

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.

23 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

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (Semicondutor de Óxido Metálico Complementar)
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)
LITel	Laboratório de Instrumentação e Telemetria
LPG	Long-Period Grating (Rede de Longo Período)
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)
RGB	Red, Green, Blue (Vermelho, Verde, Azul)
RMS	Root Mean Square (Raiz Quadrada da Média dos Quadrados)
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
θ	Ângulo de difração
α	Ângulo de incidência
d	Espaçamento da grade de difração
n	Ordem de difração
$I(x, y)$	Intensidade do pixel na posição (x,y)
x_c, y_c	Coordenadas do centróide
R^2	Coeficiente de determinação

Contents

1	INTRODUÇÃO	13
2	NOME DA SEÇÃO	17
2.1	SEÇÃO SECUNDÁRIA	17
2.1.1	Seção terciária	17
2.1.1.1	<i>Seção quaternária</i>	17
2.1.1.1.1	Seção quinária	17
3	CITAÇÕES	18
3.1	SISTEMA AUTOR-DATA	18
3.2	SISTEMA NUMÉRICO	18
3.3	NOTAS	19
4	CONCLUSÃO	20
	Bibliography	21
	APÊNDICE A – Título	22
	ANEXO A – Título	23

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).

Analisadores 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 espetrais (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 desalinamentos 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 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.

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 e 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 "Osinha";
- 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 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.

2.1 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.

2.1.1 Seção terciária

Abaixo, são apresentados exemplos de tabela.

2.1.1.1 *Seção quaternária*

Se houver seção quaternária, incluir texto ...

2.1.1.1.1 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).

3 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>

3.1 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.

3.2 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).

3.3 NOTAS

Notas de rodapé são observações e/ou aditamentos que o autor precisa incluir no texto². 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.

4 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/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=5276. Acesso em: 3 mar. 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.