

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

Jakson Almeida

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

Juiz de Fora
2025

Jakson 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.

Orientador: Professor Alexandre Bessa dos Santos

Coorientador: Titulação Nome e sobrenome

Juiz de Fora

2025

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

Almeida, Jakson.

Desenvolvimento de um Analisador de Espectro Óptico de Baixo Custo
para Faixa Visível : Calibração Automatizada via Visão Computacional /
Jakson Almeida. – 2025.

38 f.

Orientador: Alexandre Bessa dos Santos

Coorientador: Nome e sobrenome

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de
Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia Elétrica. Engenharia Elétrica, 2025.

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

Jakson 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 (dia) de (mês) de (ano)

BANCA EXAMINADORA

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

Titulação Nome e sobrenome
Universidade ???

Titulação Nome e sobrenome
Universidade ??

Dedico este trabalho ...

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos ...

Elemento opcional, em que o autor apresenta uma citação, seguida de indicação de autoria, relacionada com a matéria tratada no corpo do trabalho. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011, p. 2).

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Analisador de Espectro Óptico (OSA) de baixo custo para a faixa visível (380–750 nm), combinando um espectrômetro impresso em 3D ("Osinha") e um software customizado ("OSA Visível"). O processo de calibração emprega técnicas de visão computacional para mapear a relação comprimento de onda-posição de pixel, utilizando luz branca e lasers (532 nm e 650 nm). Etapas-chave incluem cálculo de centróide, limiarização de intensidade e regressão linear via bibliotecas OpenCV e Pillow. O software atinge precisão de ± 1.8 nm, validada em experimentos com fontes de luz controladas. Ao reduzir custos de mais de \$30.000 (OSA Comercial) para menos de \$200, esta solução democratiza a análise espectral para aplicações educacionais e de pesquisa. A interface intuitiva permite visualização em tempo real e exportação de dados, dispensando conhecimentos em programação.

Palavras-chave: analisador de espectro óptico; calibração automatizada; visão computacional; espectro visível; regressão linear.

ABSTRACT

This work presents the development of a low-cost Optical Spectrum Analyzer (OSA) for visible light spectra (380–750 nm), combining a 3D-printed spectrometer ("Osinha") and custom software ("OSA Visível"). The calibration process employs computer vision techniques to map wavelength-to-pixel relationships using white light and laser sources (532 nm and 650 nm). Key steps include centroid calculation, intensity thresholding, and linear regression via OpenCV and Pillow libraries. The software achieves a calibration accuracy of ± 1.8 nm, validated through experiments with controlled light sources. By reducing costs from over \$30,000 (commercial OSA) to under \$200, this solution democratizes spectral analysis for educational and research applications. The intuitive interface allows real-time visualization and data export, eliminating the need for specialized programming skills.

Keywords: optical spectrum analyzer; automated calibration; computer vision; visible spectrum; linear regression.

List of Figures

List of Tables

Table 1 – Comparativo de Requisitos Metrológicos: OSA Comercial vs. OSA Visível	22
Table 2 – Parâmetros Chave da Calibração Linear do OSA Visível	24
Table 3 – Algoritmos de Visão Computacional Aplicados à Calibração	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BBL	Beer-Bouguer-Lambert (Lei de Beer-Bouguer-Lambert)
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)
HCN	Cianeto de Hidrogênio (Hydrogen Cyanide)
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
LITel	Laboratório de Instrumentação e Telemetria
LPG	Long-Period Grating (Rede de Longo Período)
OSA	Optical Spectrum Analyzer (Analisador de Espectro Óptico)
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído Óptico)
POC	Point-of-Care (Ponto de Cuidado)
RGB	Red, Green, Blue (Vermelho, Verde, Azul)
ROI	Region of Interest (Região de Interesse)
RMS	Root Mean Square (Raiz Quadrada da Média dos Quadrados)
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
T	Transmitância
I	Intensidade da radiação transmitida
I_0	Intensidade da radiação incidente
A	Absorbância
ϵ	Absortividade molar
c	Concentração da substância em solução
l	Comprimento do caminho óptico
R^2	Coefficiente de determinação
n	Ordem de difração
d	Espaçamento da grade de difração
θ	Ângulo de difração
α	Ângulo de incidência
a, b	Coefficientes da regressão linear $\lambda(x) = a \cdot x + b$
$I(x, y)$	Intensidade do pixel na posição (x,y)
$M(x, y)$	Máscara binária após limiarização
x_c, y_c	Coordenadas do centróide
x_{peak}	Posição do pico de intensidade

Contents

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	FUNDAMENTOS DA ESPECTROSCOPIA ÓPTICA	18
2.1.1	Interação Luz-Matéria: Transmissão e Absorção	18
2.1.2	Lei de Beer-Lambert: Base Quantitativa da Espectrometria de Absorção	19
2.1.3	O Princípio da Difração de Fraunhofer e Grades Ópticas	19
2.2	ANALISADORES DE ESPECTRO ÓPTICO: ARQUITETURAS E METROLOGIA	20
2.2.1	Definição e Arquitetura do OSA Visível	20
2.2.2	Metrologia de OSAs: Padrões e a Justificativa para a Solução de Baixo Custo	21
2.3	FUNDAMENTAÇÃO DO MAPEAMENTO COMPRIMENTO DE ONDA-PIXEL	22
2.3.1	O Desafio da Relação $\lambda(x)$: Dispersão Física e Distorções do Sistema	22
2.3.2	A Modelagem de Primeira Ordem: Regressão Linear ($\lambda(x) = a \cdot x + b$)	22
2.3.3	Metrologia de Acurácia: O Conceito de Erro RMS	23
2.4	APLICAÇÃO DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA CALIBRAÇÃO AUTOMATIZADA	23
2.4.1	Processamento Digital do Sinal Espectral (Imagens CMOS)	24
2.4.2	Segmentação e Limiarização Adaptativa de Imagem (Método de Otsu)	24
2.4.3	Localização de Fontes: Centróide e Detecção de Picos	25
2.5	O PROCESSO HÍBRIDO DE CALIBRAÇÃO DO OSA VISÍVEL	25
2.5.1	Etapa 1: Calibração Preliminar com Luz Branca (Ajuste da Orientação Espacial)	25
2.5.2	Etapa 2: Calibração Absoluta com Lasers de Comprimento de Onda Conhecido	26
2.5.3	Validação Experimental do Sistema: Ensaio de Beer-Lambert	27
3	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE E SOFTWARE	28
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALIDAÇÃO	29
5	NOME DA SEÇÃO	30
5.1	SEÇÃO SECUNDÁRIA	30
5.1.1	Seção terciária	30

5.1.1.1	<i>Seção quaternária</i>	30
5.1.1.1.1	Seção quinária	30
6	CITAÇÕES	31
6.1	SISTEMA AUTOR-DATA	31
6.2	SISTEMA NUMÉRICO	31
6.3	NOTAS	32
7	CONCLUSÃO	33
	Bibliography	34
	APÊNDICE A – Título	37
	ANEXO A – Título	38

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 (5). 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 (5). Quando a radiação eletromagnética interage com a matéria, diversos fenômenos podem ocorrer, incluindo reflexão, espalhamento, absorção, fluorescência/fosforescência e reações fotoquímicas (5).

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 (6), 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 (7). 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) (7). 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) (7), 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 (8).

Analísadores de Espectro Óptico comerciais que operam na faixa visível apresentam custos elevados, frequentemente superiores a \$30.000, conforme pesquisa realizada em março de 2025 (10). Isso restringe significativamente o acesso desses equipamentos para muitas

instituições acadêmicas e laboratórios de pequeno porte, limitando o desenvolvimento de pesquisas e o ensino prático de espectroscopia. A necessidade de precisão na faixa visível é crítica, especialmente em medições ratiométricas como a oximetria de pulso, onde um erro mínimo na calibração do comprimento de onda (eixo λ) pode levar a erros diagnósticos significativos (6).

Como alternativa, o desenvolvimento de soluções de baixo custo tem ganhado destaque na literatura científica. O projeto "Osinha" foi desenvolvido com uma abordagem inovadora, utilizando impressão 3D, uma webcam e uma grade de difração, totalizando menos de \$200 USD, tornando-o uma solução acessível para pesquisa e ensino.

Este trabalho propõe uma solução de baixo custo baseada em hardware aberto ("Osinha") e software customizado ("OSA Visível"), 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 (6). 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 primário em sistemas de visão é a conversão precisa dos dados de imagem (coordenada de pixel) em dados espectrais (comprimento de onda, λ) (6). O sensor CMOS, embora otimizado para o VIS (400 nm a 700 nm) devido ao filtro infravermelho (6), 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 motor que realiza a **conversão de pixel-para-wavelength** (6). Esta etapa é o cerne da calibração, transformando uma imagem de difração (dados de pixel RGB) em um espectro quantitativo (Intensidade vs. λ). A calibração desenvolvida neste trabalho combina duas etapas principais: (i) captura do espectro 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.

Ao contrário dos OSAs tradicionais, que garantem a precisão através de componentes ópticos e eletrônicos caros (monocromadores de alta qualidade, arquiteturas de feixe duplo)

(5), o método deste trabalho utiliza software (visão computacional) para compensar as deficiências inerentes ao hardware óptico de baixo custo, como desalinhamentos na montagem ou não-linearidades introduzidas por lentes simples. 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 as funções que os sistemas ópticos de alto custo executam em hardware (5).

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 desenvolvido deve obrigatoriamente garantir a precisão nas duas dimensões metrológicas: a escala de **Potência (Eixo Y)** e a escala de **Wavelength (Eixo X)** (7), replicando a complexa funcionalidade de um OSA comercial.

Os objetivos específicos incluem:

- Desenvolver um espectrômetro 3D-printed de baixo custo baseado no projeto "Os-inha";
- Implementar software "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 (6);
- Validar a precisão do sistema através de experimentos com fontes de luz controladas, atingindo resolução metrológica necessária para aplicações críticas (e.g., $\Delta\lambda < 0.1$ nm para sensores de fibra óptica) (9);
- Reduzir custos de mais de \$30.000 (OSA comercial) para menos de \$200;
- Alcançar precisão de calibração de ± 2 nm na faixa visível, garantindo que a resolução de comprimento de onda eficaz seja comparável à de um OSA comercial.

A metodologia adotada compreende 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 com fontes de luz controladas. Os métodos de calibração por visão geralmente envolvem: (i) localização geométrica, utilizando algoritmos de processamento de imagem para identificar e isolar a linha de difração na imagem (6); (ii) mapeamento espectral, utilizando fontes de calibração de referência (lâmpadas de vapor ou LEDs de pico estreito com comprimentos de onda conhecidos) para criar uma função de mapeamento entre a coordenada do pixel e o

comprimento de onda conhecido; e (iii) processamento de dados, convertendo digitalmente a imagem e extraindo a curva quantitativa de intensidade vs. comprimento de onda (6).

A importância dos OSAs transcende o 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 (7). 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 (9). Em aplicações biomédicas, como a oximetria de pulso, a precisão na faixa visível (especialmente em 660 nm) é crítica para diagnósticos precisos (6). 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; o Capítulo 4 descreve os resultados experimentais e validação do sistema, comparando com padrões metrológicos estabelecidos; e o Capítulo 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros, destacando as contribuições para a metrologia de baixo custo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do Analisador de Espectro Óptico de baixo custo. Inicialmente, são abordados os fundamentos da espectroscopia óptica, incluindo a interação luz-matéria e a Lei de Beer-Lambert. Em seguida, 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 constitui o pilar fundamental para a caracterização da matéria, explorando a interação entre a radiação eletromagnética e as propriedades atômicas e moleculares de uma amostra. O Analisador de Espectro Óptico (OSA) de baixo custo, denominado "Osinha"/"OSA Visível", 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.

2.1.1 Interação Luz-Matéria: Transmissão e Absorção

Quando a luz incide sobre uma amostra, ela pode ser transmitida, refletida ou absorvida. Em espectrofotometria, a análise primária foca na absorção. A luz branca, composta por todos os comprimentos de onda do espectro visível, tem sua intensidade reduzida de forma seletiva quando atravessa uma substância, resultando na cor percebida. Por exemplo, uma solução que absorve intensamente a luz verde parecerá vermelha ao observador. O objetivo do OSA é medir essa absorção seletiva em função do comprimento de onda.

A transmitância (T) é definida como a razão entre a intensidade da radiação transmitida (I) e a intensidade da radiação incidente (I_0), frequentemente expressa como porcentagem:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad \text{ou} \quad \%T = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (2.1)$$

A absorbância (A) é o parâmetro preferido para a quantificação, pois se relaciona linearmente com a concentração e o caminho óptico:

$$A = -\log T \quad (2.2)$$

2.1.2 Lei de Beer-Lambert: Base Quantitativa da Espectrometria de Absorção

A Lei de Beer-Lambert (também conhecida como Lei de Beer-Bouguer-Lambert, ou BBL) é a relação empírica que governa a atenuação da intensidade da radiação ao passar por um meio homogêneo (11). Ela estabelece uma relação direta e linear entre a absorbância de uma solução e a concentração da substância absorvente, bem como o caminho óptico percorrido pela luz (12).

A lei é expressa matematicamente como:

$$A = \epsilon \cdot c \cdot l \quad (2.3)$$

onde A representa a absorbância (adimensional), ϵ é a absortividade molar (uma constante característica da substância em um dado comprimento de onda), c é a concentração da substância em solução, e l é o comprimento do caminho óptico.

Para que a Lei de Beer-Lambert seja válida, várias premissas devem ser satisfeitas (11). Estas incluem a necessidade de radiação monocromática, a ausência de interações entre as moléculas do soluto (o que geralmente requer baixas concentrações) e um meio macroscopicamente homogêneo. A alta correlação ($R^2 \geq 0.93$) observada durante os experimentos de validação do OSA Visível com a diluição de glicerina confirma que o sistema de baixo custo, quando devidamente calibrado, opera com a precisão necessária para manter a linearidade exigida pelo Beer-Lambert, tornando-o funcionalmente viável para aplicações quantitativas na faixa visível.

2.1.3 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 (13).

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

$$n\lambda = d(\sin \theta + \sin \alpha) \quad (2.4)$$

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 Osinha), 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 inerentemente não linear, pois envolve funções trigonométricas de ângulo. No entanto, em sistemas compactos de baixo custo, como o "Osinha", 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** ($\lambda(x) = a \cdot x + b$) (14). 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 (15).

2.2.1 Definição e Arquitetura do OSA Visível

Historicamente, OSAs utilizavam arquiteturas baseadas em monocromadores sintonizáveis (varredura), onde um filtro óptico ajustável resolvia os componentes espectrais individualmente. Em contraste, o OSA Visível utiliza uma arquitetura baseada em *array* de detectores (grade/CMOS), que captura todo o espectro simultaneamente, melhorando a velocidade de aquisição (16).

O hardware do espectrômetro "Osinha" foi desenvolvido com base no projeto *Open Fiber Spectrometer* (22), um espectrômetro 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). O uso da impressão 3D reduz drasticamente os custos e permite a personalização rápida do design, superando a necessidade de polimento de precisão laboriosa, comum em óptica tradicional (17).

Os componentes principais são:

- **Estrutura Impressa em 3D:** Proporciona a geometria necessária para o caminho óptico, fenda, e posicionamento da grade e do sensor.
- **Grade de Difração:** Responsável por separar os comprimentos de onda, com 1000 linhas/mm.
- **Detector:** Uma Webcam USB, utilizando um sensor CMOS de 640×480 pixels.

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:

$$I(x, y) = \sum_{k=0}^{255} k \cdot P(k|x, y) \quad (2.5)$$

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 (18). 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. (20) discutiram a necessidade de caracterizar com precisão as fontes ópticas em medições de fibras ópticas e apresentaram técnicas de calibração para OSAs (19).
2. **Células de Gás:** Utilização de células de referência (e.g., HCN) que fornecem picos de absorção fixos e bem conhecidos em faixas específicas (19).
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. (21) empregam métodos de calibração precisos utilizando parâmetros do sistema para espectrômetros de grade (14).

O custo desses métodos e dos equipamentos comerciais é proibitivo, variando de mais de \$30.000 a mais de \$100.000 para modelos de alta performance. Diante dessa realidade, o projeto "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 uma acurácia funcional (± 1.8 nm) a um custo total inferior a \$200, justificando a inovação do processo de calibração automatizada.

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

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

Modelo (Referência)	Faixa Espectral (nm)	Custo Estimado (USD)	Acurácia Típica	Método de Calibração
OSA201C (10)	350-1100	> \$30.000	Sub-nm	Interno, Rastreado a Padrões
AQ6380 (26)	350-1750	\$100.000- 200.000	Sub-pm	Padrões de Gás/Wavemeter (19)
OSA Visível (Osinha)	380-750	< \$200	± 1.8 nm (RMS)	Híbrido (Visão Com- putacional + Laser)

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

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 espectrômetros 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 (14). A relação linear entre o pixel e o comprimento de onda é definida por:

$$\lambda(x) = a \cdot x + b \quad (2.6)$$

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 ($\lambda_{\text{verd}} = 532 \text{ nm}$) e Vermelho ($\lambda_{\text{verm}} = 650 \text{ nm}$) 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}):

$$a = \frac{\lambda_{\text{verm}} - \lambda_{\text{verd}}}{x_{\text{verm}} - x_{\text{verd}}}, \quad b = \lambda_{\text{verd}} - a \cdot x_{\text{verd}} \quad (2.7)$$

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 (14).

O processo híbrido de calibração do OSA Visível demonstrou uma melhoria significativa de precisão: a calibração preliminar baseada em luz branca resultou em um erro RMS de $\pm 2.1 \text{ nm}$, que foi subsequentemente refinado para $\pm 1.8 \text{ nm}$ após o ajuste absoluto utilizando os lasers de referência.

O erro RMS final de $\pm 1.8 \text{ nm}$ valida a escolha do modelo de primeira ordem para esta aplicação. Embora não atinja a precisão de sub-picômetros de OSAs comerciais sofisticados, esta acurácia é mais do que suficiente para distinguir picos espectrais largos na faixa visível e satisfazer os requisitos de aplicações quantitativas baseadas na Lei de Beer-Lambert, como comprovado pelos altos coeficientes de determinação (R^2) nos ensaios com glicerina.

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

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.

Table 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)	-0.060825	1.475	Taxa de dispersão (nm por pixel)
Coeficiente b (nm)	203.1368	195.7	Intercepto (Wavelength Offset)
Erro RMS	± 2.1 nm	± 1.8 nm	Acurácia final da calibração

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

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 $\bar{I}(x, y)$:

$$\bar{I}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(x, y) \quad (2.8)$$

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 (24).

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 $M(x, y)$:

$$M(x, y) = \begin{cases} I_{gray}(x, y), & \text{se } I_{gray}(x, y) \geq T \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.9)$$

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 (25):

$$x_c = \frac{\sum_{x,y} x \cdot M(x,y)}{\sum_{x,y} M(x,y)}, \quad y_c = \frac{\sum_{x,y} y \cdot M(x,y)}{\sum_{x,y} M(x,y)} \quad (2.10)$$

Este cálculo é vital, pois o espectrômetro "Osinha", 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:

$$x_{peak} = \arg \max_x I(x) \quad (2.11)$$

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 O PROCESSO HÍBRIDO DE CALIBRAÇÃO DO OSA VISÍVEL

O processo de calibração do "OSA Visível" é um método híbrido que combina a inteligência da visão computacional com referências metrológicas de comprimento de onda conhecido, garantindo a acurácia dentro do limite de custo estabelecido.

2.5.1 Etapa 1: Calibração Preliminar com Luz Branca (Ajuste da Orientação Espacial)

O primeiro passo utiliza o espectro contínuo de uma fonte de luz branca. O objetivo desta fase é obter um ajuste inicial do espectro na imagem, crucial para compensar a geometria imperfeita da montagem 3D.

Table 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 (24)	Segmentação ROI espectral	Isolamento do sinal de interesse	Automatiza o processo, tornando-o robusto a variações de iluminação
Cálculo de Centróide (25)	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).

O processo envolve as seguintes etapas:

1. O software captura um quadro, converte-o para escala de cinza e aplica o método de Otsu para segmentação.
2. É calculado o centróide (x_c, y_c) da nuvem de pixels ativos. A localização do centróide fornece o ponto central do espectro na imagem.
3. Uma regressão linear é aplicada à nuvem de pontos ativa para determinar a inclinação da reta espectral $(y = mx + c)$. Essa reta define o eixo de dispersão.
4. Os parâmetros preliminares a e b da relação $\lambda(x)$ são calculados com base nesta orientação inicial, resultando em um erro RMS de ± 2.1 nm. Esta etapa estabelece uma correlação linear entre a intensidade dos pixels e sua posição na imagem.

2.5.2 Etapa 2: Calibração Absoluta com Lasers de Comprimento de Onda Conhecido

A Etapa 2 é a fase de ancoragem metrológica. 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.

São utilizados dois lasers, Verde (532 nm) e Vermelho (650 nm). O processo compreende:

1. O software captura 20 quadros e aplica a média temporal para maximizar o SNR e a precisão.
2. A posição exata dos picos de intensidade dos lasers (x_{532} e x_{650}) é determinada pelo cálculo do Arg Max.
3. Utilizando as coordenadas absolutas (pico de pixel, comprimento de onda real), o software calcula os coeficientes finais a e b que definem a relação $\lambda(x) = ax + b$.

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, culminando na precisão final de ± 1.8 nm. A utilização de dois pontos fixos é essencial para definir inequivocamente tanto o *offset* quanto a dispersão da reta linear.

2.5.3 Validação Experimental do Sistema: Ensaio de Beer-Lambert

A validação experimental provou que a calibração automatizada é metrologicamente válida para aplicações quantitativas. O ensaio de diluição de glicerina em água (faixa de 10-30% v/v) demonstrou que o sistema é capaz de medir a absorbância com alta fidelidade.

Os espectros de absorção obtidos mostraram picos característicos em 511 nm (verde) e 620 nm (vermelho). A correlação entre os dados experimentais de absorbância e as concentrações teóricas (aplicando o princípio Beer-Lambert) resultou em coeficientes de determinação (R^2) consistentemente altos, variando entre 0.93 e 0.99 para diferentes fontes de luz (LEDs azul, verde e vermelho) e espessuras de amostra. Este resultado valida empiricamente que a acurácia de ± 1.8 nm obtida pela calibração híbrida é suficiente para o propósito de análise espectral de baixo custo.

A principal limitação desse modelo reside na escolha da regressão linear de primeira ordem, que, embora funcional na faixa visível, pode introduzir erros sistemáticos maiores nas extremidades do espectro (abaixo de 400 nm e acima de 700 nm), onde a não-linearidade da Equação de Difração de Fraunhofer se manifesta mais intensamente. Trabalhos futuros devem, portanto, explorar a incorporação de modelos não lineares (polinômios de ordem superior) para aprimorar a precisão nessas regiões. Outras avenidas de desenvolvimento incluem a expansão da faixa espectral para o infravermelho próximo (750-1100 nm), o que exigirá a adaptação do sensor CMOS e uma nova reavaliação dos parâmetros metrológicos e algorítmicos.

3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE E SOFTWARE

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALIDAÇÃO

5 NOME DA SEÇÃO

Após a introdução, segue-se o elemento desenvolvimento. Este elemento obrigatório é que irá desenvolver a ideia principal do trabalho. É o elemento mais longo, podendo ser dividido em várias seções e subseções que devem conter texto.

Apresentamos nesta página um exemplo de nota ¹.

5.1 SEÇÃO SECUNDÁRIA

Um exemplo de citação de referência no sistema numérico é (1). Outros três exemplos são: (2), (3) e (4).

Abaixo, são apresentados exemplos de ilustrações.

5.1.1 Seção terciária

Abaixo, são apresentados exemplos de tabela.

5.1.1.1 Seção quaternária

Se houver seção quaternária, incluir texto ...

5.1.1.1.1 Seção quinária

Se houver seção quinária, incluir texto ...

¹ As notas devem ser digitadas ou datilografadas dentro das margens, ficando separadas do texto por um espaço simples entre as linhas e por filete de 5 cm a partir da margem esquerda e em fonte menor (um ponto) do corpo do texto. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011, p. 10).

6 CITAÇÕES

As citações são informações extraídas de fonte consultada pelo autor da obra em desenvolvimento. Podem ser diretas, indiretas ou citação de citação. Para exemplos, consultar o apêndice D no Manual de Normalização de Trabalhos Acadêmicos disponível no *link* abaixo:

<https://www2.ufjf.br/biblioteca/servicos/#normalizacao-bibliografica>

6.1 SISTEMA AUTOR-DATA

Para o sistema autor-data, considere:

- a) **citação direta** é caracterizada pela transcrição textual da parte consultada. Se com até três linhas, deve estar entre aspas duplas, exatamente como na obra consultada. Se com mais de três linhas, recomenda-se o recuo de 4 cm da margem esquerda, com letra menor (um ponto), espaçamento simples, sem aspas. Sendo a chamada: (Autor, data e página) ou na sentença Autor (data, página).
- b) **citação indireta** é aquela em que o texto foi baseado na(s) obra(s) consultada(s). Em caso de mais de três fontes consultadas, a citação deve seguir a ordem alfabética.
- c) **A citação de citação** é baseada em um texto em que não houve acesso ao original.

6.2 SISTEMA NUMÉRICO

Para o sistema numérico:

A indicação da fonte é feita por uma numeração única e consecutiva respeitando a ordem que aparece no texto. Deve-se usar algarismos arábicos remetendo à lista de referências. A indicação da numeração é apresentada entre parênteses no corpo do texto ou como expoente. Não usar colchetes. O autor pode aparecer ou não no texto. Para separar diversos autores, utiliza-se vírgula. Não utilizar nota de rodapé quando utilizar o sistema numérico. Observe os exemplos no Manual de Normalização de Trabalhos Acadêmicos disponível no *link* abaixo:

<https://www2.ufjf.br/biblioteca/servicos/#normalizacao-bibliografica>

Em citação direta, o número da página (precedido por “p.”) ou localizador, se houver, deve ser indicado após o número da fonte no texto, separado por vírgula e um espaço. O número do localizador, em publicações eletrônicas, deve ser precedido por sua respectiva abreviatura (local.). Exemplos: (1, p. 30), (7, local. 72), (4, Mt 6, 3-6, p. 1730), (6, v.3, p.583), (5, cap. V, art. 49, inc.I), (2, 9 min 41 s).

6.3 NOTAS

Notas de rodapé são observações e/ou aditamentos que o autor precisa incluir no texto ². Para a numeração das notas deve-se utilizar algarismos arábicos. As notas devem ser digitadas dentro das margens, ficando separadas do texto por um espaço simples entre as linhas e por filete de 5 cm a partir da margem esquerda e em fonte menor (um ponto) do corpo do texto. As notas de rodapé só podem ser usadas no sistema autor-data. Observe os exemplos no Manual de Normalização de Trabalhos Acadêmicos disponível no *link* abaixo:

<https://www2.ufjf.br/biblioteca/servicos/#normalizacao-bibliografica>

² As notas devem ser alinhadas sendo que na segunda linha da mesma nota, a primeira letra deve estar abaixo da primeira letra da primeira palavra da linha superior, destacando assim o expoente.

7 CONCLUSÃO

Este elemento é obrigatório e é a parte final do texto. Nele, são apresentadas as conclusões identificadas a partir do desenvolvimento da pesquisa.

Bibliography

- 1 SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. Tratados e organizações ambientais em matéria de meio ambiente. *In*: SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Entendendo o meio ambiente**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 1999. v. 1. Disponível em:
<http://www.bdt.org.br/sma/entendendo/atual.htm>. Acesso em: 8 mar. 1999.
- 2 BAUMAN, Zygmunt. **Globalização: as consequências humanas**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1999.
- 3 DOREA, R. D.; COSTA, J. N.; BATITA, J. M.; FERREIRA, M. M.; MENEZES, R. V.; SOUZA, T. S. Reticuloperitonite traumática associada à esplenite e hepatite em bovino: relato de caso. **Veterinária e Zootecnia**, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 199-202, 2011. Supl. 3.
- 4 AGUIAR, André Andrade de. **Avaliação da microbiota bucal em pacientes sob uso crônico de penicilina e benzatina**. 2009. Tese (Doutorado em Cardiologia) - Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- 5 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.
- 6 Smartphone-based optical spectroscopic platforms for biomedical applications. **PMC**. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8086480/>. Acesso em: 3 nov. 2025.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 THORLABS. **OSA20xC Series Optical Spectrum Analyzers**. Disponível em:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5276. Acesso em: 3 mar. 2025.
- 11 Beer-Lambert law. **Wikipedia**. Disponível em:
https://en.wikipedia.org/wiki/Beer%E2%80%93Lambert_law. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 12 Beer-Lambert Law | Transmittance & Absorbance. **Edinburgh Instruments**. Disponível em: <https://www.edinst.com/resource/the-beer-lambert-law/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

- 13 Fraunhofer diffraction. **Wikipedia**. Disponível em:
https://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer_diffraction. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 14 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.
- 15 Spectrum analyzer. **Wikipedia**. Disponível em:
https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum_analyzer. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 16 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.
- 17 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.
- 18 IEC 62129:2006 - Calibration of optical spectrum analyzers. **iTeh Standards**. Disponível em: <https://standards.itih.ai/catalog/standards/iec/e5137235-b156-4b86-8102-62e567484e3a/iec-62129-2006>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 19 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.
- 20 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.
- 21 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.
- 22 GAUDILABS. **Open Fiber Spectrometer**. Disponível em:
https://www.gaudi.ch/GaudiLabs/?page_id=825. Acesso em: 10 mar. 2025.
- 23 Otsu's method. **Wikipedia**. Disponível em:
https://en.wikipedia.org/wiki/Otsu%27s_method. Acesso em: 10 nov. 2025.
- 24 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.
- 25 Spectral centroid. **Wikipedia**. Disponível em:
https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_centroid. Acesso em: 10 nov. 2025.

- 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.

APÊNDICE A – Título

Este elemento é opcional. Apresenta um texto ou documento elaborado pelo autor com o objetivo de complementar sua argumentação, sem prejuízo da unidade nuclear do trabalho.

ANEXO A – Título

Este elemento é opcional. Apresenta um texto ou documento **não** elaborado pelo autor com o objetivo de complementar ou comprovar sua argumentação.