

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: Titulação Nome e sobrenome

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.

20 f.

Orientador: Nome e sobrenome

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

Titulação Nome e sobrenome - 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
OSA	Optical Spectrum Analyzer (Analisador de Espectro Óptico)
LITel	Laboratório de Instrumentação e Telemetria
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
CRI	Color Rendering Index (Índice de Reprodução de Cor)
RMS	Root Mean Square (Raiz Quadrada da Média dos Quadrados)

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	Coefficiente de determinação

Contents

1	INTRODUÇÃO	13
2	NOME DA SEÇÃO	14
2.1	SEÇÃO SECUNDÁRIA	14
2.1.1	Seção terciária	14
<i>2.1.1.1</i>	<i>Seção quaternária</i>	<i>14</i>
2.1.1.1.1	Seção quinária	14
3	CITAÇÕES	15
3.1	SISTEMA AUTOR-DATA	15
3.2	SISTEMA NUMÉRICO	15
3.3	NOTAS	16
4	CONCLUSÃO	17
	Bibliography	18
	APÊNDICE A – Título	19
	ANEXO A – Título	20

1 INTRODUÇÃO

A análise espectral é uma ferramenta fundamental em diversas áreas da ciência e tecnologia, permitindo a caracterização de fontes de luz e materiais através da decomposição de sua radiação eletromagnética em componentes de diferentes comprimentos de onda. No contexto educacional e de pesquisa, os Analisadores de Espectro Óptico (OSA) desempenham um papel crucial para o ensino de óptica e o desenvolvimento de novas tecnologias.

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. 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.

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 diferencial reside no uso de técnicas de visão computacional para calibração automática, substituindo métodos manuais ou baseados em hardware dedicado.

A calibração 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.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um Analisador de Espectro Óptico de baixo custo para a faixa visível (380-750 nm), integrando hardware acessível e software customizado com calibração automatizada via visão computacional.

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;
- Validar a precisão do sistema através de experimentos com fontes de luz controladas;

- Reduzir custos de mais de \$30.000 (OSA comercial) para menos de \$200;
- Alcançar precisão de calibração de ± 2 nm na faixa visível.

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.

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; o Capítulo 4 descreve os resultados experimentais e validação do sistema; e o Capítulo 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

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 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.

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.

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.