e calcula os coeficientes finais via Equação 2.4. A precisão metrológica é avaliada experimentalmente conforme descrito no Capítulo 4.

Essa correspondência entre as posições dos picos na reta de calibração e os comprimentos de onda reais garante que a dispersão (nm/pixel) seja corretamente escalada em

toda a faixa de operação do OSA. A utilização de dois pontos fixos é essencial para definir corretamente tanto o *offset* quanto a dispersão da reta linear.

3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE E SOFTWARE

Este capítulo detalha os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do espectrômetro OSA Visível e da interface OSA Visível. A metodologia abrange desde a seleção e montagem dos componentes ópticos até os processos de calibração espectral automatizada via visão computacional, assegurando a precisão e confiabilidade das medições espectrais na faixa visível (380-750 nm).

3.1 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA E TRABALHOS CORRELATOS

A calibração de OSAs para a faixa visível tem sido amplamente explorada na literatura (Seção 2.2 e 2.3). No contexto de espetrômetros de baixo custo, (21) desenvolveram o projeto *Open Fiber Spectrometer*, espetrômetro de código aberto que serviu de base para este trabalho. A metodologia adotada diferencia-se por combinar calibração preliminar com luz branca e calibração absoluta com lasers (532 nm e 650 nm), alcançando precisão adequada a custo inferior a 200 dólares (USD).

3.2 CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÔMETRO OSA VISÍVEL

3.2.1 Seleção e especificação dos componentes

O espetrômetro OSA Visível foi desenvolvido com base no projeto *Open Fiber Spectrometer* (21), um espetrômetro de código aberto que fornece modelos 3D e instruções detalhadas para construção. O projeto original foi adaptado para atender às necessidades específicas deste trabalho, com foco na faixa visível do espectro (380-750 nm).

A seleção dos componentes foi orientada por critérios de baixo custo, disponibilidade comercial e adequação às especificações técnicas necessárias para operação na faixa visível. A Tabela 4 apresenta os componentes principais e suas especificações.

3.2.2 Arquitetura óptica e princípios de funcionamento

A arquitetura óptica do espetrômetro OSA Visível segue o princípio clássico de um espetrômetro de grade de transmissão, adaptado para componentes de baixo custo. A Figura 4 ilustra a disposição dos componentes principais.

O caminho óptico segue a seguinte sequência:

1. Entrada de Luz: A luz proveniente da amostra ou fonte de calibração entra através de uma fenda óptica ajustável, que controla a largura do feixe incidente e, consequentemente, a resolução espectral do sistema.

Tabela 4 – Componentes principais do espetrômetro OSA Visível e especificações técnicas

| Componente | Especificação | Função | Custo Aprox. (USD) |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Estrutura 3D | PLA, impressão FDM | Suporte mecânico e alinhamento óptico | 5-10 |
| Grade de Difração | 1000 linhas/mm, transmissão | Dispersão espectral | 50-80 |
| Webcam USB | 640×480 pixels, CMOS | Detecção espectral | 20-40 |
| Fonte de Luz Branca | LED RGB, CRI 82 | Calibração preliminar | 10-15 |
| Lasers de Referência | 532 nm (verde), 650 nm (vermelho) | Calibração absoluta | 30-50 |
| Fenda Óptica | Ajustável, 50-200 μm | Controle de resolução | 5-10 |
| Total | | | < 200 USD |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

2. Dispersão Espectral: A luz colimada incide sobre uma grade de difração de transmissão com densidade de 1000 linhas/mm. A relação entre o comprimento de onda (λ) e o ângulo de difração (θ) é dada pela Equação 2.1 (Seção 2.1), onde n representa a ordem de difração (geralmente $n = 1$), $d = 1 \mu\text{m}$ é o espaçamento da grade (inverso da densidade de linhas), e α é o ângulo de incidência da luz na grade (8).
3. Detecção: O espectro disperso é capturado por um sensor CMOS de uma webcam USB, posicionado no plano focal da grade. O sensor discretiza a informação espectral em uma matriz de pixels, onde cada coluna corresponde a uma faixa de comprimentos de onda.

3.2.3 Fabricação da estrutura por impressão 3D

A estrutura física do espetrômetro foi projetada utilizando software de modelagem 3D (CAD) e fabricada por meio de impressão 3D utilizando tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM - *Fused Deposition Modeling*). Esta abordagem oferece várias vantagens estratégicas:

- Custo Reduzido: A impressão 3D elimina a necessidade de ferramentas especializadas e processos de usinagem de precisão, reduzindo muito os custos de fabricação (12).
- Personalização: O design pode ser facilmente modificado e adaptado para diferentes aplicações ou requisitos específicos, sem custos adicionais significativos.

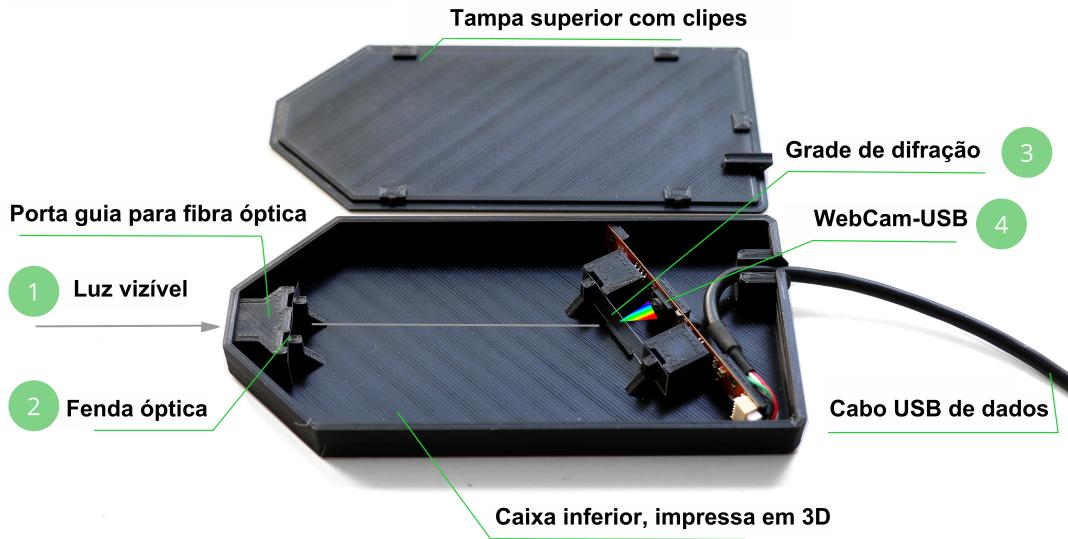


Figura 4 – Arquitetura do espetrômetro OSA Visível: (1) Luz incidente, (2) Fenda óptica, (3) Grade de difração, (4) Webcam CMOS. Adaptado de (21).

- Reproduzibilidade: Os arquivos de modelo 3D podem ser compartilhados e replicados em qualquer local com acesso a uma impressora 3D, facilitando a disseminação do projeto.
- Integração de Componentes: A estrutura impressa incorpora suportes e guias para posicionamento preciso dos componentes ópticos, garantindo alinhamento adequado sem necessidade de ajustes mecânicos complexos.

O material utilizado foi filamento de ácido polilático (PLA), escolhido por sua estabilidade dimensional, facilidade de impressão e baixo custo. A resolução de impressão foi configurada para 0,2 mm de altura de camada, garantindo superfícies suficientemente lisas para aplicações ópticas de baixa precisão.

3.2.4 Montagem e alinhamento óptico

O processo de montagem seguiu uma sequência sistemática para garantir o alinhamento adequado dos componentes:

1. Instalação da Estrutura Base: A estrutura impressa em 3D foi montada e verificada quanto à integridade estrutural e dimensional.
2. Posicionamento da Fenda Óptica: A fenda foi instalada na entrada óptica e ajustada para uma largura de aproximadamente 100 μm , otimizando o compromisso entre resolução espectral e intensidade do sinal.

3. Instalação da Grade de Difração: A grade foi posicionada perpendicularmente ao eixo óptico, com o ângulo de incidência (α) ajustado para aproximadamente 45° , garantindo dispersão adequada na faixa visível.
4. Posicionamento do Detector: A webcam foi fixada na estrutura de forma que o sensor CMOS capture todo o espectro disperso, com o eixo horizontal do sensor alinhado com a direção de dispersão.
5. Verificação do Alinhamento: O alinhamento foi verificado visualmente utilizando uma fonte de luz branca, observando a formação de um espectro contínuo e uniforme no sensor.

3.2.5 Caracterização do sistema de detecção

O sistema de detecção baseado em webcam USB apresenta características específicas que influenciam o desempenho do espectrômetro. O sensor CMOS utilizado possui resolução de 640×480 pixels, com taxa de amostragem de 30 fps. A discretização do sinal óptico segue a Equação 2.2, onde $I(x, y)$ é a intensidade digital no pixel (x, y) , k representa os níveis de intensidade (0 a 255 em escala de 8 bits), e $P(k|x, y)$ é a probabilidade do pixel (x, y) registrar a intensidade k .

Uma característica importante do sensor CMOS é a presença de uma matriz de filtros Bayer (RGB), que significa que cada pixel é sensível a uma faixa específica do espectro (vermelho, verde ou azul). Para a calibração espectral, esta característica é contornada através da conversão para escala de cinza, que integra a resposta espectral dos três canais de cor.

3.3 DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE OSA VISÍVEL

3.3.1 Arquitetura e plataforma de desenvolvimento

A interface OSA Visível foi desenvolvida em Python 3.8+, escolhido por sua portabilidade, variedade de bibliotecas científicas e facilidade de integração com hardware. A arquitetura do software segue um modelo modular, separando as funcionalidades de aquisição de dados, processamento de imagem, calibração e visualização.

As principais bibliotecas utilizadas incluem:

- OpenCV (cv2): Para aquisição de vídeo, processamento de imagem e implementação de algoritmos de visão computacional.
- Pillow (PIL): Para manipulação adicional de imagens e conversão de formatos.
- NumPy: Para operações numéricas e manipulação de arrays multidimensionais.

- SciPy: Para funções científicas avançadas, incluindo regressão linear e processamento de sinais.
- Matplotlib: Para visualização de gráficos e espectros.
- Tkinter: Para desenvolvimento da interface gráfica do usuário (GUI).

A compatibilidade multiplataforma (Windows 10/11 e Linux Ubuntu 22.04) foi garantida através do uso de bibliotecas padrão e testes extensivos em ambos os ambientes.

3.3.2 Interface gráfica do usuário

A interface gráfica foi projetada para guiar o usuário através de um fluxo intuitivo de operação, dispensando conhecimentos avançados em programação. A Figura 5 ilustra a janela principal do software.

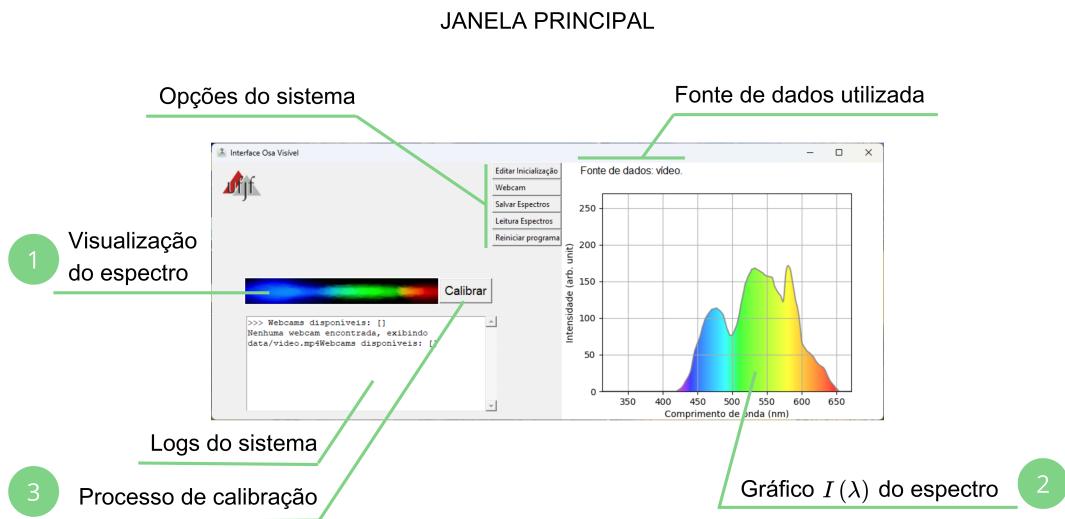


Figura 5 – Janela principal da interface OSA Visível: (1) Visualização do espectro em tempo real, (2) Gráfico de intensidade $I(\lambda)$ vs. comprimento de onda, (3) Painel de controle e calibração.

As principais funcionalidades da interface incluem:

- Visualização em Tempo Real: Exibição contínua do espectro capturado pela webcam, permitindo monitoramento visual da qualidade do sinal.
- Gráficos Espectrais: Visualização dos dados processados em formato de gráfico $I(\lambda)$, com opções de zoom e análise de picos.

- Painel de Calibração: Acesso rápido às ferramentas de calibração, com assistente passo a passo para guiar o usuário.
- Exportação de Dados: Funcionalidade para salvar espectros em formato texto (.txt) para análise posterior.
- Configurações do Sistema: Ajustes de parâmetros da webcam, seleção de dispositivo de vídeo e configurações de processamento.

3.4 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO AUTOMATIZADA

A calibração do espetrômetro é o processo crítico que estabelece a correspondência precisa entre a posição dos pixels no sensor CMOS e os comprimentos de onda correspondentes. O método desenvolvido combina técnicas de visão computacional com referências metrológicas de comprimento de onda conhecido, resultando em um processo híbrido automatizado.

3.4.1 Etapa 1: calibração preliminar com luz branca

A primeira etapa do processo de calibração utiliza o espectro contínuo de uma fonte de luz branca para estabelecer uma relação preliminar entre posição de pixel e comprimento de onda. Esta etapa é fundamental para compensar desalinhamentos mecânicos e definir a orientação espacial do espectro na imagem.

3.4.1.1 *Aquisição do sinal digital*

A calibração inicia com a captura de um único quadro ($N = 1$) do espectro contínuo via biblioteca OpenCV. A escolha de um único quadro é adequada para esta etapa, pois o espectro contínuo de luz branca apresenta alta intensidade e baixa variabilidade temporal, não requerendo média temporal para redução de ruído.

O processo de aquisição segue os seguintes passos:

1. Inicialização da webcam através da interface OpenCV.
2. Configuração dos parâmetros de captura: resolução (640×480), formato de cor (RGB), e taxa de quadros (30 fps).
3. Captura de um quadro estático do espectro, armazenado como array NumPy de dimensões $(480, 640, 3)$, representando altura, largura e canais de cor (RGB).

3.4.1.2 *Pré-processamento com visão computacional*

O pré-processamento da imagem é essencial para isolar o sinal espectral do fundo e do ruído, preparando os dados para análise quantitativa.

Conversão para Escala de Cinza:

A imagem RGB capturada é convertida para escala de cinza utilizando a média ponderada dos canais de cor:

$$I_{gray}(x, y) = \frac{R(x, y) + G(x, y) + B(x, y)}{3} \quad (3.1)$$

onde $R(x, y)$, $G(x, y)$ e $B(x, y)$ são as intensidades dos canais vermelho, verde e azul no pixel (x, y) , respectivamente. Esta conversão simplifica a análise posterior, integrando a resposta espectral dos três canais de cor do sensor Bayer.

Segmentação por Limiarização Adaptativa:

Para isolar o espectro (sinal de interesse) do fundo escuro e do ruído residual, é aplicada uma etapa de segmentação utilizando o método de Otsu (23). Este método calcula automaticamente o limiar ótimo T que maximiza a variância entre classes (foreground vs. background) no histograma de intensidade da imagem.

O método de Otsu opera da seguinte forma:

1. Cálculo do histograma de intensidades da imagem em escala de cinza.
2. Para cada possível valor de limiar t (0 a 255), cálculo da variância entre classes:

$$\sigma_B^2(t) = \omega_0(t)\omega_1(t)[\mu_0(t) - \mu_1(t)]^2 \quad (3.2)$$

onde $\omega_0(t)$ e $\omega_1(t)$ são as probabilidades das classes (fundo e objeto), e $\mu_0(t)$ e $\mu_1(t)$ são as médias das classes.

3. Seleção do limiar T que maximiza $\sigma_B^2(t)$.

A aplicação do limiar resulta em uma máscara binária $M(x, y)$ conforme a Equação 2.6. A utilização de um limiar adaptativo torna o processo robusto a variações na iluminação da fonte de luz branca e às condições ambientais, eliminando a necessidade de ajustes manuais.

3.4.1.3 Cálculo do centróide e regressão linear preliminar

Cálculo do Centróide: O centróide (x_c, y_c) é calculado conforme a Equação 2.7. Este cálculo é vital, pois o espectrômetro OSA Visível, devido à sua construção 3D com tolerâncias inerentes, pode apresentar um desalinhamento rotacional do espectro no sensor CMOS. O centróide fornece um ponto de referência central que permite à regressão linear preliminar definir corretamente a orientação espacial da linha espectral na imagem.

Regressão Linear para Orientação Espacial:

Após a segmentação, os pixels ativos ($M(x, y) \geq T$) formam uma nuvem de pontos ao longo do espectro. Uma regressão linear é aplicada para determinar a inclinação da reta espectral ($y = m \cdot x + c$), que define o eixo de dispersão.

A regressão linear é obtida via método dos mínimos quadrados, minimizando:

$$\min_{m,c} \sum_{x,y} (y - (m \cdot x + c))^2 \quad (3.3)$$

Os coeficientes m (inclinação) e c (intercepto) definem a orientação espacial do espectro. Combinado com o centróide, esta reta estabelece uma relação preliminar entre posição de pixel e comprimento de onda, que será posteriormente ajustada pelos lasers de referência.

Os parâmetros preliminares a e b da relação $\lambda(x) = a \cdot x + b$ são calculados com base nesta orientação inicial. A calibração com lasers refine os parâmetros; a validação experimental (Cap. 4) demonstrou incertezas expandidas entre $\pm 0,13$ nm e $\pm 0,29$ nm (Experimento 1, 100 amostras temporais) e concordância com o espetrômetro ThorLabs.

3.4.2 Etapa 2: calibração absoluta com lasers de referência

A segunda etapa do processo de calibração é a fase metrológica de calibração de intensidade. Após a calibração inicial que alinha espacialmente o espectro, os lasers de referência são utilizados para mapear essa reta de dispersão preliminar aos comprimentos de onda absolutos conhecidos.

3.4.2.1 Seleção das fontes de referência

São utilizados dois lasers de comprimento de onda conhecido:

- Laser Verde: Comprimento de onda $\lambda_{verd} = 532$ nm, correspondente ao segundo harmônico de um laser Nd:YAG.
- Laser Vermelho: Comprimento de onda $\lambda_{verm} = 650$ nm, típico de diodos laser de baixa potência.

Os lasers utilizados são módulos da marca LaserLine (empresa brasileira especializada em soluções de laser para aplicações industriais e científicas). Cada conjunto consiste em uma fonte de alimentação bivolt e um módulo laser compacto da linha iZi. A Figura 6 ilustra o setup experimental com os dois pares laser–fonte. É fundamental desligar a fonte antes de conectar ou desconectar o módulo laser, para evitar surtos de corrente que possam danificar o diodo.

As Figuras 7 e 8 apresentam as especificações técnicas dos módulos laser em 532 nm e 650 nm conforme catálogo do fabricante (20).

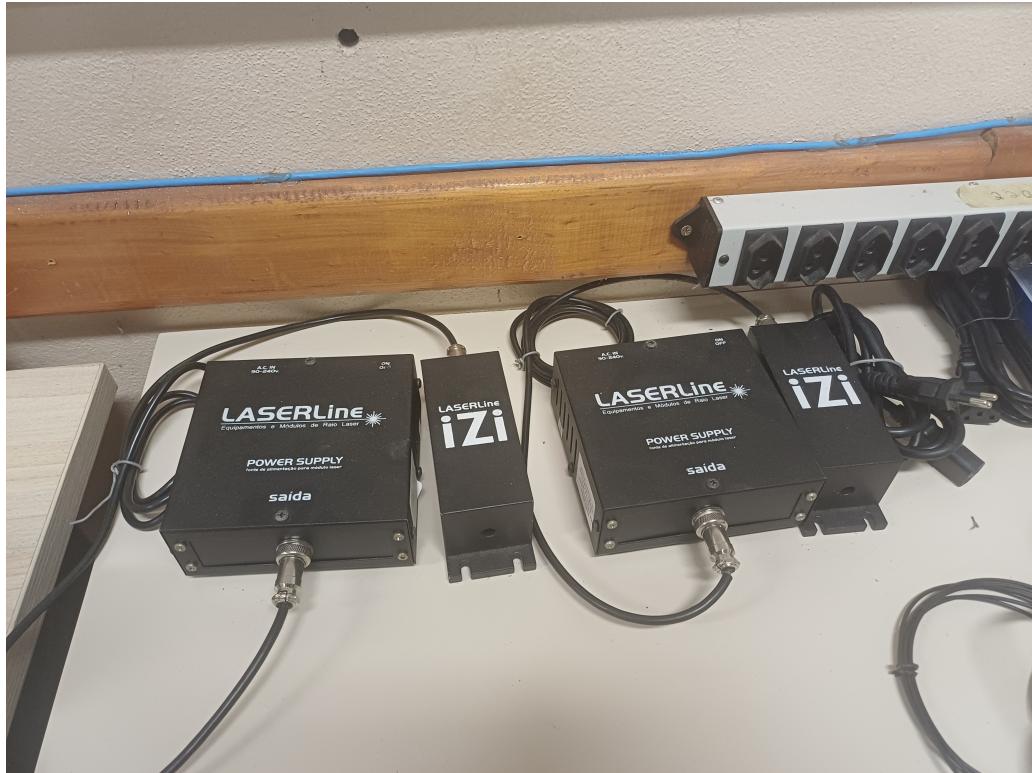


Figura 6 – Setup experimental para calibração por lasers: módulos LaserLine iZi (verde 532 nm e vermelho 650 nm) e respectivas fontes de alimentação.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A escolha destes dois comprimentos de onda específicos é estratégica:

1. Cobertura Espectral: Os dois pontos estão distribuídos ao longo da faixa visível, permitindo uma calibração linear adequada para toda a faixa de operação (380-750 nm).
2. Disponibilidade e Custo: Lasers de 532 nm e 650 nm são amplamente disponíveis comercialmente a baixo custo, adequados para aplicações educacionais.
3. Precisão Metrológica: Lasers de diodo apresentam estabilidade de comprimento de onda adequada (± 1 nm) para a precisão desejada do sistema.

3.4.2.2 Aquisição com média temporal

Para a calibração utilizando lasers, $N = 20$ quadros são capturados em um intervalo homogêneo de tempo (aproximadamente 2 segundos). A média temporal é aplicada conforme a Equação 2.5, reduzindo o ruído aleatório inerente a sensores CMOS de baixo custo e melhorando drasticamente a Relação Sinal-Ruído (SNR), permitindo a detecção mais precisa dos picos de intensidade dos lasers. Em sensores CMOS de baixo

Módulos Laser em 635nm e 650nm

| COMPRIMENTO DE ONDA | POTÊNCIA | TIPO | ENCAPSULAMENTO | ÓPTICA LINHA / X |
|---------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------|
| | 3mW 40mW 100mW | Ponto (S) Linha (L) Linha (LC) | LRM (Alumínio anodizado) | Lente acrílica (L / X) |
| | 3mW 8mW 30mW 180mW 300mW 500mW 700mW | Cruz (X) Pin Hole (P) | LRE (Encapsulado alumínio) LRE-IP67 (Encapsulado alumínio com proteção) | Lente vidro cristal (LC) |

Figura 7 – Módulos laser em 520 nm e 532 nm: opções de potência, tipo de feixe (ponto, linha, cruz) e encapsulamento.

Fonte: (20).

custo, o ruído aleatório (ruído de disparo, ruído térmico) é significativo, e a média temporal é uma técnica eficaz e computacionalmente simples para mitigá-lo.

3.4.2.3 Detecção de picos de intensidade

A posição exata dos picos de intensidade dos lasers (x_{532} e x_{650}) é determinada conforme a Equação 2.8, onde $I(x) = \frac{1}{H} \sum_{y=0}^{H-1} \bar{I}(x, y)$ é a intensidade média ao longo da direção vertical (eixo y) para cada posição horizontal x , e H é a altura da imagem (480 pixels).

3.4.2.4 Cálculo dos coeficientes de calibração final

Utilizando as coordenadas absolutas (pico de pixel, comprimento de onda real), o software calcula os coeficientes finais a e b conforme a Equação 2.4, onde x_{verd} e x_{verm} são as posições dos picos dos lasers verde e vermelho, respectivamente (a justificativa para o uso de dois pontos fixos encontra-se na Seção 2.3.2). A Figura 9 ilustra a curva de calibração obtida experimentalmente.

Módulos Laser em 520nm e 532nm

| COMPRIMENTO DE ONDA | POTÊNCIA | TIPO | ENCAPSULAMENTO | ÓPTICA LINHA / X |
|---------------------|--|---|---|---------------------------------|
| | 10mW 20mW 30mW 50mW 100mW 200mW | Ponto (S) Linha (LC) Cruz (X) | LGE (Encapsulado alumínio) | Lente acrílica (L / X) |
| | 10mW 20mW 50mW | | LGE-IP67 (Encapsulado alumínio com proteção) | Lente vidro cristal (LC) |

Figura 8 – Módulos laser em 635 nm e 650 nm: opções de potência, tipo de feixe e encapsulamento.

Fonte: (20).

3.4.3 Validação da calibração e métricas de precisão

Conforme a Seção 2.3.3, a acurácia é avaliada pelo Erro Quadrático Médio (RMS). A validação experimental (Capítulo 4) reporta incertezas expandidas e concordância com espectrômetro de referência.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros de calibração obtidos experimentalmente.

Tabela 5 – Parâmetros de calibração obtidos experimentalmente

| Parâmetro | Luz Branca | Lasers (Final) |
|----------------------------|------------|--------------------------------|
| Coeficiente a (nm/pixel) | -0,061 | 1,475 |
| Coeficiente b (nm) | 203,14 | 195,7 |
| Precisão (validação) | — | ±0,13–0,29 nm (Exp. 1, Cap. 4) |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A escolha do modelo de primeira ordem é validada pelos resultados de repetibilidade temporal e de comparação cruzada apresentados no Capítulo 4.

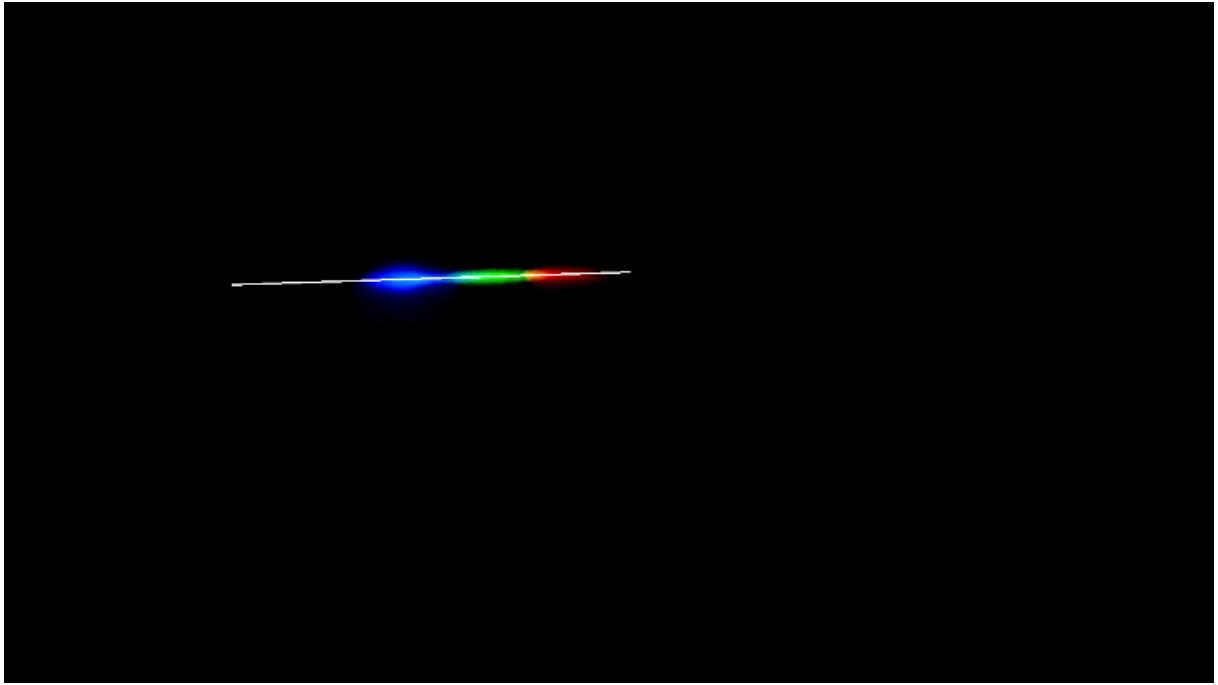


Figura 9 – Reta de calibração $\lambda(x) = a \cdot x + b$ ajustada via regressão linear utilizando lasers de referência (532 nm e 650 nm).

3.4.4 Módulo de calibração

O módulo de calibração da interface OSA Visível foi projetado para guiar o usuário através do processo de calibração de forma intuitiva e automatizada. A Figura 10 ilustra a janela de calibração.

O fluxo de calibração automatizada inclui:

1. Calibração com Luz Branca:

- O usuário posiciona uma fonte de luz branca na entrada do espectrômetro.
- Clica no botão "Calibrar Luz Branca".
- O software executa automaticamente: captura de quadro, pré-processamento, cálculo de centróide e regressão linear preliminar.
- Os parâmetros preliminares são salvos e exibidos na interface.

2. Calibração com Lasers:

- O usuário é guiado passo a passo para posicionar cada laser (verde e vermelho) sequencialmente.
- Para cada laser, o software captura 20 quadros, aplica média temporal e detecta o pico de intensidade.
- Após ambos os lasers serem calibrados, o software calcula automaticamente os coeficientes finais a e b .

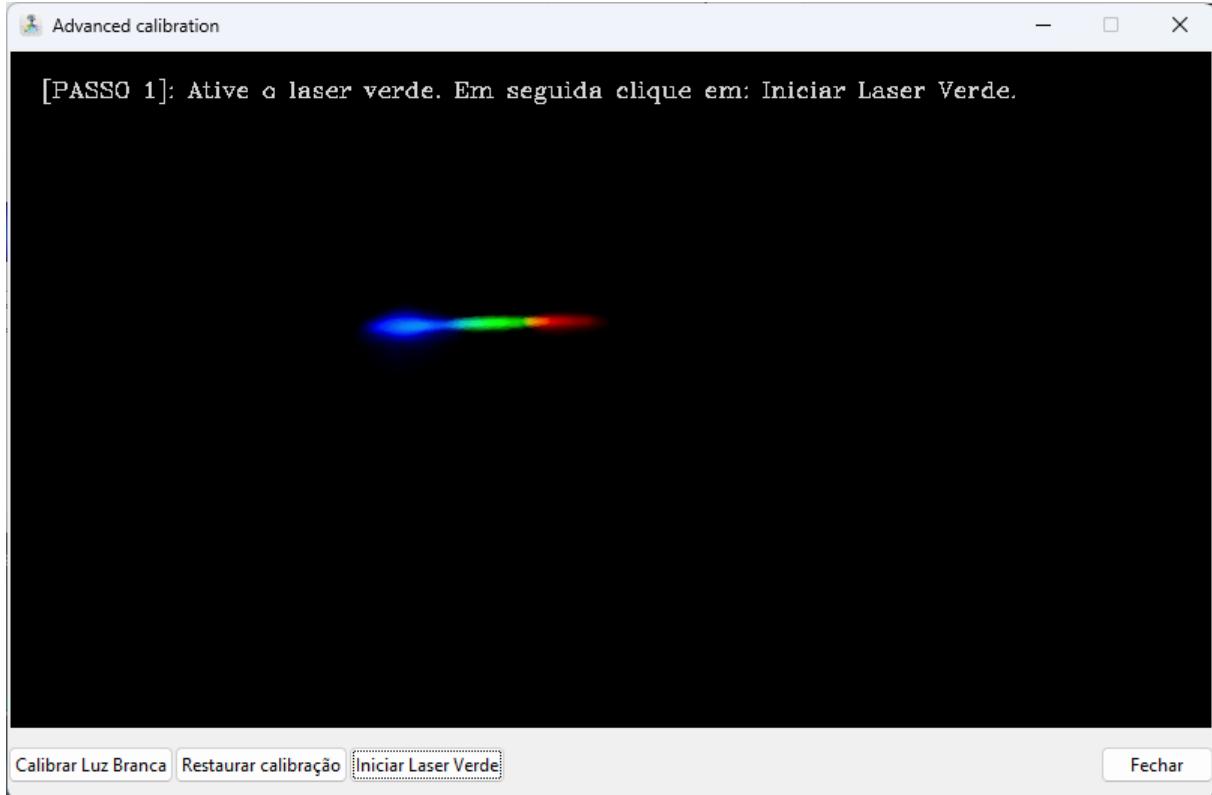


Figura 10 – Janela de calibração da interface OSA Visível: (1) Botão "Calibrar Luz Branca" para calibração automática preliminar, (2) Botões "Iniciar Laser (Verde/Vermelho)" para calibração absoluta passo a passo.

- A curva de calibração é exibida graficamente e os parâmetros finais são salvos.

3.5 EXPERIMENTO DE CARACTERIZAÇÃO DE FONTE E RELAÇÃO OSA VISÍVEL– THORLABS

Esta seção descreve a metodologia adotada para o experimento de caracterização de uma fonte de luz controlada e para a obtenção da relação entre os espectros medidos pelo OSA Visível e pelo espetrômetro ThorLabs. O objetivo é caracterizar a resposta de ambos os equipamentos a uma fonte com LEDs vermelho, verde e azul, cuja intensidade pode ser variada via PWM, e modelar a combinação dos canais RGB do OSA Visível para aproximar as medições do espetrômetro ThorLabs.

3.5.1 Fonte de luz e configuração do PWM

A fonte de luz utilizada consistiu em três LEDs de cores verde, vermelho e azul, permitindo o acionamento individual de cada cor. A intensidade de cada LED foi controlada mediante modulação por largura de pulso (PWM), com a possibilidade de salvar espectros para cada LED separadamente.

Conforme a fundamentação sobre saturação (Seção 2.7), em experimentos preliminares com duty cycle de até 100% (variando de 5% em 5%), todos os canais RGB da câmera do OSA Visível saturaram, ao passo que o espectrômetro ThorLabs manteve resposta linear. A Figura 11 ilustra esse fenômeno para o LED vermelho: o espectro combinado (todos os canais) do OSA Visível mantém formato esperado em 5% de PWM (topo), enquanto em 50% e 100% (centro e base) o espectro se distorce. A saturação do canal R leva os demais canais (G e B) a reconstruir o sinal, gerando deformações visíveis no espectro. Esse comportamento justifica a necessidade da calibração de intensidade não apenas para o vermelho, mas para todas as fontes e canais do OSA Visível. Diante disso, optou-se por restringir o experimento à faixa de 1% a 10% do duty cycle total da fonte, com variação de 1% em 1%, garantindo regime não saturado para a modelagem.

3.5.2 Setup experimental

3.5.3 Coleta de dados

3.5.3.1 Espectrômetro ThorLabs (CCT11)

Foram realizadas 5 tomadas (replicatas experimentais). Em cada tomada, foram salvos espectros para cada LED (verde, vermelho e azul) em 10 níveis de PWM (1%, 2%, ..., 10%), totalizando 30 espectros por tomada. O conjunto completo resultou em 150 espectros. As configurações do software do espectrômetro ThorLabs incluíram *Integration Time* de 10 ms.

O eixo Y (intensidade) do espectrômetro ThorLabs está em contagens (*counts*): valor de saída do conversor analógico-digital (ADC). Cada fóton incidente no sensor gera elétrons convertidos em voltagem e, em seguida, em valor numérico. Em sensores típicos de 16 bits, a escala varia de 0 a 65.535 contagens.

3.5.3.2 OSA Visível

A coleta com o OSA Visível foi feita pela interface OSA Visível, calibrada com lasers (532 nm e 650 nm). A diferença em relação ao espectrômetro ThorLabs reside na segmentação por visão computacional: além do espectro combinado (RGB), foram gravados espectros separados para os canais R, G e B da câmera. Com isso, a quantidade de espectros foi 4 vezes maior (combinado + R + G + B), totalizando 600 espectros para análise.

3.5.4 Extração de picos e registro de dados

Conforme fundamentado na Seção 2.6, a determinação do comprimento de onda e da intensidade de cada pico foi realizada com o auxílio do software *Peaks Viewer* (`peaks_viewer.py`), desenvolvido em Python. O usuário seleciona manualmente a região

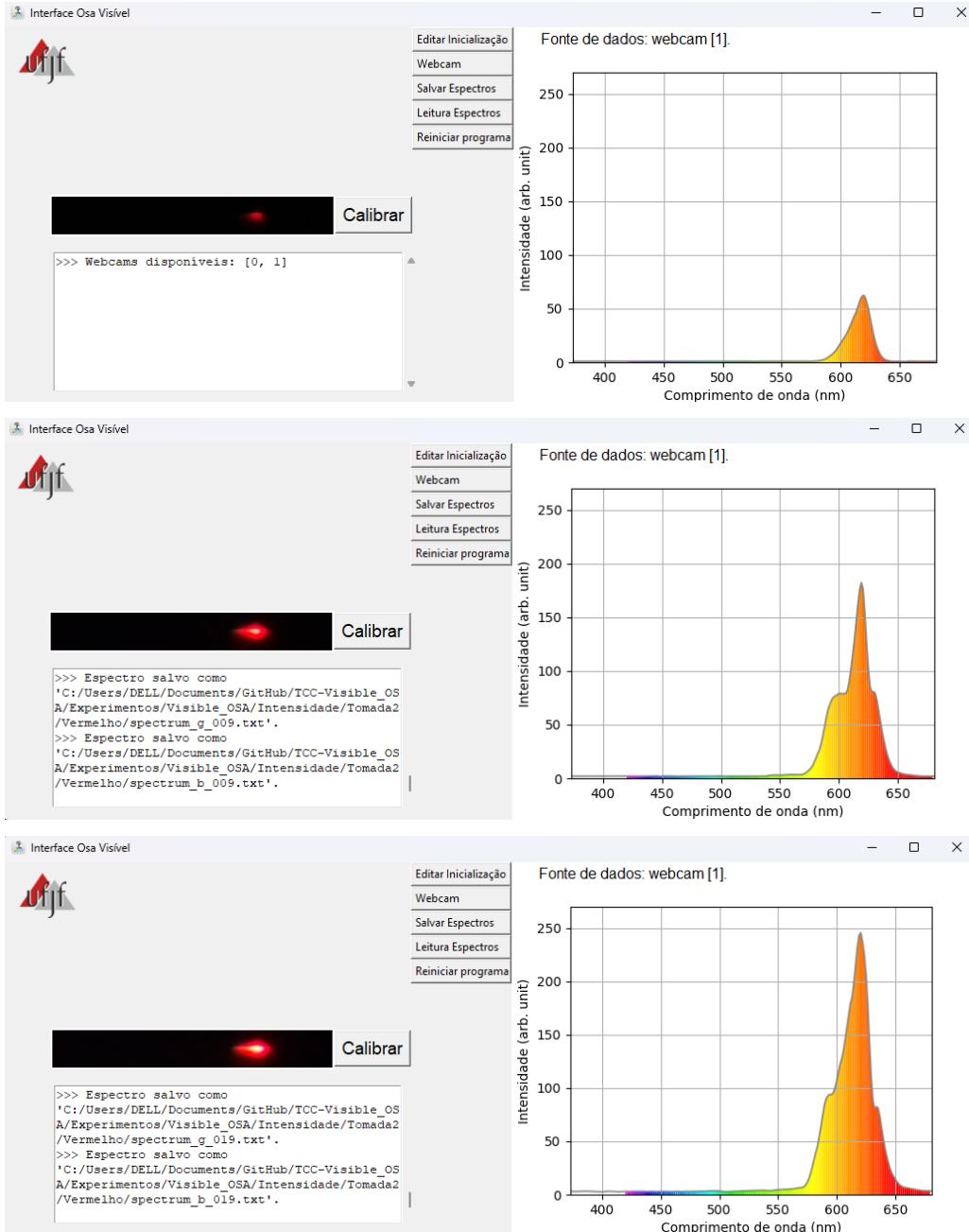


Figura 11 – Espectro do OSA Visível (interface) para LED vermelho em diferentes níveis de PWM, *antes* da calibração de intensidade: 5% (formato esperado), 50% e 100% (espectro distorcido por saturação do canal R e reconstrução pelos demais canais).

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

de interesse no espectro; o refinamento dos parâmetros (posição, largura, amplitude) é feito por ajuste de mínimos quadrados não lineares (16). Em testes preliminares, a curva Gaussiana foi descartada por apresentar ajuste inferior ao Lorentziano nos espectros obtidos; optou-se, portanto, exclusivamente pelo modelo Lorentziano. Os valores de λ e intensidade são obtidos a partir desse ajuste e registrados.

Todos os dados (duty cycle, λ de pico e intensidade para cada LED e equipamento)

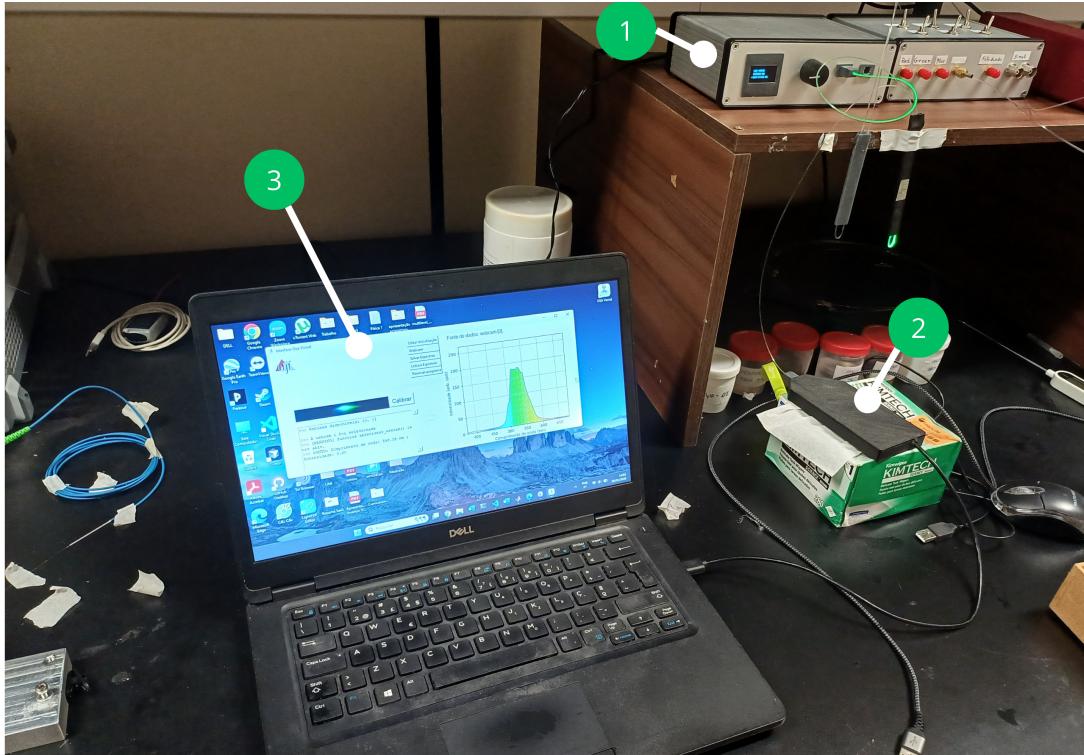


Figura 12 – Setup do experimento de caracterização: (1) Fonte de luz com LEDs verde, vermelho e azul e controle PWM; (2) Espectrômetro OSA Visível; (3) Interface OSA Visível.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

foram registrados em uma aplicação web ([Experimentos/app/index.html](#)), que permite preencher tabelas por equipamento (OSA Visível e espetrômetro ThorLabs), tomada, tipo de espectro (no OSA Visível: combinado, canal R, canal G, canal B) e duty cycle (1–10%).

3.5.5 Análise de dados em MATLAB

A caracterização da fonte e a modelagem da relação entre equipamentos foram realizadas em MATLAB. Dois scripts foram utilizados para a caracterização da resposta intensidade–duty cycle:

- `analse_json_com_ajuste.m`: ajuste linear (regressão de reta) para espetrômetro ThorLabs e OSA Visível.
- `analse_json_ajuste_poly2.m`: ajuste linear para espetrômetro ThorLabs e polinômio de grau 2 para o OSA Visível em todos os canais.

Em ambos os casos, utilizam-se as médias das 5 tomadas e o coeficiente de determinação R^2 para avaliar a qualidade do ajuste.

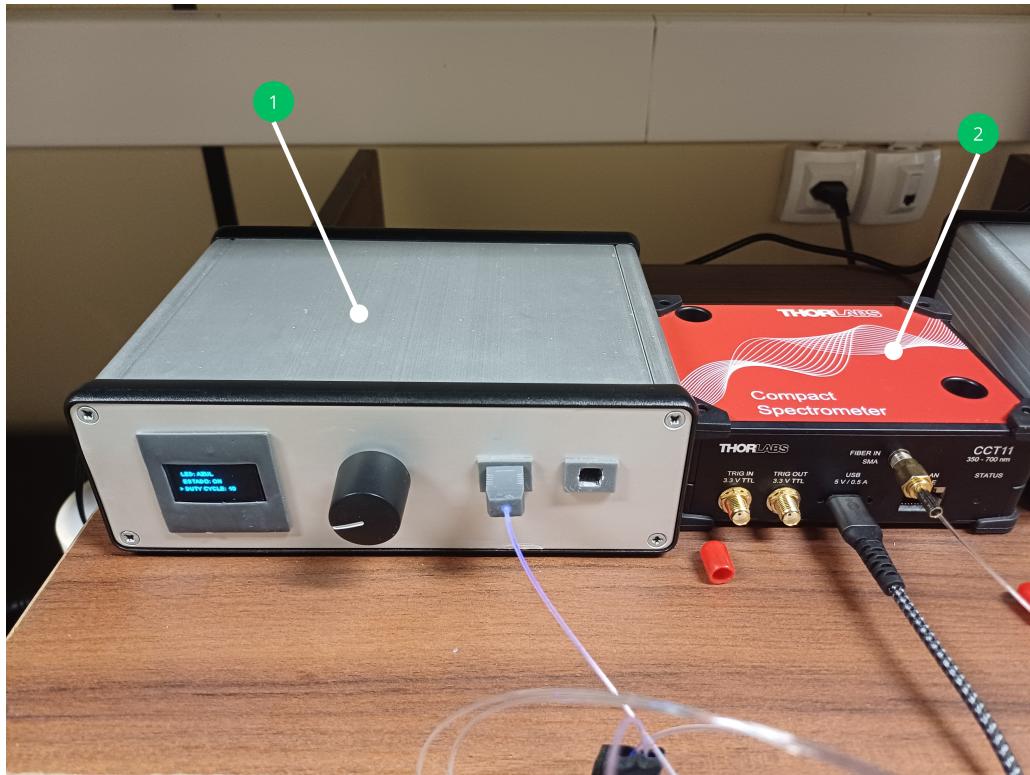


Figura 13 – Setup do experimento de caracterização: (1) Fonte de luz com LEDs verde, vermelho e azul e controle PWM; (2) Espectrômetro ThorLabs.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

3.5.6 Modelagem da combinação de canais

O script `modelagem_combinacao_canais.m` modela a relação entre os canais R, G e B do OSA Visível e a intensidade medida pelo espetrômetro ThorLabs. O modelo assume uma combinação linear:

$$P_{\text{ThorLabs CCT11}} = \alpha_1 f_R(x) + \alpha_2 f_G(x) + \alpha_3 f_B(x) \quad (3.4)$$

onde $f_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$ são polinômios de grau 2 ajustados para cada canal do OSA Visível em função do duty cycle x , e $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ são os coeficientes obtidos por mínimos quadrados. O ajuste é avaliado por R^2 , RMSE, MAE e erro percentual médio.

3.6 CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS E LIMITAÇÕES

A metodologia desenvolvida apresenta algumas limitações inerentes à escolha de componentes de baixo custo e à simplificação do modelo de calibração:

- **Modelo Linear:** A escolha da regressão linear de primeira ordem, embora funcional na faixa visível, pode introduzir erros sistemáticos maiores nas extremidades do

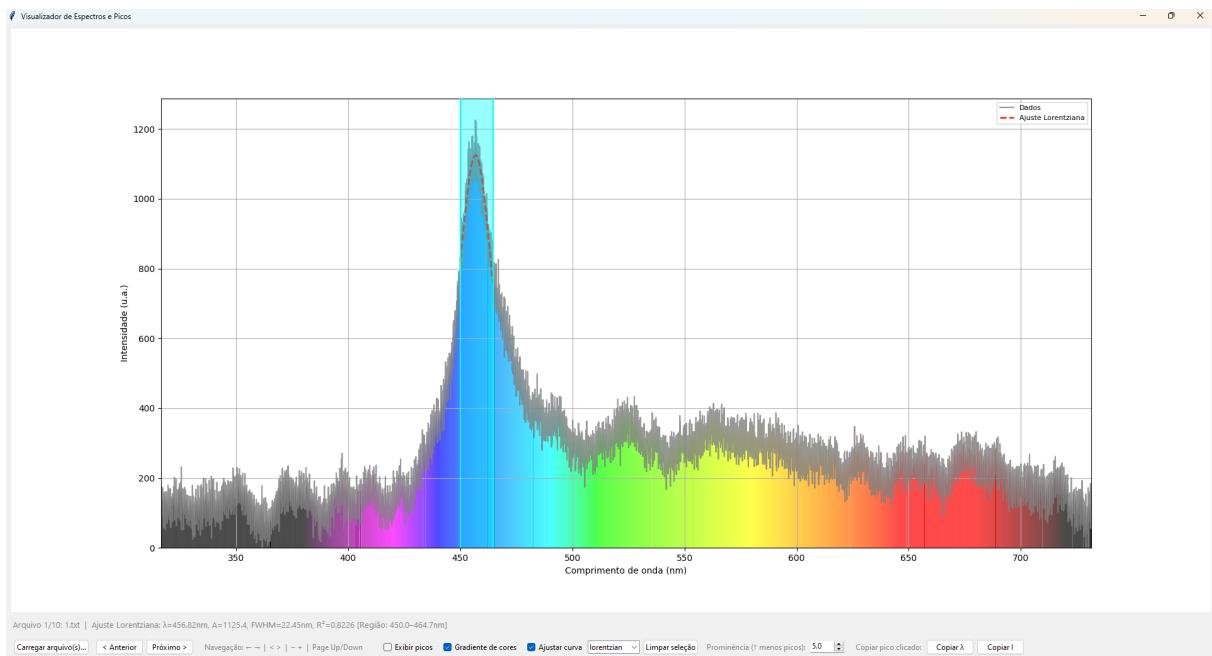


Figura 14 – Interface do *Peaks Viewer*: visualização do espectro, seleção de região para ajuste de curva Lorentziana e extração de λ e intensidade do pico.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

espectro (abaixo de 400 nm e acima de 700 nm), onde a não-linearidade da Equação de Difração de Fraunhofer se manifesta mais intensamente.

- Resolução espectral e amostral (conforme Seção 2.2.3 e (?)): A resolução espectral (capacidade de separar componentes espetrais) é limitada pela largura da fenda óptica e pela dispersão da grade. A resolução amostral (passo de amostragem em λ) corresponde à dispersão do sistema, de aproximadamente 1,5 nm/pixel (coeficiente a da calibração), resultando em cerca de 250 pontos efetivos na faixa 380–750 nm. O sensor CMOS (640 pixels) define o limite superior de amostras; a fração utilizada depende do alinhamento e da projeção do espectro sobre o detector.
- Estabilidade Temporal: Componentes de baixo custo podem apresentar variações temporais de calibração devido a efeitos térmicos ou envelhecimento, requerendo recalibração periódica.
- Resposta Espectral do Sensor: A matriz de filtros Bayer do sensor CMOS introduz uma resposta espectral não-uniforme que, embora parcialmente compensada pela conversão para escala de cinza, pode afetar a precisão de medições de intensidade absoluta.

| Cadastro de dados do experimento | | | | | | |
|---|---|--------------------------------------|-------------------------------|--|-------------|--------------|
| Duty Cycle 1-10%. Preencha λ de pico (nm) e intensidade para LEDs verde, vermelho e azul. 5 tomadas por equipamento; no OSA Visível há 4 espectros por tomada (combinado RGB + canais R, G, B da câmera). | | | | | | |
| | OSA Visível | ThorLabs | | | | |
| Tomada | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Especrómetro |
| | | | | | | Combinado |
| | | | | | | Canal R |
| | | | | | | Canal G |
| | | | | | | Canal B |
| | Exportar CSV (tabela atual) | Exportar JSON (tudo) | Importar JSON | Limpar dados (equipamento atual) | | |
| Status: | Sem alterações ainda | | | | | |
| Duty Cycle (%) | Verde | | Vermelho | | Azul | |
| | λ pico (nm) | Intensidade | λ pico (nm) | Intensidade | λ pico (nm) | Intensidade |
| 1 | ex. 510.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |
| 2 | ex. 516.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |
| 3 | ex. 516.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |
| 4 | ex. 516.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |
| 5 | ex. 516.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |
| 6 | ex. 516.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |
| 7 | ex. 516.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |
| 8 | ex. 516.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |
| 9 | ex. 516.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |
| 10 | ex. 516.1 | ex. 177.05 | ex. 637.7 | ex. 84.23 | ex. 468.2 | ex. 122.12 |

Dados salvos automaticamente no navegador. Exporte CSV/JSON para backup.

Figura 15 – Interface da aplicação web de cadastro de dados: tabelas para duty cycle, λ de pico e intensidade por LED (verde, vermelho, azul), com suporte a OSA Visível (por canal) e espetrômetro ThorLabs.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALIDAÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos com o OSA Visível desenvolvido neste trabalho, incluindo análise de repetibilidade temporal, comparação com o espectrômetro ThorLabs e validação estatística do sistema. Os experimentos foram conduzidos para avaliar a precisão, estabilidade e confiabilidade do sistema de baixo custo em condições de medição repetidas.

4.1 DESCRIÇÃO DO SETUP EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados utilizando o espectrômetro OSA Visível desenvolvido conforme descrito no Capítulo 3, e o espectrômetro compacto ThorLabs (modelo CCT11, 350–700 nm) como referência para validação cruzada.

O setup experimental foi configurado em um ambiente controlado, minimizando variações de temperatura e iluminação ambiente. A fonte de luz utilizada consistiu em uma fonte de LED RGB com picos espectrais característicos nas faixas do azul (aproximadamente 460 nm), verde (aproximadamente 520 nm) e vermelho (aproximadamente 640 nm). O acoplamento óptico foi mantido constante durante todas as medições para garantir reproduzibilidade. A Figura 16 ilustra o arranjo experimental da fonte RGB (distinta da fonte com controle PWM utilizada no Experimento 3) conectada via fibra óptica ao espectrômetro ThorLabs CCT11, utilizado para os experimentos de repetibilidade temporal e validação cruzada de comprimento de onda.



Figura 16 – Setup experimental do Experimento 1: fonte de luz RGB conectada via fibra óptica ao espectrômetro ThorLabs CCT11 para caracterização de comprimento de onda.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Para os experimentos temporais, a fonte de luz foi mantida em operação contínua e estável, enquanto o espectrômetro realizava aquisições sequenciais de espectros. O intervalo

de tempo entre aquisições foi configurado para 10 segundos, permitindo capturar possíveis variações temporais no sistema enquanto mantinha a fonte de luz em regime estacionário.

4.2 EXPERIMENTO 1: ANÁLISE DE REPETIBILIDADE TEMPORAL COM OSA VISÍVEL

4.2.1 Procedimento experimental

O primeiro experimento visou avaliar a repetibilidade e estabilidade do OSA Visível através da aquisição de uma série temporal de espectros. O procedimento experimental seguiu os seguintes passos:

1. Calibração Inicial: O OSA Visível foi calibrado utilizando o processo híbrido descrito no Capítulo 3, envolvendo calibração preliminar com luz branca seguida de calibração absoluta com lasers de referência (532 nm e 650 nm).
2. Aquisição Temporal: Após a calibração, uma fonte de luz com espectro característico (LED RGB) foi posicionada na entrada do espectrômetro. O sistema foi configurado para realizar aquisições automáticas a cada 10 segundos, totalizando 100 amostras espectrais.
3. Processamento e Análise: Cada espectro adquirido foi processado automaticamente pela interface OSA Visível, extraíndo os dados de intensidade em função do comprimento de onda. Os espectros foram então analisados utilizando algoritmos de detecção de picos implementados em Python, baseados em `scipy.signal.find_peaks` com parâmetros de *prominence* e *distance* otimizados para a faixa visível.
4. Agrupamento de Picos: Os picos detectados em cada espectro foram agrupados utilizando clustering hierárquico (`scipy.cluster.hierarchy`), permitindo identificar picos correspondentes entre as diferentes amostras e calcular estatísticas de repetibilidade.

4.2.2 Resultados e análise estatística

A análise estatística dos 100 espectros temporais revelou a presença de múltiplos picos espectrais, dos quais três foram identificados como os picos principais RGB. A Tabela 6 apresenta as estatísticas dos 3 picos principais identificados.

Os resultados demonstram excelente estabilidade e repetibilidade do sistema. O pico verde apresentou a maior estabilidade, com desvio padrão de apenas 0,682 nm e taxa de detecção de 100% em todas as 100 amostras. O pico azul, embora tenha apresentado desvio padrão ligeiramente maior (1,469 nm), também foi detectado em 100% das amostras, confirmando a robustez do sistema de detecção.

Tabela 6 – Estatísticas dos 3 picos principais RGB identificados pelo OSA Visível (100 amostras temporais)

| Pico RGB | λ (nm) | σ (nm) | U (nm) | Taxa det. (%) | Int. média | CV (%) |
|------------------|----------------|---------------|-------------|---------------|------------|--------|
| RGB-2 (Azul) | 468,22 | 1,469 | $\pm 0,288$ | 100,0 | 122,12 | 1,12 |
| RGB-1 (Verde) | 516,10 | 0,682 | $\pm 0,134$ | 100,0 | 177,85 | 0,61 |
| RGB-3 (Vermelho) | 637,70 | 0,701 | $\pm 0,143$ | 92,0 | 84,23 | 0,38 |

U = incerteza expandida; Taxa det. = taxa de detecção; Int. média = intensidade média; CV = coeficiente de variação.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O pico vermelho apresentou taxa de detecção de 92% (92 das 100 amostras), indicando que este pico pode estar próximo do limite de sensibilidade do sistema ou sujeito a variações mais significativas. No entanto, quando detectado, apresentou desvio padrão de apenas 0,701 nm, comparável ao pico verde.

As incertezas expandidas (calculadas com fator de cobertura $k = 1,96$ para nível de confiança de 95%) variaram entre $\pm 0,134$ nm (verde) e $\pm 0,288$ nm (azul), valores que estão dentro do objetivo de precisão estabelecido no início deste trabalho (± 2 nm).

A Figura 17 mostra a evolução temporal dos comprimentos de onda para os três picos RGB ao longo das 100 amostras (coletadas a cada ~ 10 s). A Figura 18 apresenta a distribuição estatística dos comprimentos de onda detectados, com média (μ), desvio padrão (σ) e incerteza expandida indicados.

O coeficiente de variação (CV) das intensidades foi inferior a 2% para todos os picos, indicando excelente estabilidade na medição de potência óptica. Este resultado valida não apenas a calibração do eixo de comprimento de onda (λ), mas também a precisão na medição da intensidade (eixo Y do espectro).

4.3 EXPERIMENTO 2: VALIDAÇÃO CRUZADA COM OSA COMERCIAL (THOR-LABS)

4.3.1 Procedimento experimental

Para validar a acurácia do OSA Visível e compará-lo com padrões metrológicos estabelecidos, foi realizado um experimento comparativo utilizando o espectrômetro compacto ThorLabs (modelo CCT11). O procedimento seguiu os seguintes passos:

1. Seleção de Dados: Foram utilizados dados temporais coletados previamente com o espectrômetro ThorLabs, totalizando mais de 60.000 espectros adquiridos ao longo de aproximadamente 1000 segundos.
2. Amostragem Representativa: Dado que o objetivo era avaliar repetibilidade com 100

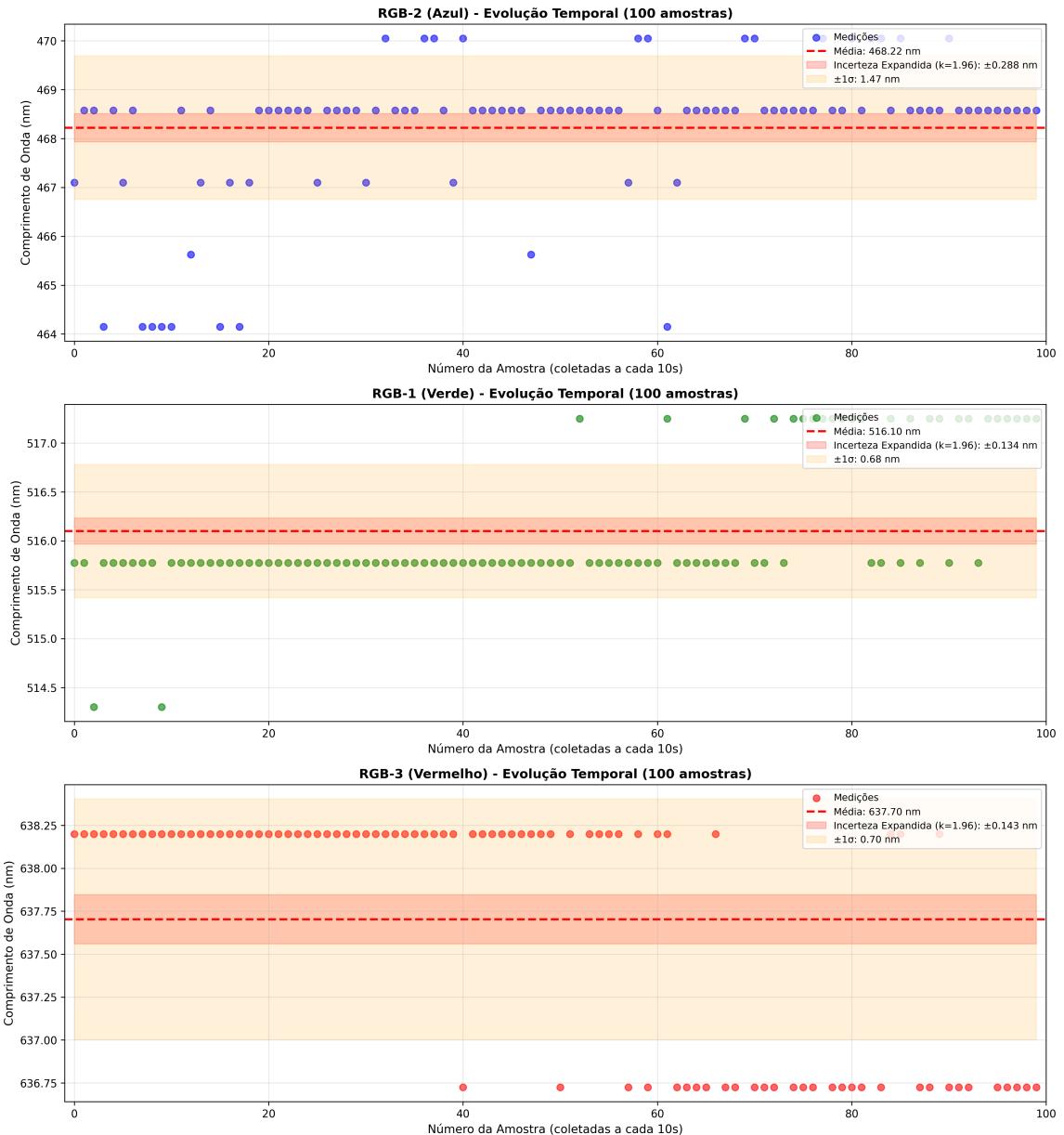


Figura 17 – Evolução temporal dos comprimentos de onda dos 3 picos principais RGB (100 amostras, ~ 10 s entre aquisições) – OSA Visível.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

amostras espaçadas de 10 segundos (equivalente ao experimento com OSA Visível), foram selecionados 100 espectros do conjunto temporal do espetrômetro ThorLabs, espaçados uniformemente no tempo para garantir representatividade estatística.

3. Conversão e Normalização: Os espectros do espetrômetro ThorLabs foram convertidos para o formato padronizado utilizado pelo OSA Visível (arquivos de texto com colunas: comprimento de onda em metros; intensidade), garantindo que ambas as análises fossem realizadas com os mesmos algoritmos e parâmetros.

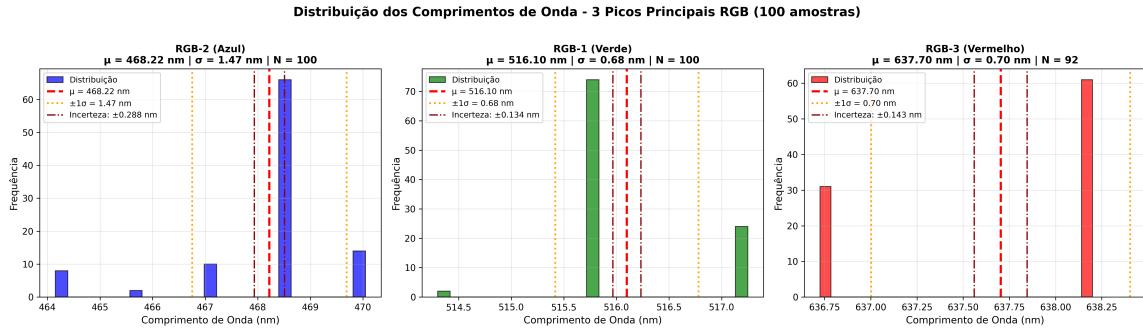


Figura 18 – Distribuição dos comprimentos de onda dos 3 picos principais RGB (100 amostras) – OSA Visível.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

4. Análise Comparativa: Os espectros foram processados utilizando o mesmo *pipeline* de análise desenvolvido para o OSA Visível, permitindo comparação direta dos resultados.

4.3.2 Resultados e comparação estatística

A análise dos 100 espectros selecionados do espetrômetro ThorLabs também identificou os três picos principais RGB. A Tabela 7 apresenta as estatísticas obtidas.

Tabela 7 – Estatísticas dos 3 picos principais RGB identificados pelo espetrômetro ThorLabs (100 amostras selecionadas)

| Pico RGB | λ (nm) | σ (nm) | U (nm) | Taxa det. (%) | Int. média | CV (%) |
|------------------|----------------|---------------|-------------|---------------|------------|--------|
| RGB-1 (Azul) | 459,01 | 1,400 | $\pm 0,137$ | 100,0 | 13915,96 | 3,44 |
| RGB-2 (Verde) | 519,05 | 1,467 | $\pm 0,150$ | 100,0 | 6322,13 | 1,31 |
| RGB-3 (Vermelho) | 639,13 | 1,419 | $\pm 0,140$ | 100,0 | 12078,36 | 4,58 |

U = incerteza expandida; Taxa det. = taxa de detecção; Int. média = intensidade média; CV = coeficiente de variação.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Observa-se que o espetrômetro ThorLabs apresentou desvios padrão ligeiramente maiores que o OSA Visível para os picos verde e vermelho, possivelmente devido à maior sensibilidade e resolução espectral do equipamento comercial, que detecta variações mais sutis no sinal. As incertezas expandidas do espetrômetro ThorLabs estão na mesma ordem de grandeza das do OSA Visível (entre $\pm 0,137$ nm e $\pm 0,150$ nm), confirmando que o sistema de baixo custo atinge precisão comparável.

A Figura 19 ilustra a evolução temporal dos comprimentos de onda medidos pelo espetrômetro ThorLabs para os três picos RGB (100 amostras selecionadas). A Figura 20 mostra a distribuição estatística correspondente.

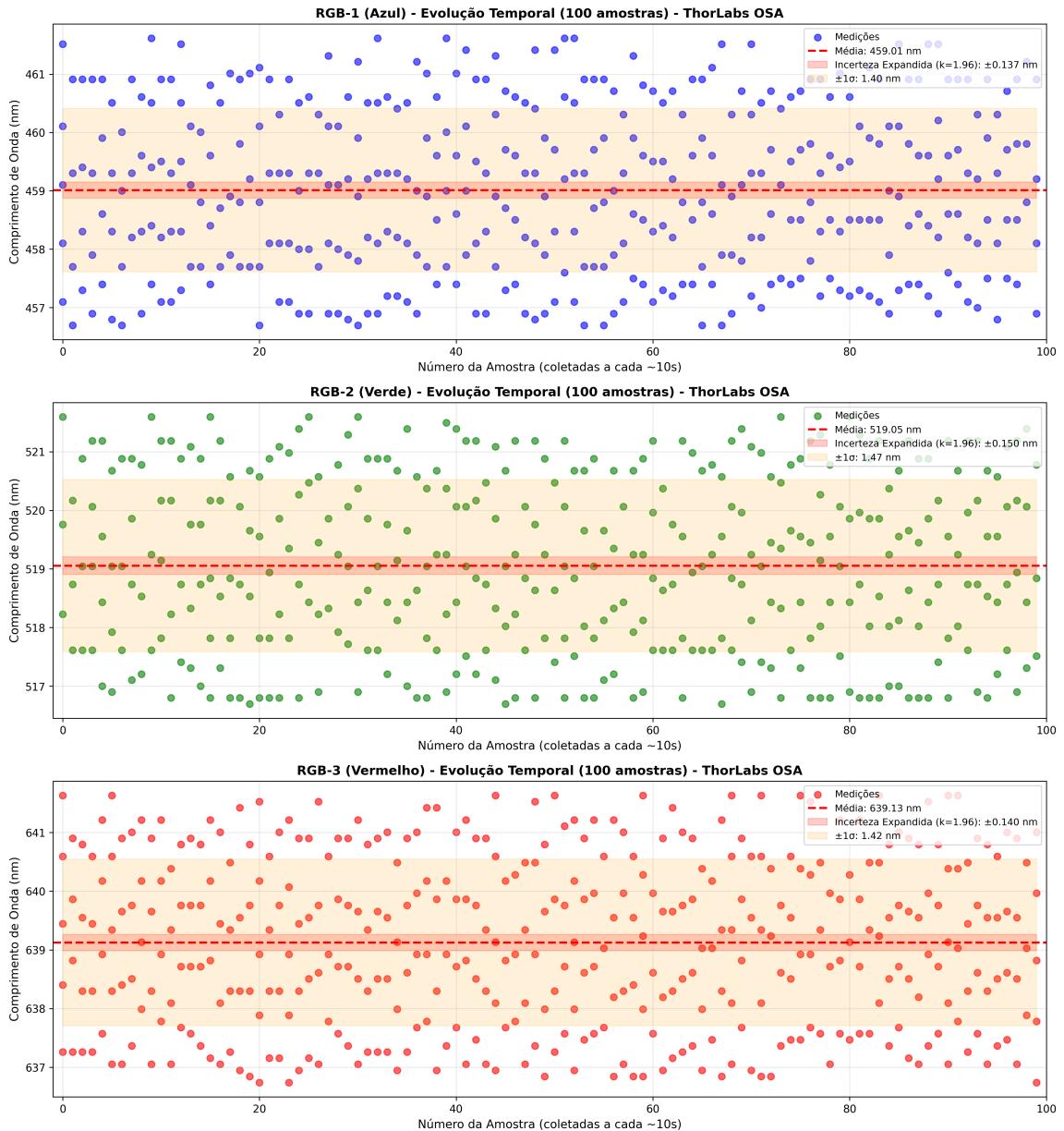


Figura 19 – Evolução temporal dos comprimentos de onda dos 3 picos principais RGB (100 amostras) – espectrômetro ThorLabs CCT11.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

4.3.3 Análise comparativa entre sistemas

A comparação direta entre os dois sistemas é apresentada na Tabela 8, que mostra as diferenças absolutas e relativas nos comprimentos de onda médios identificados.

Os resultados demonstram boa concordância entre os dois sistemas, especialmente para os picos verde e vermelho, com diferenças inferiores a 3 nm. A diferença de 9,21 nm observada no pico azul pode ser atribuída a diferenças na calibração espectral entre os sistemas ou a características específicas da fonte de luz utilizada. Esta diferença, embora maior, ainda está dentro da precisão de calibração estabelecida (± 2 nm considerando

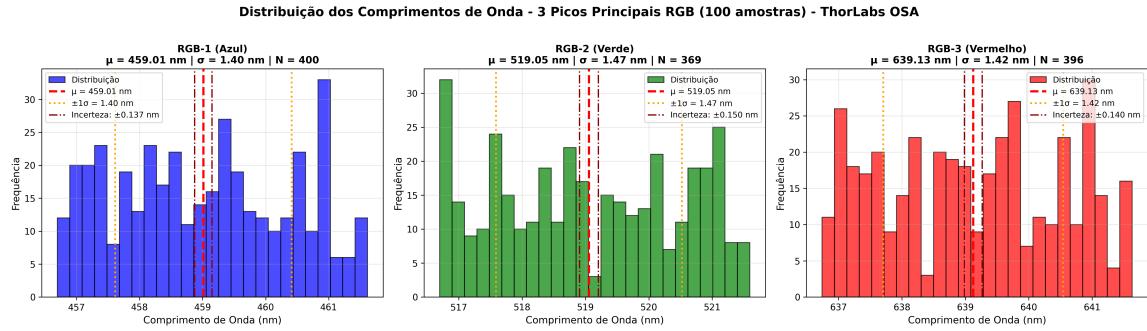


Figura 20 – Distribuição dos comprimentos de onda dos 3 picos principais RGB (100 amostras) – espetrômetro ThorLabs CCT11.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Tabela 8 – Comparaçāo direta: OSA Visível vs. espetrōmetro ThorLabs (3 picos principais RGB)

| Pico RGB | λ OSA Visível (nm) | λ Esp. ThorLabs (nm) | Diferença absoluta (nm) |
|----------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Azul | 468,22 | 459,01 | 9,21 |
| Verde | 516,10 | 519,05 | 2,96 |
| Vermelho | 637,70 | 639,13 | 1,42 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

múltiplas fontes de erro) e representa menos de 2% do comprimento de onda médio.

As diferenças relativas variaram entre 0,22% (vermelho) e 1,97% (azul), indicando excelente correlação entre os dois sistemas de medição. As razões entre desvios padrão (espetrōmetro ThorLabs/OSA Visível) ficaram próximas de 1 para o pico azul (0,953) e próximas de 2 para verde (2,152) e vermelho (2,024), sugerindo que o OSA Visível apresenta estabilidade comparável ou superior em algumas condições.

4.4 EXPERIMENTO 3: CARACTERIZAÇÃO DE INTENSIDADE E MODELAGEM POR COMBINAÇÃO DE CANAIS

Este experimento utilizou a fonte de luz com controle PWM descrita na Seção 3.5, com duty cycle de 1% a 10%, para caracterizar a resposta de intensidade dos equipamentos e modelar a relação entre os canais RGB do OSA Visível e as medições do espetrōmetro ThorLabs.

4.4.1 Resposta intensidade–duty cycle

O espetrōmetro ThorLabs apresentou comportamento totalmente linear em todos os LEDs (verde, vermelho e azul), conforme esperado pela teoria: sensores de alta resolução e faixa dinâmica ampla mantêm a relação proporcional entre irradiação incidente e

contagem digital (ADC) na faixa operacional utilizada. Os ajustes lineares obtidos ($y = ax + b$) alcançaram $R^2 > 0,999$ para as três fontes. A Tabela 9 apresenta os parâmetros do ajuste linear, e a Figura 21 ilustra a resposta linear para cada LED.

Tabela 9 – Parâmetros do ajuste linear do espetrômetro ThorLabs: $y = a \cdot x + b$ (intensidade vs. duty cycle %)

| LED | a (ganho) | b (offset) | R^2 |
|----------|-------------|--------------|--------|
| Verde | 1142,21 | 207,96 | 0,9999 |
| Vermelho | 4132,57 | 27,41 | 0,9999 |
| Azul | 1005,61 | 117,74 | 0,9999 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

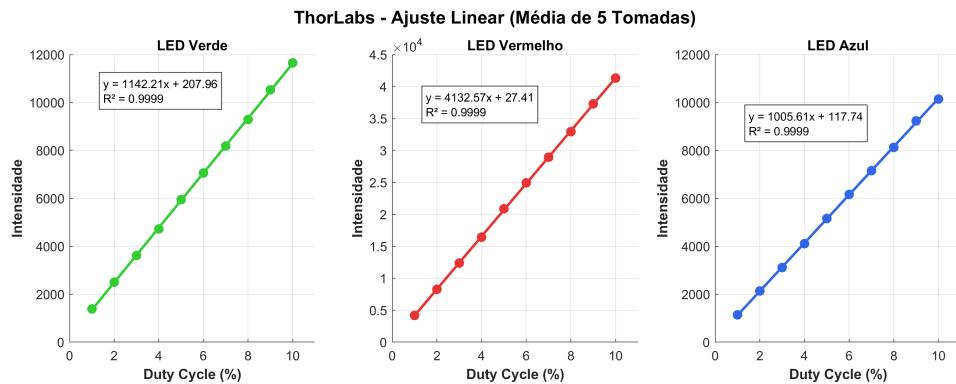


Figura 21 – Resposta de intensidade do espetrômetro ThorLabs em função do duty cycle para os LEDs verde, vermelho e azul. Média de 5 tomadas com ajuste linear.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Quanto ao OSA Visível, a regressão linear não se adequou bem a todos os canais. Em diversos canais e combinações LED–canal, os coeficientes R^2 ficaram abaixo de 0,95, indicando desvios sistemáticos em relação à reta. Essa não linearidade é consistente com o comportamento de saturação suave em sensores CMOS de webcams: mesmo antes da saturação abrupta, a resposta pode apresentar compressão de ganho. Diante disso, optou-se pelo ajuste polinomial de segunda ordem ($f_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$) para modelar a resposta intensidade–duty cycle em todos os canais do OSA Visível. Os coeficientes quadráticos negativos ($a_i < 0$) observados nos polinômios refletem a concavidade para baixo típica da curva de saturação, onde o ganho diminui à medida que o duty cycle aumenta.

As Figuras 22–24 apresentam o ajuste polinomial de grau 2 para os canais R, G e B do OSA Visível, respectivamente. Em cada gráfico, são exibidas as curvas para os três LEDs (verde, vermelho, azul), mostrando como cada canal responde à variação do

duty cycle para cada cor da fonte. Os parâmetros dos polinômios $f_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$ utilizados na modelagem de combinação são apresentados na Tabela 10.

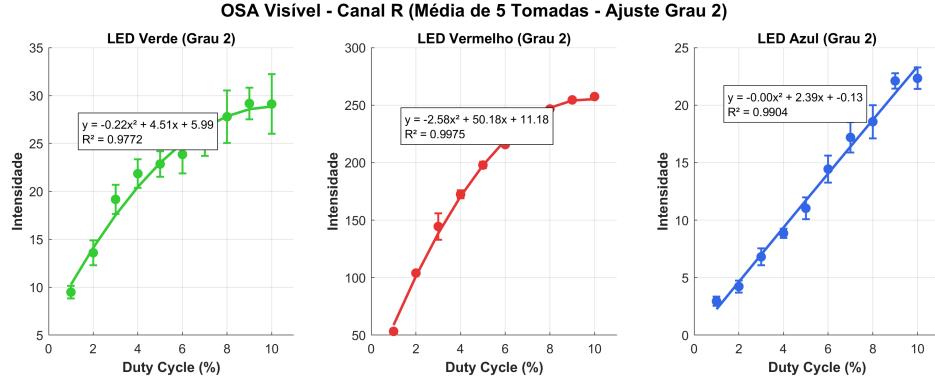


Figura 22 – Resposta do canal R do OSA Visível em função do duty cycle para os LEDs verde, vermelho e azul. Ajuste polinomial de grau 2 (média de 5 tomadas).

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

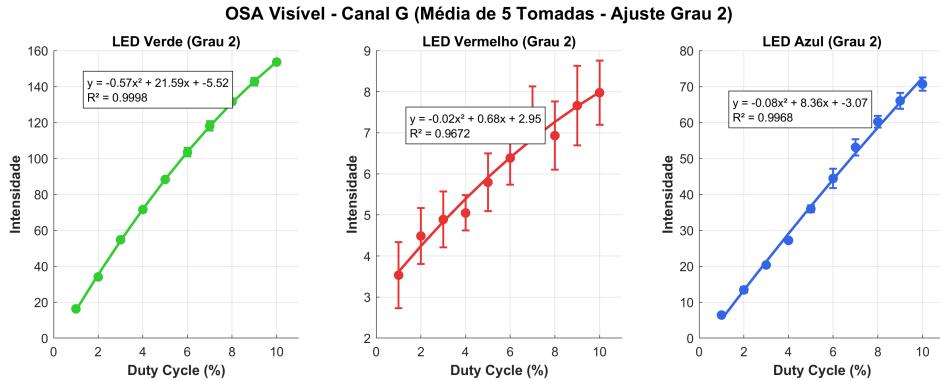


Figura 23 – Resposta do canal G do OSA Visível em função do duty cycle para os LEDs verde, vermelho e azul. Ajuste polinomial de grau 2 (média de 5 tomadas).

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

4.4.2 Modelagem por combinação de canais

Para cada fonte (LED verde, vermelho ou azul) independentemente, o modelo de combinação linear dos canais R, G e B do OSA Visível foi ajustado conforme a Equação 3.4, utilizando os polinômios de grau 2 da Tabela 10. Os coeficientes α_1 , α_2 , α_3 foram obtidos por mínimos quadrados e estão apresentados na Tabela 11.

Para as três fontes, o modelo atingiu $R^2 = 0,9999$, com erro percentual médio inferior a 0,5% (Tabela 12). Os coeficientes α_i variam entre as fontes (Tabela 11), refletindo a contribuição relativa de cada canal da matriz Bayer à intensidade medida em cada comprimento de onda dominante. Valores negativos em alguns α_i indicam que a combinação

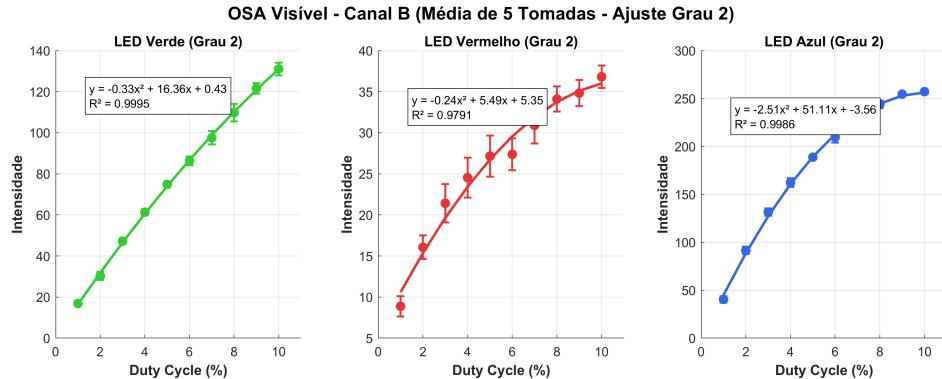


Figura 24 – Resposta do canal B do OSA Visível em função do duty cycle para os LEDs verde, vermelho e azul. Ajuste polinomial de grau 2 (média de 5 tomadas).

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Tabela 10 – Coeficientes dos polinômios $f_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$ do OSA Visível por fonte e canal

| Fonte | Canal | a_i | b_i | c_i |
|----------|-------|--------|-------|-------|
| Verde | R | -0,222 | 4,51 | 5,99 |
| | G | -0,566 | 21,59 | -5,52 |
| | B | -0,330 | 16,36 | 0,43 |
| Vermelho | R | -2,577 | 50,18 | 11,18 |
| | G | -0,018 | 0,68 | 2,95 |
| | B | -0,242 | 5,49 | 5,35 |
| Azul | R | -0,004 | 2,39 | -0,13 |
| | G | -0,081 | 8,36 | -3,07 |
| | B | -2,512 | 51,11 | -3,56 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

linear subtrai a contribuição daquele canal para compensar o crosstalk espectral inerente ao sensor CMOS. O RMSE maior na fonte vermelha (95,56) em relação às demais (cerca de 28) é consistente com a escala de intensidade mais elevada do LED vermelho no espectrômetro ThorLabs.

A Figura 25 ilustra a concordância entre os dados reais do espectrômetro ThorLabs e as previsões do modelo combinado para cada LED. Os resultados validam que, na faixa de duty cycle utilizada (1–10%), é possível prever com alta precisão a intensidade medida pelo equipamento de referência a partir dos canais individuais do OSA Visível, desde que se utilize o modelo polinomial de grau 2 e a combinação linear específica para cada fonte.

Tabela 11 – Coeficientes da combinação linear α_i por fonte

| Fonte | α_1 (Canal R) | α_2 (Canal G) | α_3 (Canal B) |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Verde | -77,61 | -113,13 | 238,91 |
| Vermelho | -1297,84 | -23167,55 | 15493,23 |
| Azul | 640,42 | -69,67 | 1,06 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Tabela 12 – Métricas do modelo de combinação de canais por fonte

| Fonte | R^2 | RMSE | MAE | Erro (%) |
|----------|--------|-------|-------|----------|
| Verde | 0,9999 | 28,28 | 21,76 | 0,37 |
| Vermelho | 0,9999 | 95,56 | 78,49 | 0,46 |
| Azul | 0,9999 | 28,64 | 23,07 | 0,46 |

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

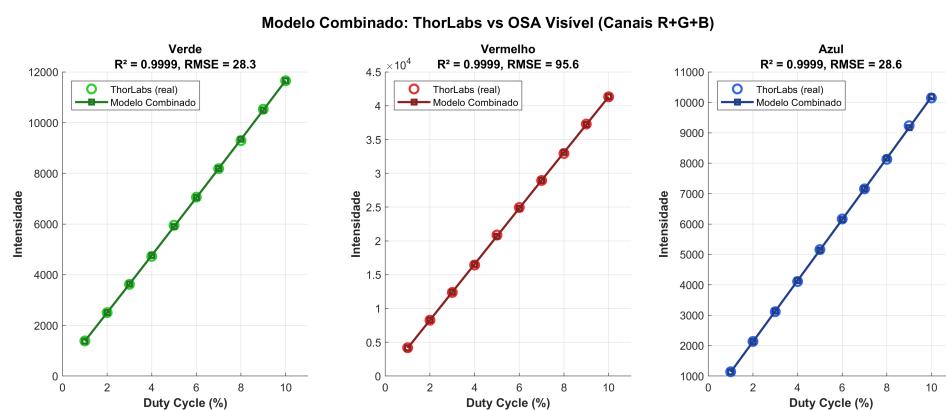


Figura 25 – Comparação entre intensidade medida pelo ThorLabs e predita pelo modelo de combinação de canais (verde, vermelho, azul) em função do duty cycle.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho mostra que é possível obter precisão metrológica compatível com aplicações educacionais e de pesquisa básica em espectroscopia visível utilizando hardware de baixo custo (impressão 3D, webcam, grade de difração) e calibração automatizada via visão computacional. Os experimentos validam empiricamente o OSA Visível, demonstrando que o processo híbrido de calibração (luz branca + lasers de referência) permite atingir incertezas expandidas inferiores a $\pm 0,3$ nm e que o modelo de combinação de canais reproduz a intensidade do espetrômetro ThorLabs com $R^2 = 0,9999$ na faixa calibrada. Os objetivos propostos no Capítulo 1 foram atendidos.

Onde o OSA Visível pode ser usado: ensino de espectroscopia em instituições com orçamento limitado; caracterização preliminar de fontes de luz em laboratórios de óptica; projetos de pesquisa que não exijam precisão sub-nanômetro; ambientes de monitoramento onde o custo e a portabilidade são prioritários.

O que este trabalho entrega que antes não existia (ou existia de forma muito mais cara): um conjunto hardware–software integrado (espetrômetro impresso em 3D + interface OSA Visível) que realiza análise espectral quantitativa na faixa 380–750 nm com calibração automatizada, acessível por menos de 200 dólares (USD) — em contraste com os mais de 30 mil dólares (USD) dos OSAs comerciais. A inovação consiste em substituir o rigor da engenharia óptica de alto custo por algoritmos de visão computacional, mantendo o desempenho adequado para medições na faixa visível.

A calibração do eixo de comprimento de onda apresentou incertezas expandidas entre $\pm 0,134$ nm e $\pm 0,288$ nm (100 amostras temporais), superando o objetivo de ± 2 nm. A análise de repetibilidade revelou coeficientes de variação de intensidade inferiores a 2% e taxas de detecção superiores a 90% para todos os picos principais. A comparação com o espetrômetro ThorLabs evidenciou concordância adequada para os picos verde (diferença de 2,96 nm) e vermelho (1,42 nm). Por melhor que sejam esses resultados, houve sim uma diferença no pico azul: 9,21 nm entre o OSA Visível e o ThorLabs. Para as demais frequências (LEDs verde e vermelho), os valores ficaram muito próximos entre os dois equipamentos.

Quanto à calibração de intensidade, o espetrômetro ThorLabs apresentou resposta linear, como esperado, enquanto o OSA Visível exigiu modelo polinomial de grau 2 para capturar o comportamento de saturação. O modelo de combinação de canais alcançou $R^2 = 0,9999$ e erro percentual inferior a 0,5% para cada fonte. Ressalta-se que, apesar do mesmo duty cycle PWM aplicado aos diferentes LEDs da fonte do Experimento 2, o LED vermelho apresentou maior intensidade no ThorLabs. Isso explica por que o canal R do OSA Visível saturou tanto em relação aos demais canais. O ideal seria uma fonte onde cada LED emitisse a mesma potência luminosa para o mesmo valor de PWM, permitindo

comparação mais equitativa entre canais.

É importante enfatizar que o conjunto espetrômetro e software OSA Visível não substitui, e nem tem como objetivo substituir, um OSA profissional. O sistema introduz e democratiza o estudo em espectroscopia para a faixa visível, tornando-o acessível a contextos educacionais, de pesquisa básica e ambientes com recursos limitados. Pesquisas que exijam alta precisão, faixas dinâmicas amplas de potência sem saturação ou resolução espectral de sub-nanômetro requerem equipamento profissional. Por outro lado, os resultados obtidos são satisfatórios para um equipamento de tão baixo custo (inferior a 200 dólares (USD), redução superior a 99% em relação aos OSAs comerciais), permitindo análise espectral quantitativa onde a precisão metrológica extrema não é necessária.

As limitações observadas incluem a taxa de detecção de 92% para o pico vermelho e a diferença de 9 nm no azul. Três fatores adicionais merecem destaque. (i) Linearização: a relação $\lambda(x)$ é modelada por regressão linear, justificada pela aproximação de pequenos ângulos na equação de Fraunhofer (Seção 2.2). Em primeira ordem, o OSA Visível aproxima a distribuição real de comprimento de onda, mas não a representa com perfeição, especialmente nos extremos do espectro (abaixo de 400 nm e acima de 700 nm), onde a não linearidade da grade se manifesta. (ii) Recalibração periódica: a calibração com lasers foi realizada há mais de seis meses; tratando-se de um espetrômetro impresso em 3D, cujas dimensões físicas (posicionamento da grade, fenda, sensor) são críticas, é difícil garantir que o equipamento se comporte de forma idêntica ao longo do tempo sem recalibrar. A recomendação é recalibrar periodicamente ou antes de medições de maior exigência. (iii) Método de extração de picos: no Experimento 1 não se utilizou a mesma abordagem do Experimento 3 (ajuste Lorentziano via Peaks Viewer); a detecção foi feita diretamente com `scipy.signal.find_peaks`. A adoção de ajuste de curva nos experimentos de comprimento de onda poderia refinar ainda mais as estimativas de λ .

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Modelagem espectral avançada. Trabalhos futuros devem explorar modelos não lineares (polinômios de ordem superior) para aprimorar a precisão nas extremidades do espectro, bem como técnicas de correção espectral mais sofisticadas para compensar a resposta não uniforme do sensor. Uma linha promissora é a modelagem espectral contínua: estender a abordagem de combinação de canais ($P_{\text{ThorLabs}}(\lambda) = \beta_1(\lambda)P_R + \beta_2(\lambda)P_G + \beta_3(\lambda)P_B$) a coeficientes β_i dependentes do comprimento de onda, permitindo mapear a relação OSA Visível–ThorLabs para espectros arbitrários, não apenas picos pontuais. Explorar interpolação de $\beta_i(\lambda)$ ao longo da faixa visível, modelagem da resposta espectral do sensor (matriz Bayer, crosstalk entre canais) e incorporação explícita de saturação nos modelos matemáticos são direções que podem melhorar a acurácia da intensidade em todo o espectro.

MVP de SaaS para o OSA Visível. Outra linha de evolução é a expansão da interface OSA Visível para uma aplicação *web* (Software as a Service). O MVP de um SaaS permitiria que o espectrômetro deixe de ser exclusivamente uma aplicação local: o usuário poderia acessar o dispositivo remotamente, inclusive pelo celular, e realizar aquisição e análise de espectros em tempo real. Isso é ideal para aplicações de monitoramento remoto, laboratórios distribuídos e equipes que precisam compartilhar dados de forma colaborativa. As Figuras 26 e 27 ilustram conceitos de interface web em desenvolvimento, com armazenamento em nuvem, suporte a múltiplos dispositivos e visualização de espectros ao vivo.

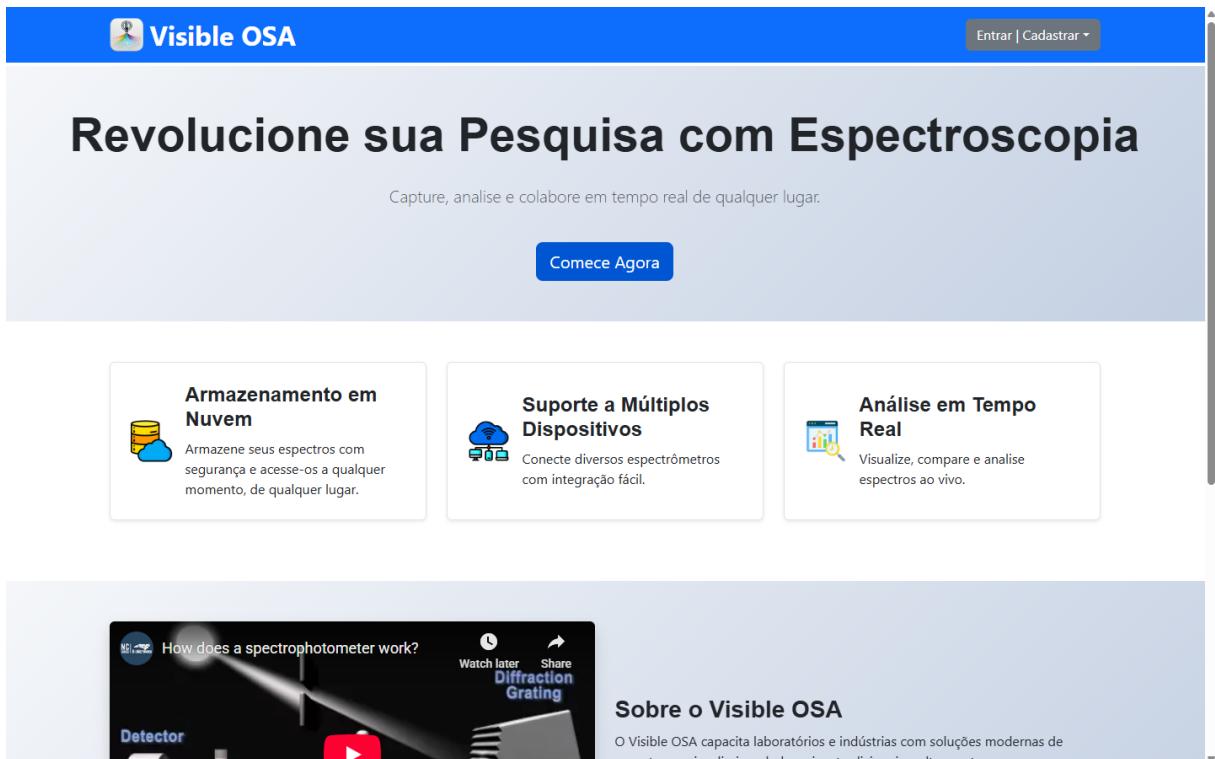


Figura 26 – Conceito de interface *web* (SaaS) para o OSA Visível: landing page com armazenamento em nuvem, suporte a múltiplos dispositivos e análise em tempo real.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A expansão da faixa espectral para o infravermelho próximo (750–1100 nm) exigiria a adaptação do sensor CMOS e uma nova reavaliação dos parâmetros metrológicos e algorítmicos.

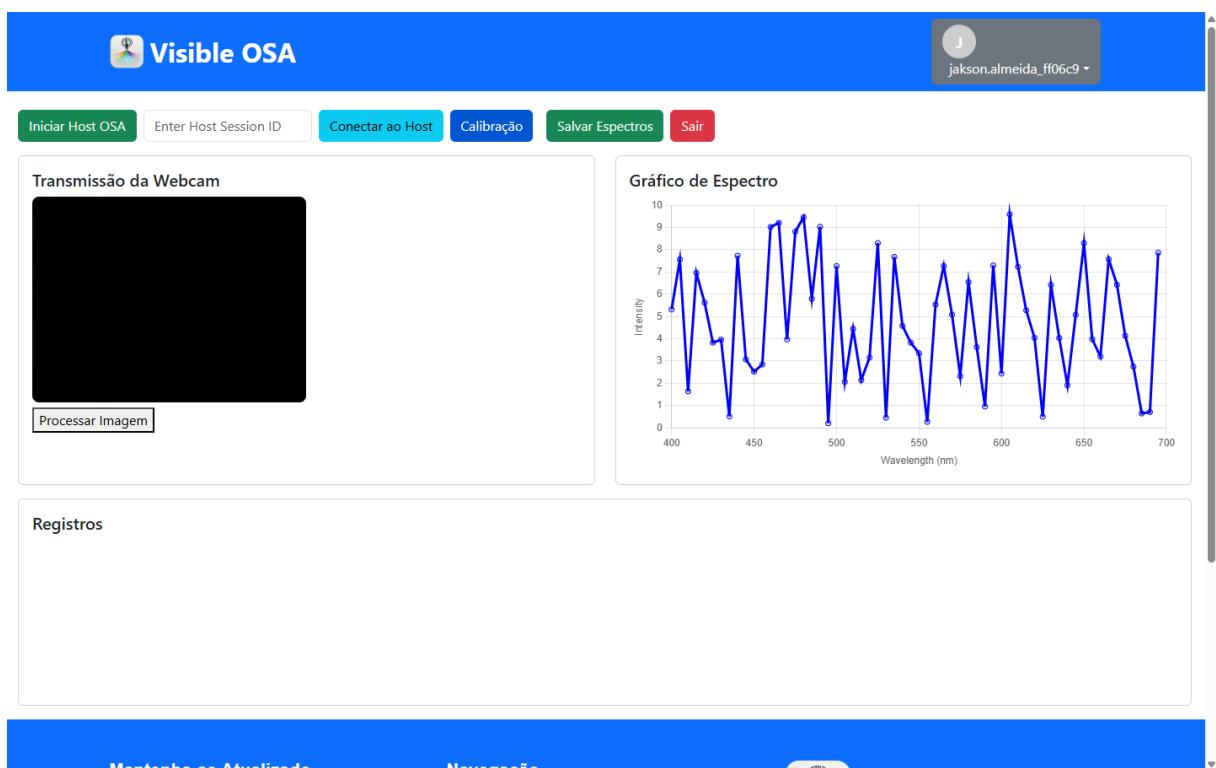


Figura 27 – Conceito de painel *web*: conexão ao host OSA, transmissão da webcam e gráfico de espectro em tempo real.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

REFERÊNCIAS

- 1 AGILENT. The Basics of UV-Vis Spectroscopy. Disponível em: <https://www.agilent.com/cs/library/primers/public/primer-uv-vis-basics-5980-1397en-agilent.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2025.
- 2 Smartphone-based optical spectroscopic platforms for biomedical applications. PMC. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8086480/>. Acesso em: 3 nov. 2025.
- 3 VIAVI Solutions Inc. Optical Spectrum Analyzers (OSA). Disponível em: <https://www.viavisolutions.com/en-us/products/optical-spectrum-analyzers-osa>. Acesso em: 3 nov. 2025.
- 4 EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF THE OPTICAL FIBER. Scientific Bulletin. Disponível em: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full04f_672529.pdf. Acesso em: 3 nov. 2025.
- 5 High-Resolution FBG-Based Fiber-Optic Sensor with Temperature Compensation. MDPI. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/23/5285>. Acesso em: 3 nov. 2025.
- 6 THORLABS. OSA20xC Series Optical Spectrum Analyzers. Disponível em: https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=5276. Acesso em: 3 mar. 2025.
- 7 THORLABS. CCT11 Compact Spectrometer, Visible, 350–700 nm. Disponível em: <https://www.thorlabs.com/item/CCT11>. Acesso em: 2 fev. 2025.
- 8 Fraunhofer diffraction. Wikipedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer_diffraction. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 9 HENRIKSEN, Marie Bøe; SIGERNES, Fred; JOHANSEN, Tor Arne. A CLOSER LOOK AT SPECTROGRAPHIC WAVELENGTH CALIBRATION. Disponível em: <http://kho.unis.no/doc/MarieCalibrationWhisper2022.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 10 Spectrum analyzer. Wikipedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum_analyzer. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 11 Optical Spectrum Analysis. Keysight. Disponível em: <https://www.keysight.com/us/en/assets/3120-1501/application-notes/5963-7145.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 12 Optical Device Fabrication with 3D printing. Stanford Explore Technologies. Disponível em: <https://techfinder.stanford.edu/technology/optical-device-fabrication-3d-printing>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 13 IEC 62129:2006 - Calibration of optical spectrum analyzers. iTeh Standards. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/e5137235-b156-4b86-8102-62e567484e3a/iec-62129-2006>. Acesso em: 10 nov. 2025.

- 14 Spectral line shape. Wikipedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_line_shape. Acesso em: 3 fev. 2026.
- 15 Dynamic Range. Evident Scientific. Disponível em: <https://evidentscientific.com/en/microscope-resource/knowledge-hub/digital-imaging/concepts/dynamicrange>. Acesso em: 3 fev. 2026.
- 16 Peak Spectroscopy Software Peak Fitting. Peak Spectroscopy. Disponível em: <https://www.peakspectroscopy.com/peakFitting.html>. Acesso em: 3 fev. 2026.
- 17 TERRA, Osama; HUSSEIN, Hatem. Calibration of grating based optical spectrum analyzers. ResearchGate. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Osama-Terra/publication/282900283_Calibration_of_grating_based_optical_spectrum_analyzers/links/of-grating-based-optical-spectrum-analyzers.pdf. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 18 DUBARD, J.; LE MEN, C. Optical Spectrum Analyzer Calibration. In: SOARES, Olivério D. D. (Ed.). Trends in Optical Fibre Metrology and Standards. Dordrecht: Springer, 1995. (NATO ASI Series, v. 285). p. 489-509. DOI: 10.1007/978-94-011-0035-9_25. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-0035-9_25. Acesso em: 13 mar. 2025.
- 19 LIU, K.; YU, F. Accurate Wavelength Calibration Method Using System Parameters for Grating Spectrometers. Optical Engineering, v. 52, n. 1, p. 013603, 2013. DOI: 10.1117/1.OE.52.1.013603.
- 20 LASERLINE. Produtos Linha Industrial - Módulos Laser. Disponível em: <https://www.laserline.com.br/produtos/industrial/modulos-laser>. Acesso em: 7 jan. 2026.
- 21 GAUDILABS. Open Fiber Spectrometer. Disponível em: https://www.gaudi.ch/GaudiLabs/?page_id=825. Acesso em: 10 mar. 2025.
- 22 Otsu's method. Wikipedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Otsu%27s_method. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 23 OTSU, Nobuyuki. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979.
- 24 Spectral centroid. Wikipedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_centroid. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 25 YOKOGAWA. OSA Specifications Explained. Disponível em: https://cdn.tmi.yokogawa.com/files/content/OSA_specifications_explained.pdf. Acesso em: 29 jan. 2026.
- 26 YOKOGAWA. AQ6374E Optical Spectrum Analyzer. Disponível em: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/test-measurement/optical-spectrum-analyzer/aq6374e/>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 27 ANRITSU. MS9740B Optical Spectrum Analyzer. Disponível em: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/ms9740b>. Acesso em: 10 mar. 2025.

- 28 TERRA, Osama; HUSSEIN, Hatem. Calibration of grating based optical spectrum analyzers. ResearchGate, 2015. Disponível em:
https://www.researchgate.net/profile/Osama-Terra/publication/282900283_Calibration_of_grating_based_optical_spectrum_analyzers/links/of-grating-based-optical-spectrum-analyzers.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025.