



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

Centro de Tecnologia e Urbanismo

Departamento de Engenharia Elétrica

**Priscila Pagliari Pinheiro**

**Projeto e desenvolvimento de um sistema  
opto-eletrônico para detecção de  
substâncias através da reflexão difusa na  
faixa do infravermelho próximo**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
da Universidade Estadual de Londrina  
para obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

Priscila Pagliari Pinheiro

Projeto e desenvolvimento de um sistema  
opto-eletrônico para detecção de  
substâncias através da reflexão difusa na  
faixa do infravermelho próximo

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Uni-  
versidade Estadual de Londrina para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos  
Especialidade: Instrumentação Eletrônica

Orientador:  
Profa. Dra. Maria Bernadete de Moraes  
França

Londrina, PR  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Pinheiro, Priscila Pagliari.

Projeto e desenvolvimento de um sistema opto-eletrônico para detecção de substâncias através da reflexão difusa na faixa do infravermelho próximo / Priscila Pagliari Pinheiro. - Londrina, 2018.  
101 f. : il.

Orientador: Maria Bernadete de Moraes França.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.

Inclui bibliografia.

1. Instrumentação Eletrônica - Tese. 2. Filtros Banda-passante - Tese. 3. Reflectância Difusa - Tese. 4. LEDs Infravermelho - Tese. I. França, Maria Bernadete de Moraes . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Priscila Pagliari Pinheiro

# Projeto e desenvolvimento de um sistema opto-eletrônico para detecção de substâncias através da reflexão difusa na faixa do infravermelho próximo

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Uni-  
versidade Estadual de Londrina para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos  
Especialidade: Instrumentação Eletrônica

## Comissão Examinadora

---

Profa. Dra. Maria Bernadete de Moraes  
França  
Depto. de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Londrina  
Orientador

---

Prof. Dr. Francisco Granziera Júnior  
Depto. de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Londrina

---

Prof. Dr. José Alexandre de França  
Depto. de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Londrina

---

Prof. Dr. Flávio José De Oliveira Morais  
Depto. de Engenharia de Biosistemas  
Universidade Estadual Paulista

Londrina, 21 de Setembro de 2018

*“Dizem que nenhum plano sobrevive ao primeiro contato com a prática. Sou obrigado a concordar.”* Weir, Andy em Perdido em Marte.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, todo soberano, que sabiamente faz-nos carregar somente o fardo que nossos ombros possam suportar, e quando achamos o fardo pesado demais, envia pessoas em nosso caminho para ajudar a carregar esse peso.

A meus pais, que sempre acreditaram em mim.

A minha irmã, que mesmo me torrando as paciências, acreditou em mim.

Em especial a meu companheiro de jornada Jean, que sempre esteve a meu lado apoiando-me durante a graduação e, agora, durante o mestrado enfrentando junto a mim todas as dificuldades encontradas, e sempre me impulsionando quando encontrava algum obstáculo, muitas vezes imposto por eu mesma.

A minhas amigas, Jessica e Érika, que sempre apoiaram em minhas escolhas, sempre tiveram tempo para mim, e sempre tiveram palavras positivas a me dar.

A todos os meus amigos do LA2I que sempre compartilharam conhecimento e colaboraram para que a realização desse projeto fosse possível.

Agradeço a minha orientadora, professora Dra. Maria Bernadete de Moraes França, por ter aceitado orientar-me nesse projeto, com seu conhecimento e ideias para poder melhor direcionar-me. Por passar longas horas sentada comigo, sempre com paciência, sempre ajudando como possível.

Agradecimentos ao professor Dr. José Alexandre de França pelas ideias ao longo do trabalho. A química Ana Lúcia de Souza Madureira Felício pelos esclarecimentos prestados. Aos demais professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina.

A Universidade Estadual de Londrina, pela utilização de suas instalações, pelo auxílio dado através de seus funcionários e colaboradores e à CAPES pelo apoio financeiro.

PINHEIRO, Priscila Pagliari. **Projeto e desenvolvimento de um sistema opto-eletrônico para detecção de substâncias através da reflexão difusa na faixa do infravermelho próximo**. 2018. 101fls. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

## Resumo

Existem diversas técnicas para identificação dos elementos de uma mistura ou substância. Dentre elas a espectroscopia, onde é estudada a interação da luz com a matéria. No infravermelho é observada a vibração dos átomos das moléculas, onde o movimento vibracional ocorre quando uma fração da energia incidente nas mesmas é absorvida. As bandas em que ocorrem a absorção são utilizadas para qualificar e/ou quantificar o número de moléculas, e para identificar os atributos de grupos químicos específicos. A vantagem de realizar uma análise nessa região do espectro é que quase toda amostra, em qualquer estado físico, pode ser estudada. Os primeiros equipamentos comerciais que realizaram esse tipo de análise utilizavam-se de prismas para atuar como elementos dispersivos, sendo substituídos logo após por grades de difração. Com o desenvolvimento de dispositivos opto-eletrônicos, os LEDs passaram a ser uma opção por possuírem largura de banda estreita, dispensando o uso de um elemento dispersivo. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é projetar e desenvolver um sistema com uso de LEDs na faixa do infravermelho próximo, utilizando como forma de amostragem a reflexão difusa. A parcela refletida na amostra é espalhada por uma superfície e medida por um sensor óptico. Neste trabalho é proposto um sistema opto-eletrônico capaz de excitar vários LEDs de comprimentos de onda diferentes (1.450 nm, 1.530 nm, 1.730 nm, 1.950 nm e 2.150 nm), onde estas são refletidas em uma esfera de integração até atingir a amostra e retornar ao sensor. Foi utilizado um sensor de InGaAs, com faixa de resposta de 1.000 nm a 2.430 nm. Foram realizados 270 testes com três filtros ópticos com banda-passante distintas para validação do método. A resposta obtida foi de atenuações distintas para cada filtro utilizado, indicando que o protótipo apresenta uma boa sensibilidade na variação de luz emitida/recebida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Instrumentação Eletrônica. Filtros Banda-passante. Reflectância Difusa. LEDs Infravermelho.



PINHEIRO, Priscila Pagliari. **Design and development of an optoelectronic system for substance detection through the diffuse reflection in the near infrared range**. 2018. 101p. Master's Dissertation (Electrical Engineering) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

## Abstract

There are several techniques for identifying the elements of a mixture or substance. Among them the spectroscopy, where the interaction of light with matter is studied. In the infrared is observed the vibration of the atoms of the molecules, where the vibrational movement occurs when a fraction of the energy incident thereon is absorbed. The bands in which absorption takes place are used to qualify and/or quantify the number of molecules, and to identify the attributes of specific chemical groups. The advantage of analyzing this region of the spectrum is that almost every sample, in any physical state, can be studied. The first commercial equipment that performed this type of analysis used prisms to act as dispersive elements, being replaced soon after by diffraction grating. With the development of optoelectronic devices, LEDs became an option because they have a narrow bandwidth, dispensing the use of a dispersive element. In this way, the objective of this work is designing and developing a system with the use of LEDs in the near infrared range, using diffuse reflection as the sampling technique. The portion reflected in the sample is spread across a surface and measured by an optical sensor. In this work, an optoelectronic system capable of exciting various LEDs of different wavelengths (1,450 nm, 1,530 nm, 1,730 nm, 1,950 nm, and 2,150 nm) is proposed, where they are reflected in an integrating sphere until reaching the sample and returning to the sensor. An InGaAs sensor with a response range of 1,000 nm to 2,430 nm was used. A total of 270 tests were carried out with three optical filters with different bandwidth for validation of the method. The response obtained was a distinct attenuation for each filter used, indicating that the prototype presents a good sensitivity in the variation of light emitted/received.

**KEYWORDS:** Electronic Instrumentation. Bandpass Filters. Diffuse Reflectance. Infrared LEDs.

# Sumário

**Lista de Figuras**

**Lista de Tabelas**

**Lista de Abreviaturas**

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	3
1.2	Estrutura do Trabalho . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>4</b>
2.1	Espectroscopia NIR . . . . .	4
2.1.1	História da espectroscopia no infravermelho . . . . .	4
2.1.2	Fundamentação . . . . .	5
2.1.3	Métodos de amostragem utilizados na espectroscopia . . . . .	7
2.2	Esfera de integração . . . . .	9
2.2.1	Troca de radiação dentro de superfície esférica . . . . .	9
2.2.2	Equacionamento da radiação na esfera de integração . . . . .	11
2.2.3	Fator multiplicador da esfera . . . . .	13
2.3	Filtros Ópticos . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>16</b>
3.1	Descrição do sistema proposto . . . . .	16
3.2	Sistema óptico . . . . .	18
3.2.1	Projeto da esfera de integração . . . . .	18
3.2.2	Multiplicador da esfera . . . . .	21

3.2.3	Filtros ópticos . . . . .	22
3.3	Circuitos de condicionamento . . . . .	24
3.3.1	Circuito de acionamento dos LEDs . . . . .	24
3.3.2	Circuito de condicionamento do fotodiodo . . . . .	26
3.3.3	Circuito do controle de temperatura . . . . .	29
3.4	Validação do sistema proposto . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>34</b>
4.1	Protótipo . . . . .	34
4.2	Coleta de dados . . . . .	39
4.3	Sinais da placa de condicionamento do sensor InGaAs . . . . .	41
4.4	Testes realizados . . . . .	43
4.4.1	Tempo de estabilização dos LEDs . . . . .	43
4.4.2	Mudança de temperatura no sistema proposto . . . . .	44
4.4.3	Variação de corrente nos emissores . . . . .	46
4.4.4	Controle de temperatura . . . . .	47
4.5	Medida do sinal de tensão de saída . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>52</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	53
	<b>Referências</b>	<b>54</b>
	<b>Apêndice A – Esquemático dos Circuitos Eletrônicos</b>	<b>59</b>
A.1	Placa do sensor pontual infravermelho . . . . .	60
A.2	Placa driver LEDs . . . . .	62
A.3	Placa de controle do driver . . . . .	63
A.4	Placa do sistema de controle de temperatura . . . . .	64
	<b>Apêndice B – Artigo publicado no ICNTET 2018 (<i>International Conference On New Trends In Engineering &amp; Technology</i>)</b>	<b>65</b>

Anexo A - <i>Datasheet</i> do fotodiodo PD24-03	72
Anexo B - <i>Datasheet</i> do conversor analógico-digital ADS1220	76
Anexo C - <i>Datasheet</i> dos emissores utilizados	78

# Lista de Figuras

2.1	Infravermelho vibracional em comparação com outros tipos de radiação. . . . .	5
2.2	Diferentes técnicas de amostragem: (a) Transmitância, (b) Reflexão total atenuada, (c) Reflexão difusa, (d) Reflexão Especular. . . . .	7
2.3	Troca radioativa entre superfícies diferenciais difusas. . . . .	9
2.4	Elementos diferenciais dentro de uma esfera. . . . .	10
2.5	Esfera de integração com abertura de entrada e saída. . . . .	12
2.6	Variação do multiplicador da esfera em relação a fração de abertura. . . . .	14
2.7	Construção de um filtro óptico de banda passante. . . . .	15
3.1	Diagrama de blocos do protótipo. . . . .	16
3.2	Estrutura óptica do sistema. . . . .	18
3.3	Seções da esfera de integração: (a) Parte superior da esfera, (b) Parte inferior da esfera, (c) Suporte para os LEDs. . . . .	19
3.4	Vista explodida da estrutura da esfera. . . . .	20
3.5	Possíveis valores do multiplicador da esfera. . . . .	22
3.6	Banda passante do filtro de 1.400 nm. . . . .	23
3.7	Banda passante do filtro de 1.650 nm. . . . .	23
3.8	Banda passante do filtro de 2.000 nm. . . . .	24
3.9	Circuito de acionamento do LED A. . . . .	25
3.10	Circuito de transimpedância e compensação de <i>offset</i> . . . . .	27
3.11	Circuito de pré-amplificação e Lock-In. . . . .	28
3.12	Circuito Sallen-key passa-baixas e <i>buffer</i> . . . . .	29
3.13	Espectro de emissão do LED23-PR para diferentes temperaturas. . . . .	30
3.14	Estrutura projetada para controle de temperatura. . . . .	30

3.15	Circuito da ponte H. . . . .	31
3.16	Testes realizados com o sistema: (a) Superfície reflexiva posicionada na abertura para amostra, (b) Filtro posicionado na abertura para amostra. . . . .	33
4.1	Foto do protótipo desenvolvido. . . . .	34
4.2	Foto do interior da estrutura com controle de temperatura. . . . .	35
4.3	Placa de desenvolvimento <i>ARM</i> para coleta de dados do conversor A/D. . . . .	36
4.4	Fotos da esfera de integração utilizada no projeto: (a) Interior com revestimento de BaSO <sub>4</sub> , (b) Metade inferior e superior da esfera de integração. . . . .	37
4.5	Foto do posicionamento dos LEDs na base projetada. . . . .	37
4.6	Filtros utilizados para teste: (a) Filtros passa-banda, (b) Posicionamento do filtro no sistema. . . . .	38
4.7	Foto da interface do protótipo. . . . .	39
4.8	Visualização da resposta do conversor A/D em <i>bits</i> . . . . .	40
4.9	Configuração dos LEDs: (a) Módulo 1, (b) Módulo 2. . . . .	41
4.10	Sinal de saída do circuito de transimpedância. . . . .	42
4.11	Sinal de <i>clock</i> dos emissores. . . . .	42
4.12	Tempo de estabilização da emissão do conjunto de LEDs. . . . .	44
4.13	Tensão para diferentes temperaturas. . . . .	46
4.14	Estabilização da temperatura no sistema proposto. . . . .	48
4.15	Dispersão das trinta medidas em torno da média 1,5033 V, com LED de 1.450 nm desligado, com desvio padrão de $1,2106 \cdot 10^{-3}$ V. . . . .	50
4.16	Sobreposição das respostas dos filtros ópticos e região de emissão dos LEDs. . . . .	50
A.1	Diagrama esquemático da placa do sensor pontual - Estágios. . . . .	60
A.2	Diagrama esquemático da placa do sensor pontual - Conectores, alimentação e A/D. . . . .	61

A.3	Diagrama esquemático da placa de driver dos LEDs. . . . .	62
A.4	Diagrama esquemático da placa de controle do driver dos LEDs. .	63
A.5	Diagrama esquemático da placa do controle de temperatura. . . .	64

# Lista de Tabelas

2.1	Regiões espectroscópicas de interesse para análise química. . . . .	6
3.1	Filtros utilizados nos testes. . . . .	22
3.2	LEDs adotados para o protótipo. . . . .	26
4.1	Conexão dos LEDs nos módulos de emissão. . . . .	40
4.2	Leitura da tensão de saída do circuito de condicionamento, ponto V3, em diferentes temperaturas. . . . .	45
4.3	Leitura da tensão no ponto V3 para diferentes valores de corrente nos LEDs. . . . .	47
4.4	Resultados da média e desvio padrão das trinta medidas realizadas, para os modos de acionamento dos emissores, do sistema com superfície reflexiva no porta amostras e a contribuição de cada emissor. . . . .	49
4.5	Resultados da média e desvio padrão das trinta medidas realizadas com cada filtro óptico no porta amostras. . . . .	49



# Lista de Abreviaturas

- ABS** *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (Acrilonitrila Butadieno Estireno)
- A. D.** *Anno Domini*
- a.u.** *Arbitrary Unit* (Unidade Arbitrária)
- A/D** *Analog-to-digital* (Analógico para Digital)
- ASTM** *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para Teste de Materiais)
- BaSO<sub>4</sub>** Sulfato de Bário
- CAD** *Computer-Aided Design* (Desenho assistido por computador)
- CAN** *Controller Area Network*
- CD** *Compact Disco* (Disco Compacto)
- CI** Circuito Integrado
- CWL** *Center Wavelength* (Comprimento de Onda Central)
- ESR** *Electron Spin Resonance* (Ressonância de Spin Eletrônico)
- FIR** *Far Infrared* (Infravermelho Distante)
- FWHM** *Full Width at Half Maximum* (Largura à Meia Altura)
- GaInAsSb** *Gallium Indium Arsenide Antimonide*
- I<sup>2</sup>C** *Inter-Integrated Circuit* (Circuito Inter-Integrado)
- IR** *Infrared* (Infravermelho)
- NIR** *Near Infrared* (Infravermelho Próximo)
- NMR** *Nuclear Magnetic Resonance* (Ressonância Magnética Nuclear)
- PI** Proporcional-Integral
- PPB** Partes por Bilhão

**PTFE** Politetrafluoretileno

**PWM** *Pulse-Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso)

**SNR** *Signal-to-Noise Ratio* (Relação Sinal-Ruído)

**SPI** *Serial Peripheral interface* (Interface Periférica Serial)

**UV-VIS** Ultravioleta-visível

# 1 Introdução

---

Muitas técnicas são adotadas para qualificar determinadas substâncias em misturas complexas através da observação da interação dessas substâncias com a radiação eletromagnética. As ligações químicas presentes nas moléculas absorvem energia em comprimentos de onda específicos e, medindo-se a intensidade de luz que atravessa ou é refletida por uma amostra, é possível mensurar a quantidade da substância de interesse. Esse princípio é utilizado em vários equipamentos que são utilizados para, por exemplo, identificar misturas em pó para aplicação em indústrias farmacêutica e processos alimentícios (MAHONY et al., 2018), análise de qualidade de frutas (SHEN et al., 2017), análise de minerais (LIANCUN et al., 2017), monitorar a qualidade do leite de vaca durante a ordenha (KAWAMURA et al., 2007). No entanto, quanto maior a faixa do espectro de luz analisada por esses equipamentos, mais caros se tornam.

Para contornar os altos valores dos equipamentos comerciais diversos autores propuseram instrumentos portáteis, baseados no mesmo princípio físico dos equipamentos de bancada, para aplicações específicas. Pode-se citar os protótipos desenvolvidos para tipagem sanguínea ABO e fator Rh (FERNANDES et al., 2015), medição de parâmetros de maturação de uvas para fabricação de vinho (LARRAIN; GUESALAGA; AGOSIN, 2008), medição de fluxo e oxigenação sanguínea em tecidos (YU; SHANG, 2011). Alguns destes protótipos utilizaram-se de LEGO para construção de suportes para os componentes ópticos no desenvolvimento de espectrofotômetros para uso educacional (KNAGGE; RAFTERY, 2002; ALBERT; TODT; DAVIS, 2012).

Todos os protótipos citados anteriormente possuem em comum a faixa do espectro observada. Esses protótipos medem a intensidade de luz em comprimentos de onda abaixo de 1.100 nm, ou seja, são protótipos voltados para a região do ultravioleta e visível (UV-VIS). Um espectrofotômetro típico consiste, basicamente, em uma fonte de luz, um monocromador, e um detector. A fonte de luz empregada pode ser uma lâmpada de deutério, que emite radiação eletromagnética na região ultravioleta, e uma segunda fonte de luz como uma lâmpada de tungstênio, para a região do visível (PAVIA et al., 2009). O monocromador é o componente responsável por separar o feixe de luz em comprimentos de onda distintos e, para que esse princípio físico ocorra, um CD (*Compact Disk*) pode ser empregado,

como descritos nos trabalhos de Veras et al. (2009) e Taha et al. (2017).

Outra forma de separar os comprimentos de onda é com a utilização de LEDs como fonte de luz, o que dispensa o uso do monocromador. Os LEDs possuem banda mais estreita que outras fontes de luz, o que os torna ideais para aplicações onde os compostos analisados absorvem a radiação em comprimentos de onda conhecidos. Um sistema óptico para medir a concentração de dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre com resolução abaixo de 1 ppb (partes por bilhão) e ozônio abaixo de 30 ppb foi desenvolvido por Degner et al. (2010) com uso de LEDs com pico de emissão em cinco comprimentos de onda distintos. O trabalho proposto por Dantas et al. (2017) utilizou LEDs com pico de emissão em sete comprimentos de onda distintos para detecção de adulteração de álcool etílico hidratado por água ou metanol. Ambos os trabalhos obtiveram resultados satisfatórios com emprego desse tipo de fonte de luz em seus protótipos.

Neste trabalho, é apresentado o projeto e desenvolvimento de um protótipo opto-eletrônico para qualificação de substâncias em misturas não homogêneas ou que apresentem reflectância semi-direcionada. A faixa de interesse vai de 1.400 nm a 2.250 nm (faixa NIR - *Near Infrared*). O sistema utiliza como fontes de luz dez LEDs com emissão no infravermelho, sendo cinco comprimentos distintos, onde a luz emitida pelas fontes é refletida múltiplas vezes dentro de uma esfera de integração antes de ser detectada por um sensor pontual. O nível de tensão fornecido pelo circuito de condicionamento do sinal do sensor, juntamente com tratamentos quimiométricos, inferem se houve absorção em determinado comprimento de onda podendo, assim, determinar a presença de certa substância na amostra.

Na literatura, pode-se destacar outros autores que também propuseram protótipos que medem a absorção da luz em comprimentos de onda na faixa do infravermelho próximo com uso de LEDs. É o caso, por exemplo, dos trabalhos de Moreira et al. (2016) e Ribeiro et al. (2016), para quantificação de água no leite, o de Gentilin et al. (2016), para medição de umidade em café em pó, o de Moreira, Felício e França (2018), para detecção de fraude por adição de álcool na gasolina. Nesses trabalhos (MOREIRA et al., 2016; RIBEIRO et al., 2016; GENTILIN et al., 2016; MOREIRA; FELÍCIO; FRANÇA, 2018), a absorção da potência luminosa foi observada em menos que cinco comprimentos de onda diferentes.

## 1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho foi desenvolver um protótipo para qualificação de substâncias no infravermelho próximo. O sistema projetado apresenta emissão de luz no espectro infravermelho, sensor para análise de absorção do espectro e controle de temperatura para garantia de estabilidade dos componentes utilizados.

Os estágios de desenvolvimento do protótipo são apresentados circunstanciadamente para que trabalhos futuros possam ser desenvolvidos e a estrutura utilizada possa ser modificada para análise de outras substâncias com uso de espectroscopia NIR.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em quatro capítulos, sendo o primeiro uma introdução ao tema apresentando a relevância do estudo e o objetivo geral do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre a espectroscopia NIR, descrição sobre a esfera de integração, e breve resumo sobre filtros ópticos.

No Capítulo 3 são descritas as partes que compõem o sistema proposto, bem como os circuitos utilizados para acionamento dos emissores, condicionamento de sinal do fotodiodo e controle de temperatura do sistema.

Por fim, no Capítulo 4, são mostrados os resultados obtidos com uso de filtros ópticos e possíveis aplicações para o protótipo desenvolvido.

## 2 Fundamentação Teórica

---

Este capítulo apresenta, brevemente, conceitos fundamentais envolvidos no trabalho possibilitando o entendimento do princípio de funcionamento do protótipo proposto, assim como sobre a técnica de detecção adotada.

### 2.1 Espectroscopia NIR

#### 2.1.1 História da espectroscopia no infravermelho

A interação da luz com a matéria tem sido objeto de discussão durante muitos séculos. Registros evidenciam que estudos sobre a refração da luz em uma variedade de materiais transparentes em 130 A. D., por Ptolomeu, em seu tratado Óptica e, em 1305, por Von Freiburg que simulou a estrutura do arco-íris com uso de esferas vítreas cheias de água (BURNS, 2007). No entanto somente em meados do século XVIII através dos trabalhos de Snell, Huygens, Newton, Bradley, e Priestly, as leis de refração e reflexão da luz foram formuladas e também, onde a natureza ondular e corpuscular da luz foi proposta ao longo dos estudos realizados.

Em 1800, o compositor e astrônomo alemão, William Herschel, demonstrou a existência da radiação infravermelha pela primeira vez. Herschel (1800) descreveu seu experimento para medir a energia da luz solar, após decompô-la com um prisma, com uso de termômetros para medir o calor produzido por cada faixa de luz. Após a faixa vermelha, onde não há luz visível, a temperatura continuou a ter um incremento.

No entanto, até o início do século XX, estudos sobre a luz e espectroscopia no infravermelho evoluíram em paralelo. Na primeira parte do século XX, a espectroscopia foi desenvolvida a um nível fundamental. O estudo e desenvolvimento de métodos analíticos baseados na espectroscopia NIR foi tema de trabalhos de Karl H. Norris nos anos 60 (HART; NORRIS; GOLUMBIC, 1962) onde os primeiros resultados foram publicados em 1965 (WEXLER; STANDARDS, 1965) e republicados em uma edição especial do *Journal of Near Infrared Spectroscopy* em 1996 (NORRIS; HART, 1996). A partir dos anos 70, o número de publicações sobre espectroscopia NIR aplicada ao setor agrícola e alimentício cresceu absurdamente

(PASQUINI, 2003; SUN, 2009).

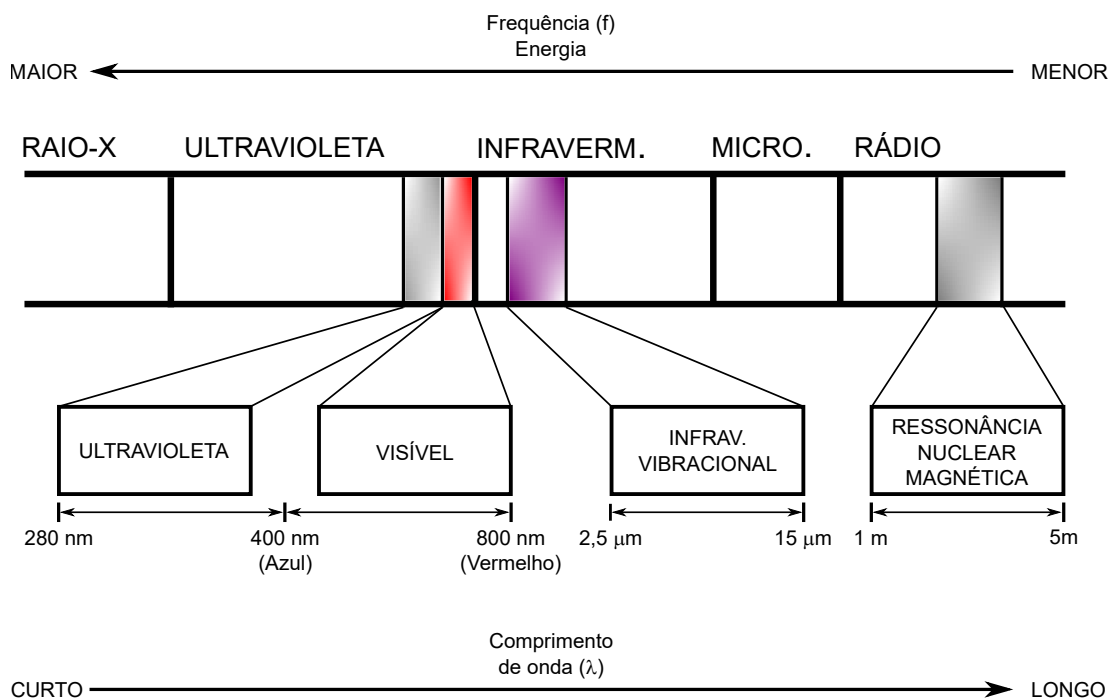
### 2.1.2 Fundamentação

Quase todos os composto com ligações covalentes, sejam orgânicos ou inorgânicos, absorvem várias frequências de radiação na região infravermelha do espectro eletromagnético. A região infravermelha tem comprimentos de onda mais longos que os associados a luz visível, em contrapartida, possuem comprimentos de onda mais curtos que a região de micro-ondas que possuem comprimentos maiores que 1 mm. Para propósitos químicos, o interesse está situado na porção vibracional da região infravermelha (PAVIA et al., 2009).

A Figura 2.1 mostra que o comprimento de onda,  $\lambda$ , é inversamente proporcional a frequência,  $f$ , dada pela relação

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (2.1)$$

**Figura 2.1:** Infravermelho vibracional em comparação com outros tipos de radiação.



Fonte: Adaptado de (PAVIA et al., 2009).

onde  $c$  é a velocidade da luz. Pela Figura 2.1 também pode-se observar que a energia  $E$  é diretamente proporcional a frequência,

$$E = hf, \quad (2.2)$$

onde  $h$  é a constante de Planck. Observando a Equação (2.2) e a Figura 2.1 nota-se que a maior radiação de energia corresponde a região raio-x do espectro, onde a energia é grande o suficiente a ponto de quebrar as ligações moleculares. No outro extremo do espectro têm-se a rádio frequência, onde a energia é suficiente apenas para causar transições rotacionais eletrônicas ou nuclear nas moléculas, ou seja, ressonância magnética nuclear (NMR) ou ressonância de *spin* eletrônico (ESR).

A Tabela 2.1 mostra, resumidamente, as regiões do espectro e as características observadas em cada uma. Várias dessas regiões, incluindo o infravermelho, dão informações vitais sobre as estruturas das moléculas orgânicas.

**Tabela 2.1:** Regiões espectroscópicas de interesse para análise química.

Região	Número de Onda - $\text{cm}^{-1}$ (Comprimento de Onda nm)	Característica Medida
Ultravioleta	52.632 – 27.778 (190 – 360)	Transição eletrônica: deslocamento de elétrons Pi
Visível	27.778 – 12.821 (360 – 780)	Transição eletrônica: medição de cor
Infravermelho Próximo (NIR)	14.493 – 3.333 (690 – 3000) ou 12.821 – 4.000 (780 – 2.500) <sup>1</sup>	Sobretons e bandas de combinação de vibrações moleculares fundamentais, especialmente estiramento e dobramento (algumas deformações também)
Infravermelho (IR)	4.000 – 400 (2.500 – 25.000)	Vibrações moleculares fundamentais: estiramento, dobramento, balanço, tesoura
Infravermelho Distante (FIR ou Terahertz)	400 – 10 ( $2,5 \times 10^4 - 10^6$ )	Rotação molecular

<sup>1</sup> Definição oficial ASTM (*American Society for Testing and Materials*)

Fonte: Adaptado de (WORKMAN; WEYER, 2012).

Constantemente usa-se a unidade chamada número de onda ( $\bar{\nu}$ ) no lugar de comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ ). O número de onda é expresso em  $\text{cm}^{-1}$ , ou seja, é o inverso do comprimento de onda,



$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.3)$$

Para converter o número de onda  $\bar{\nu}$  para frequência  $f$  multiplica-se a Equação (2.3) pela velocidade da luz  $c$ ,

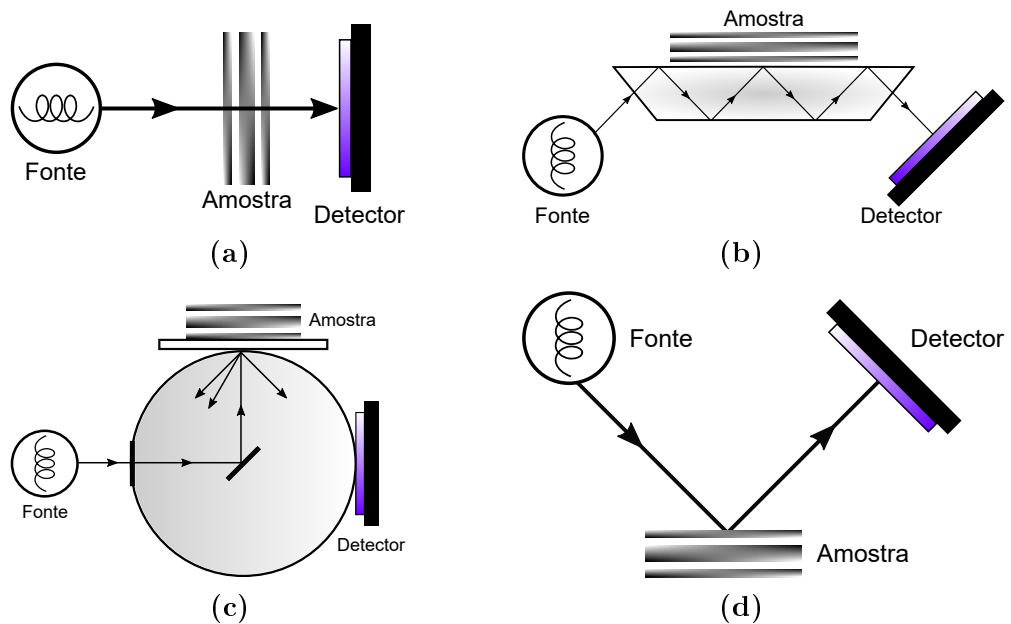
$$f = \bar{\nu}c = \frac{c}{\lambda}. \quad (2.4)$$

A principal razão para o uso do número de onda como unidade é a proporção direta de energia, ou seja, quanto maior o número de onda, maior a energia correspondente (PAVIA et al., 2009).

### 2.1.3 Métodos de amostragem utilizados na espectroscopia

Existem vários métodos de amostragem associados a espectroscopia. Cada técnica possui suas próprias vantagens e limitações, logo, convém estudá-las para aplicações específicas. Alguns exemplos de técnicas de amostragem são ilustradas na Figura 2.2.

**Figura 2.2:** Diferentes técnicas de amostragem: (a) Transmitância, (b) Reflexão total atenuada, (c) Reflexão difusa, (d) Reflexão Especular.



Fonte: Adaptado de (SUN, 2009).

A seguir uma breve descrição das técnicas apresentadas em Sun (2009):

- **Transmitância:** Apresentada na Figura 2.2(a) é, provavelmente, o método mais simples. A técnica consiste em atravessar diretamente a radiação infravermelha na amostra, com o sistema de detecção posicionado logo após. No entanto, essa técnica é limitada pela espessura da amostra preparada e, também, envolve o tempo de preparação da mesma. Geralmente é utilizada para análise de sólidos, líquidos ou gases. Essa técnica foi utilizada por Rahim et al. (2011), juntamente com aplicação de lógica Fuzzy, para identificar o nível de doçura em uma espécie de mamão.
- **Reflexão:** O princípio da reflexão consiste em medir a radiação refletida da amostra a ser analisada. Ao contrário da transmitância, a reflexão não é limitada pela espessura do analito e nem pelo tempo de preparação. Muito utilizada por ser uma técnica não-destrutiva e possuir relação sinal-ruído (SNR) tipicamente menor que a transmitância. Dentre os tipos de métodos de reflexão tem-se:
  - **Total atenuada:** Quando um feixe infravermelho atravessa de um meio com alto índice de refração para um meio com baixo índice (ver Figura 2.2(b)). Apesar desse método não ser afetado pela espessura da amostra, há perda de luz na reflexão. Baldauf et al. (2007) utilizou essa técnica para monitorar a contaminação bacteriana em alimentos, com manipulação mínima da amostra.
  - **Difusa:** Quando um feixe infravermelho é refletido pela amostra em direções aleatórias, envolvendo dispersão e absorção. Uma esfera de integração é utilizada nessa técnica (Figura 2.2(c)) e será melhor explicada na próxima seção. Por se tratar de uma técnica não-destrutiva, foi utilizada por Cai et al. (2010) para análise da quantidade de gordura, proteína e água em amostras de carne suína.
  - **Especular:** Quando o ângulo de incidência da luz é igual ao ângulo de reflexão ocorre a reflexão especular (Figura 2.2(d)). Essa técnica requer uma amostra com superfície lisa, no entanto, em amostras com algum revestimento pode ocorrer que o raio também atravesse a amostra, envolvendo ambos os processos, absorbância e reflexão. A esse fenômeno é dado o nome de dupla transmissão. A reflectância especular é usada, principalmente, na análise de polímeros (AMMA et al., 2015).

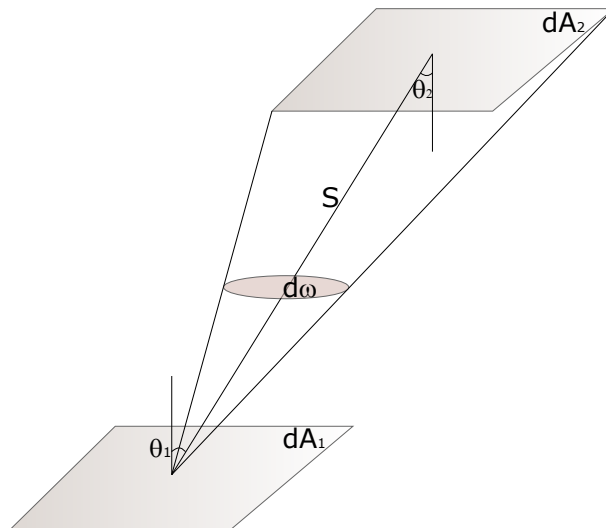
## 2.2 Esfera de integração

A esfera integradora é um dispositivo para medição de radiação óptica. A função da esfera é integrar espacialmente o fluxo radiante. A teoria da esfera de integração origina-se no princípio de troca de radiação dentro de um recinto com superfícies difusas, definida pela Lei de Lambert, apresentada nos trabalhos (NICODEMUS, 1963), (SANDGREN, 2011), (REIS, 2001).

### 2.2.1 Troca de radiação dentro de superfície esférica

Considere a troca de radiação entre dois elementos diferenciais de superfícies difusas, como mostrado na Figura 2.3, onde  $S$  é a distância entre as áreas infinitesimais  $dA_1$  e  $dA_2$ ,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são os ângulos formados entre a normal da superfície e a linha de radiação e  $d\omega$  o ângulo sólido.

**Figura 2.3:** Troca radioativa entre superfícies diferenciais difusas.



Fonte: Adaptado de (ARAÚJO; FIALHO, 2015).

A fração de energia que deixa  $dA_1$  e chega em  $dA_2$  é chamada de fator de forma,  $F_{ij}$ , ou seja, a quantidade geométrica correspondente à fração da radiação que abandona a superfície  $i$  e que é intersectada pela superfície  $j$ , dada por

$$F_{dA_i-dA_j} = \frac{\text{Energia que atinge } dA_j \text{ proveniente de } dA_i}{\text{Energia total que deixa } dA_i}. \quad (2.5)$$

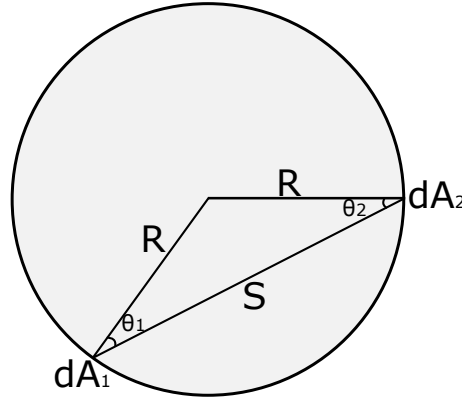
No trabalho desenvolvido por Barreto (2008) é mostrado o desenvolvimento de (2.5) onde chega-se a

$$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2, \quad (2.6)$$

sendo  $\pi$  o ângulo sólido projetado total da superfície.

Considere dois elementos diferenciais,  $dA_1$  e  $dA_2$ , dentro de uma esfera de superfície difusa, como representado na Figura 2.4.

**Figura 2.4:** Elementos diferenciais dentro de uma esfera.



Fonte: Adaptado de (SANDGREN, 2011).

Conforme teoria de Labsphere INC. (2017a), nessa configuração, a distância  $S$  é dada por  $S = 2R \cos \theta_1 = 2R \cos \theta_2$ . Substituindo na Equação (2.6),

$$\begin{aligned} dF_{dA_1-dA_2} &= \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi (2R \cos \theta_1)^2} dA_2, \\ dF_{dA_1-dA_2} &= \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_1}{\pi 4R^2 (\cos \theta_1)^2} dA_2, \\ dF_{dA_1-dA_2} &= \frac{dA_2}{4\pi R^2}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Esse resultado é significativo, pois independe do ângulo de incidência e da distância entre as áreas. Com isso, mostra-se que a fração do fluxo luminoso recebida por  $dA_2$  é a mesma para qualquer ponto da superfície da esfera.

Para uma situação em que a área infinitesimal  $dA_1$  troca radiação com uma área finita  $A_2$ , a Equação (2.7) torna-se,

$$\begin{aligned}
dF_{dA_1-A_2} &= \frac{1}{4\pi R^2} \int_{A_2} dA_2, \\
dF_{dA_1-A_2} &= \frac{A_2}{4\pi R^2}.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Como o resultado também independe de  $dA_1$ ,

$$\begin{aligned}
F_{1-2} &= \frac{A_2}{4\pi R^2}, \\
F_{1-2} &= \frac{A_2}{A_s},
\end{aligned} \tag{2.9}$$

onde  $A_s$  é a área total da superfície da esfera.

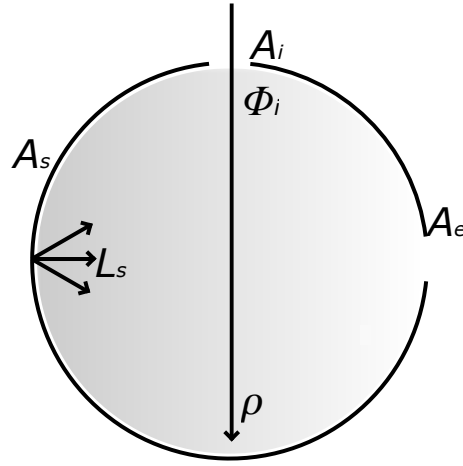
### 2.2.2 Equacionamento da radiação na esfera de integração

Segundo descrito em SphereOptics LLC (2007), a luz incidente em uma superfície difusa cria uma fonte de luz virtual por reflexão. A luz emanada pela superfície é melhor descrita por sua radiância, ou seja, densidade de fluxo por unidade do ângulo sólido. A radiância é importante para predizer a quantidade de fluxo que será coletada por um sistema óptico. A radiância,  $L_s$ , de uma superfície difusa, para um fluxo de entrada,  $\Phi_i$ , é dada por

$$L_s = \frac{\Phi_i \rho}{\pi A_s}, \tag{2.10}$$

onde  $\rho$  é a reflectância da parede da esfera. A radiância é dada em  $[(W \cdot sr)/m^2]$ .

Para a esfera de integração, a equação da radiância deve considerar tanto as reflexões múltiplas quanto as perdas que ocorrem através das aberturas de entrada e saída. Considere uma esfera com fluxo de entrada,  $\Phi_i$ , área de entrada,  $A_i$ , área de saída,  $A_e$ , e área total,  $A_s$ , como pode ser observado na Figura 2.5.

**Figura 2.5:** Esfera de integração com abertura de entrada e saída.

Fonte: Adaptado de (LABSPHERE INC., 2017b).

O fluxo de entrada é perfeitamente difuso pela reflexão inicial. A quantidade de fluxo incidente em toda superfície da esfera, após a primeira reflexão ( $n = 1$ ), é dada por,

$$\Phi_{incidente, n=1} = \Phi_i \rho \left( \frac{A_s - A_i - A_e}{A_s} \right). \quad (2.11)$$

Na Equação (2.11), o valor entre parênteses denota a fração de fluxo recebida pela superfície da esfera que não é perdida pelas aberturas. O termo pode ser calculado como  $(1 - f)$ , onde  $f$  é a fração  $f = (A_i + A_e)/A_s$ . Quando há mais de duas aberturas,  $f$  é calculado como a soma de todas as aberturas.

A quantidade de fluxo incidente na superfície da esfera após a segunda reflexão ( $n = 2$ ) é dada por,

$$\Phi_{incidente, n=2} = \Phi_i \rho^2 (1 - f)^2. \quad (2.12)$$

Para a terceira reflexão ( $n = 3$ ),

$$\Phi_{incidente, n=3} = \Phi_i \rho^3 (1 - f)^3. \quad (2.13)$$

Após  $n$  reflexões, o fluxo total incidente sobre toda a superfície da esfera é,

$$\Phi_{\text{incidente}, n \rightarrow \infty} = \Phi_i \rho (1-f) \{1 + \rho(1-f) + \dots + \rho^{n-1}(1-f)^{n-1}\}. \quad (2.14)$$

Expandindo o termo da somatória da Equação (2.14) para uma série de potência infinita, dado que  $\rho(1-f) < 1$ , esse termo é reduzido para,

$$\Phi_{\text{incidente total}} = \frac{\Phi_i \rho (1-f)}{1 - \rho(1-f)}. \quad (2.15)$$

A Equação (2.15) indica que o fluxo incidente total sobre a superfície da esfera é maior que o fluxo de entrada devido a reflexões múltiplas dentro da cavidade. Logo, a radiância da superfície da esfera dada pela Equação (2.10), pode ser reescrita como,

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{\Phi_i}{\pi A_s (1-f)} \cdot \frac{\rho(1-f)}{1 - \rho(1-f)}, \\ L_s &= \frac{\Phi_i}{\pi A_s} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1-f)}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

A Equação (2.16) é utilizada para prever a radiância da esfera de integração para um determinado fluxo de entrada em função do diâmetro da esfera, refletância e fração das aberturas. Importante notar que a radiância diminui conforme o diâmetro da esfera aumenta.

### 2.2.3 Fator multiplicador da esfera

Analisando os termos multiplicativos da Equação (2.16), nota-se que o primeiro termo é aproximadamente igual a Equação (2.10) e o segundo é uma quantidade, adimensional, chamada de multiplicador da esfera,  $M$ , dado por (LABSPHERE INC., 2017b):

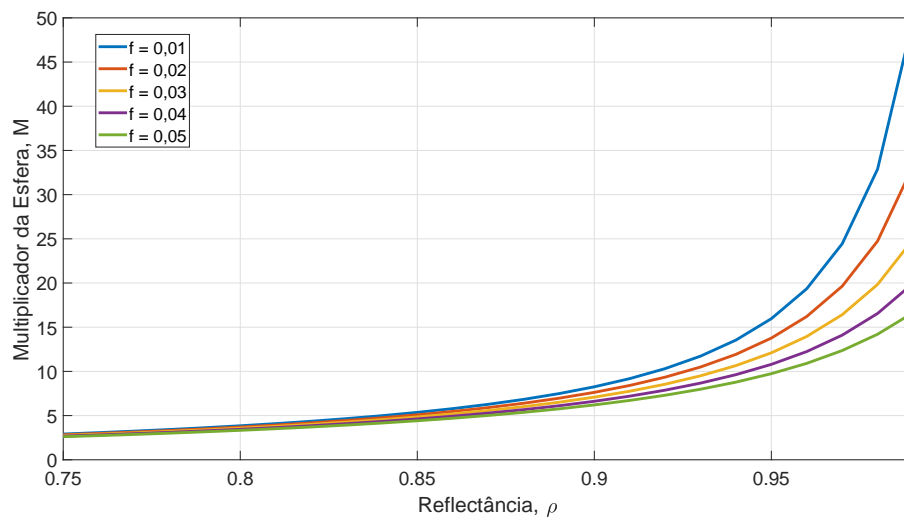
$$M = \frac{\rho}{1 - \rho(1-f)}. \quad (2.17)$$

Este multiplicador representa o aumento da luminosidade devido as múltiplas reflexões. A Equação (2.17) mostra a magnitude do multiplicador da esfera,  $M$ , e sua dependência tanto da fração das aberturas,  $f$ , quanto da reflectância da superfície da esfera,  $\rho$ .

Na prática, para a maioria das esferas comerciais, obtêm-se valores aproximados de  $0,94 < \rho < 0,99$  e  $0,02 < f < 0,05$ , com isso o multiplicador da esfera está na faixa de 10 a 30.

Para ilustrar a relação do multiplicador com a fração de abertura das portas, o gráfico apresentado na Figura 2.6 mostra as curvas relacionadas a cinco valores diferentes de  $f$ . Assumindo que  $\rho$  seja o maior valor da faixa (0,99), o valor do multiplicador será  $M = 16$  para  $f = 0,05$ , enquanto que para  $f = 0,01$ , o valor de  $M$  será aproximadamente 50.

**Figura 2.6:** Variação do multiplicador da esfera em relação a fração de abertura.



Fonte: Elaborado pela autora.

## 2.3 Filtros Ópticos

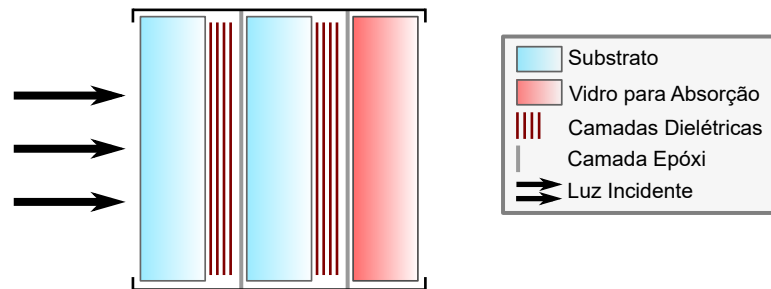
Os filtros ópticos são componentes com características intrínsecas de reflexão e transmissão de luz. Os filtros podem bloquear ou transmitir a luz incidente de determinado comprimento de onda (BORGES, 2007). São largamente utilizados em sensores, equipamentos opto-eletrônicos, aplicações industriais, entre outros (SINHA; GARG; DEORI, 2003; CORREIA; EMADI; WOLFFENBUTTEL, 2007; FRIEBELE, 1998).

Os filtros são desenvolvidos depositando camadas de material na superfície de um substrato. Tipicamente, há diversas camadas dielétricas separadas por espaçadores. A pilha dielétrica é composta de camadas alternadas de material de



alto índice dielétrico e material de baixo índice dielétrico. A espessura de cada camada na pilha é de  $\lambda/4$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda central da banda passante do filtro. Os espaçadores são colocados entre as camadas dielétricas e tem espessura de  $n\lambda/2$ , onde  $n$  é um número inteiro. Esses espaçadores podem ser formados a partir de camadas de vidro colorido, epóxi, dentre outros materiais (THORLABS, 2018a). Para facilidade de manuseio e, também, proteção, o filtro é montado em um anel metálico. A Figura 2.7 mostra a construção usual de um filtro óptico.

**Figura 2.7:** Construção de um filtro óptico de banda passante.



Fonte: Adaptado de (THORLABS, 2018a).

Há a formação de uma cavidade Fabry-Perot devido as camadas espaçadoras entre as pilhas dielétricas. As condições e interferências construtivas dessa cavidade permitem que o comprimento de onda central, e uma pequena banda a cada lado, seja transmitida eficientemente, enquanto interferências destrutivas da luz, isto é, comprimentos fora da banda passante, não sejam transmitidas. No entanto, a porção de comprimentos de onda bloqueados em torno do comprimento de onda central é pequena. Para aumentar a faixa de bloqueio do filtro são utilizados materiais com amplos intervalos de bloqueio para revestir as camadas espaçadoras e o substrato. Embora esses materiais sejam efetivos para bloquear a transmissão da radiação incidente, eles também diminuem o percentual de transmissão na banda passante.

O filtro destina-se a ser utilizado com luz colimada, que incide normal à superfície do filtro. Para luz não colimada ou luz que incida sobre a superfície com ângulo diferente à normal, o comprimento de onda central mudará para comprimentos de onda mais baixos e a forma da região de transmissão também sofrerá mudanças. Grandes mudanças no ângulo de incidência causam mudanças maiores no comprimento de onda central, mas também distorcem significativamente a forma da banda passante e, mais importante, causam uma diminuição significativa na transmissão da banda passante.

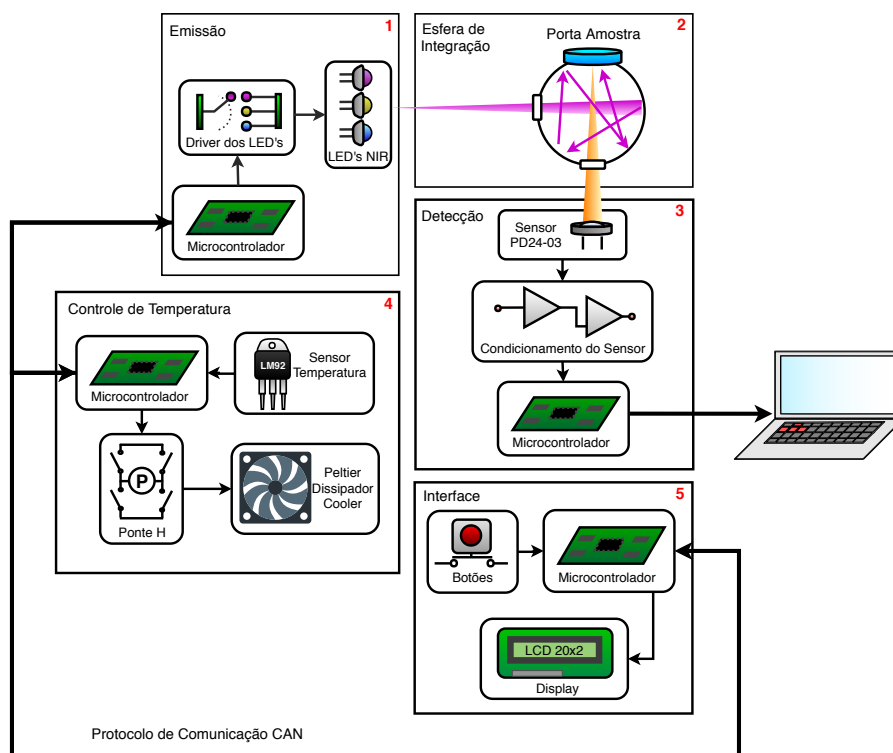
## 3 Metodologia

Este capítulo expõe, em sequência, descrição do sistema proposto, sistema óptico e circuitos utilizados para acionamento dos LEDs, condicionamento do sensor e controle de temperatura.

### 3.1 Descrição do sistema proposto

Na Figura 3.1 é apresentado o diagrama do protótipo. O sistema é composto pelos módulos de emissão, esfera de integração, detecção, interface e controle de temperatura.

**Figura 3.1:** Diagrama de blocos do protótipo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nesse protótipo adotou-se, inicialmente, um conjunto de 6 LEDs com emissão na faixa infravermelha com comprimentos de onda na faixa de 1.400 nm a 2.250 nm. Após a realização dos primeiros testes, foram adicionados mais 4 diodos emissores de luz, com mesmos comprimentos, para aumento de incidência

luminosa na esfera de integração.

Os emissores são acionados individualmente através de um circuito fonte de corrente (Figura 3.1, bloco 1), também presente nos trabalhos de Ribeiro (2015) e Dias (2017), garantindo, assim, a mesma potência luminosa em todos os acionamentos. No circuito, o microcontrolador MC9S08JM32 da NXP Semiconductors é responsável por gerar o sinal de acionamento enquanto um potenciômetro digital é usado para determinar o valor de corrente para cada emissor.

A luz emitida pelos LEDs passa por uma lente esférica de 27 mm de diâmetro e distância focal 13 mm, fabricado pela Edmund Optics, acoplada a esfera de integração para que ocorra convergência dos raios infravermelhos emitidos pelos diodos (Figura 3.1, bloco 2). Após a incidência da luz na amostra, uma parte é absorvida enquanto outra é refletida múltiplas vezes pela esfera até ser direcionada para o sensor. O fotodiodo utilizado é o modelo PD24-03 baseado em GaInAsSb, fabricado pela Roithner LaserTechnik, a qual possui faixa de sensibilidade compreendida no intervalo de 1.000 nm a 2.430 nm. O sinal recebido pelo fotodiodo é condicionado através de diferentes estágios antes de ser amostrado por um conversor A/D de 24 *bits* ADS1220 da Texas Instruments (Figura 3.1, bloco 3).

Para que a temperatura não varie e, conseqüentemente, altere as características dos componentes, foi utilizado um módulo de controle de temperatura para que seja garantido 25 °C no compartimento que contém os LEDs, esfera e sensor. Para aquecer ou esfriar o conteúdo enclausurado com o controle, foi utilizado uma pastilha Peltier (Figura 3.1, bloco 4). Para inversão de polaridade da pastilha foi usado um circuito ponte H, esquemático mostrado no Apêndice A.4.

Por último, o módulo de interface utiliza um *display* alfanumérico 20x2 para exibição da temperatura atual no invólucro e, também, para enviar comandos para o protótipos através dos botões localizados em seu painel (Figura 3.1, bloco 5).

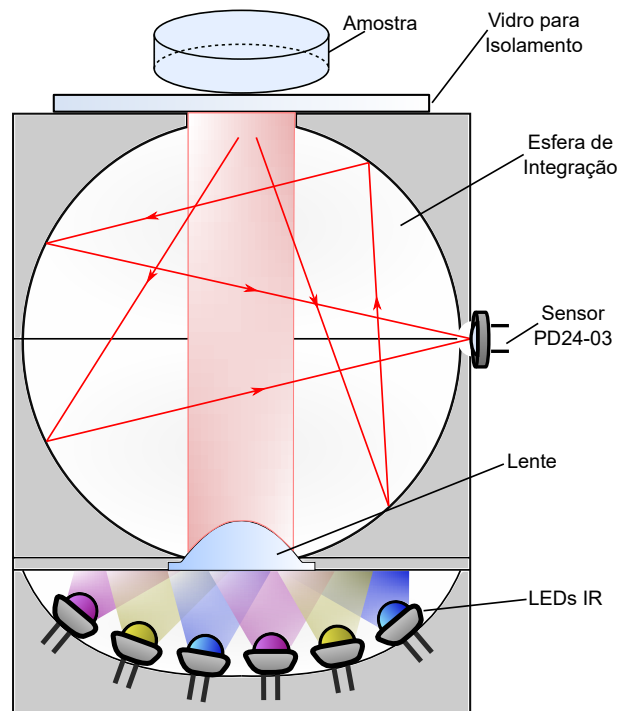
A comunicação entre os módulos é estabelecida pelo protocolo CAN (*Controller Area Network*). O CAN é um protocolo de comunicação em tempo real, com nível elevado de segurança e capacidade multi-mestre comportando, também, o conceito *multicast*, que permite que a mensagem seja transmitida a um conjunto de receptores simultaneamente.

## 3.2 Sistema óptico

### 3.2.1 Projeto da esfera de integração

A estrutura óptica do protótipo é mostrada na Figura 3.2. A estrutura é composta por uma esfera de integração com três aberturas, sendo a primeira para entrada da luz, a segunda para amostra e, a última, para saída da luz refletida para o sistema de detecção. Além da esfera de integração, o sistema contém uma lente convergente, LEDs com faixa de emissão no infravermelho, sensor de detecção e vidro de borossilicato para garantir o isolamento entre esfera e amostra.

**Figura 3.2:** Estrutura óptica do sistema.



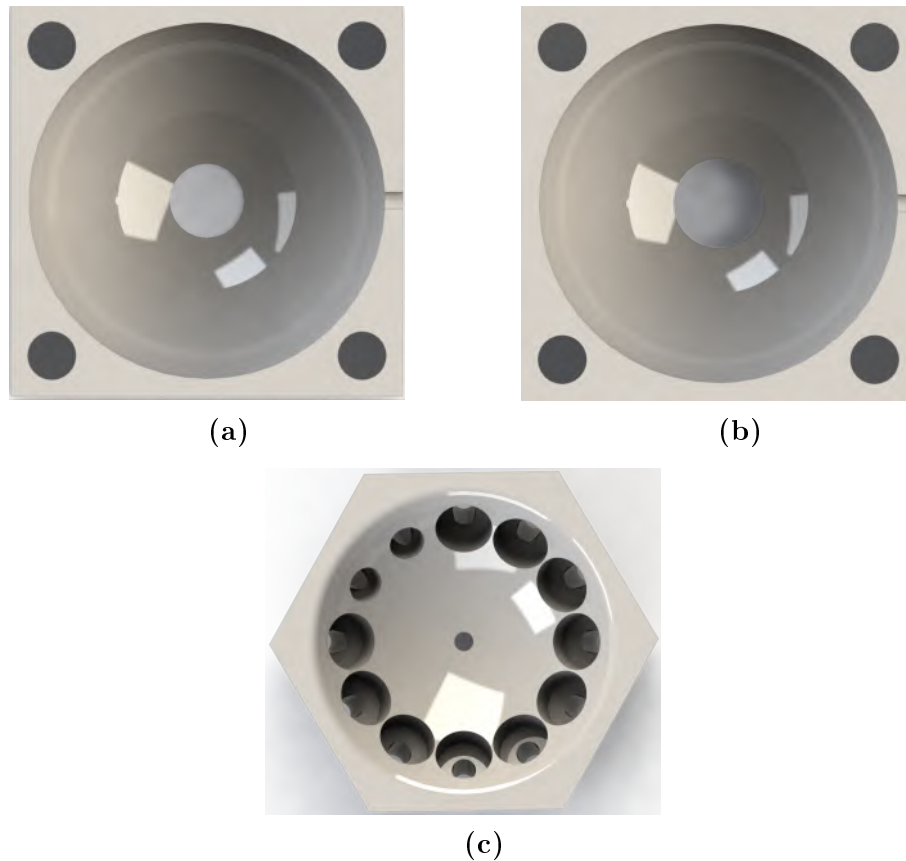
Fonte: Elaborado pela autora.

A luz emitida pelos LEDs é convergida pela lente e direcionada à abertura para a amostra, onde parte da energia será absorvida e parte refletida de forma difusa. A esfera de integração é revestida com um polímero que reflete os raios até que estes saiam pelo orifício onde encontra-se o sensor. Uma vez que os raios cheguem ao sensor, o sinal é condicionado e amostrado para posterior análise.

Esferas de integração comerciais podem ser encontradas com diâmetros a partir de 2 polegadas, porém o alto custo de aquisição a torna inibitória para certas aplicações. No entanto, é possível projetar uma esfera com materiais alternativos, como poliestireno expandido (LELOUP et al., 2015) e plástico ABS (Acrilonitrila

butadieno estireno) (DIAS et al., 2018; TOMES; FINLAYSON, 2016). Para esse protótipo, foram elaboradas peças em um *software* para projetos CAD 3D e, posteriormente, impressas em plástico ABS branco com uso de uma impressora 3D. A Figura 3.3 mostra as renderizações, realizadas pelo *software* CAD, das principais peças que compõem o projeto.

**Figura 3.3:** Seções da esfera de integração: (a) Parte superior da esfera, (b) Parte inferior da esfera, (c) Suporte para os LEDs.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 3.3(c) mostra o suporte dos LEDs com um total de doze orifícios para os LEDs, porém foram utilizados somente dez destes. Os encaixes foram projetados baseados no encapsulamento dos LEDs escolhidos, onde somente o emissor de comprimento 1.450 nm apresenta estrutura convencional de 5 mm, enquanto os demais possuem construção TO-18 com refletor parabólico. Essa peça possibilita que a estrutura torne-se modular, sendo possível trocar o posicionamento dos diferentes comprimentos e, também, aumentar o número de emissores de um determinado comprimento em detrimento de outros.

A Figura 3.4 detalha a montagem da esfera, juntamente com o suporte para lente, suporte para os LEDs, e base para fixação. O diâmetro interno adotado da esfera é 60 mm, com um orifício com 15 mm de diâmetro para entrada de luz,

outro com 12,5 mm de abertura para amostra, e um com 3 mm para sistema de detecção. A dimensão externa da junção superior/inferior da esfera é de 66x66x67 mm (largura, profundidade, altura), enquanto que a montagem completa (esfera, suporte da lente, suporte dos LEDs e base) atinge uma altura de 117 mm.

**Figura 3.4:** Vista explodida da estrutura da esfera.



Fonte: Elaborado pela autora.

Como o material ABS não apresenta índice de reflectância significativa, é necessário revesti-lo com um polímero capaz de aumentar esse fator. As esferas comerciais utilizam materiais como Spectralon™, Spectrafect™ e ouro. A faixa de resposta do Spectralon™ e do Spectrafect™ varia de 300 nm a 2.400 nm, enquanto que para revestimentos de ouro a faixa atingida é de 800 nm a 20  $\mu\text{m}$  (NEWPORT CORPORATION, 2015). Esses materiais apresentam reflectância excedente a 94% para grande parte da região NIR, porém são soluções onerosas impossibilitando, assim, sua aplicação no protótipo.

A elucidação dessa adversidade, nesse trabalho, foi um preparo de Sulfato de Bário ( $\text{BaSO}_4$ ), também utilizado em esferas comerciais, baseado na patente “*White standard paint*”, *United States Patent US 6555608 B2*, que apresenta os procedimentos para correta preparação da tinta de revestimento. A metodologia de preparo da tinta é a mesma proposta apresentada no trabalho de Dias (2017).

Para realização de testes de reflectância do polímero preparado, foram utilizadas placas de ABS com dimensão 30x30x3 mm onde foram aplicadas camadas

dessa solução para análise em equipamento comercial. No equipamento comercial foi utilizado como referência um disco de PTFE (politetrafluoretileno), com reflectância superior a 0,99. Assim que o número de camadas aplicadas a peça de ABS atingiu um valor de reflectância superior a 0,85, as peças que compõe a esfera foram revestidas, porém, o valor efetivo de reflectância da esfera não foi possível medir devido seu formato não planar, o que o torna inapropriado para o equipamento comercial.

### 3.2.2 Multiplicador da esfera

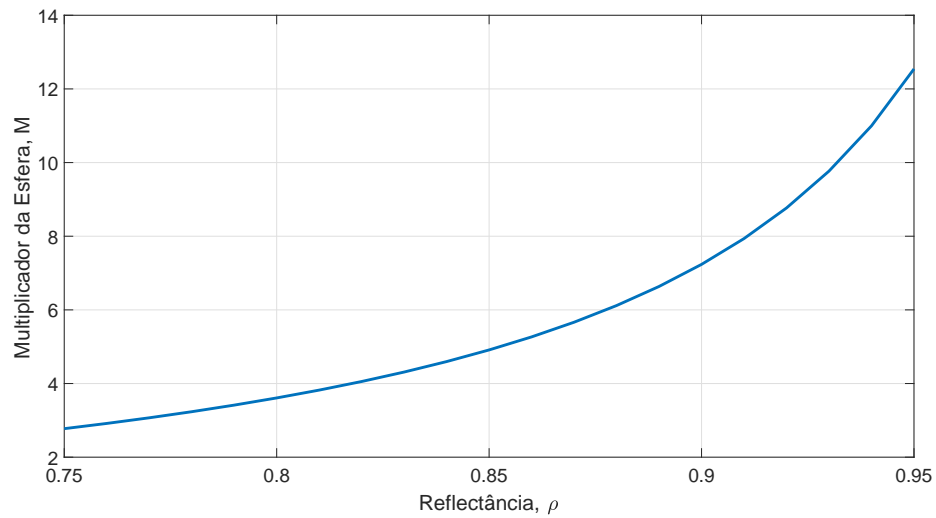
Como os parâmetros da esfera são conhecidos, com exceção da reflectância,  $\rho$ , é possível calcular a faixa de magnitude do multiplicador,  $M$ , da esfera. Sabendo-se que a fração de aberturas,  $f$ , é dada pela razão da soma de todas as aberturas pela área total da esfera, temos:

- $A_{entrada} = 56,25\pi \text{ mm}^2$ ;
- $A_{saída} = 2,25\pi \text{ mm}^2$ ;
- $A_{amostra} = 39,06\pi \text{ mm}^2$ ;
- $A_{esfera} = 3.600\pi \text{ mm}^2$ .

Logo,  $f$  é calculado por,

$$\begin{aligned} f &= \frac{(56,25\pi + 2,25\pi + 39,06\pi)}{3.600\pi}, \\ f &= 0,027. \end{aligned} \tag{3.1}$$

Utilizando a Equação (2.17), e variando o parâmetro de  $\rho$  na faixa de 0,75 a 0,95, temos os possíveis valores do multiplicador  $M$  mostrados na Figura 3.5.

**Figura 3.5:** Possíveis valores do multiplicador da esfera.

Fonte: Elaborado pela autora.

Isso indica que o valor de  $M$  encontra-se na faixa de 2,7 a 12,5. Outra definição dada ao multiplicador  $M$  é que este representa o número médio de vezes em que um fóton é espalhado pela esfera antes de ser absorvido pela superfície ou escapar através de uma das aberturas.

### 3.2.3 Filtros ópticos

Para a realização dos testes de funcionamento do protótipo foram utilizados três filtros ópticos com comprimento de onda central distintos, mostrados na Tabela 3.1. Os filtros foram fabricados pela ThorLabs e apresentam banda passante, segundo informações do fabricante, apresentadas nas Figuras 3.6 a 3.8.

**Tabela 3.1:** Filtros utilizados nos testes.

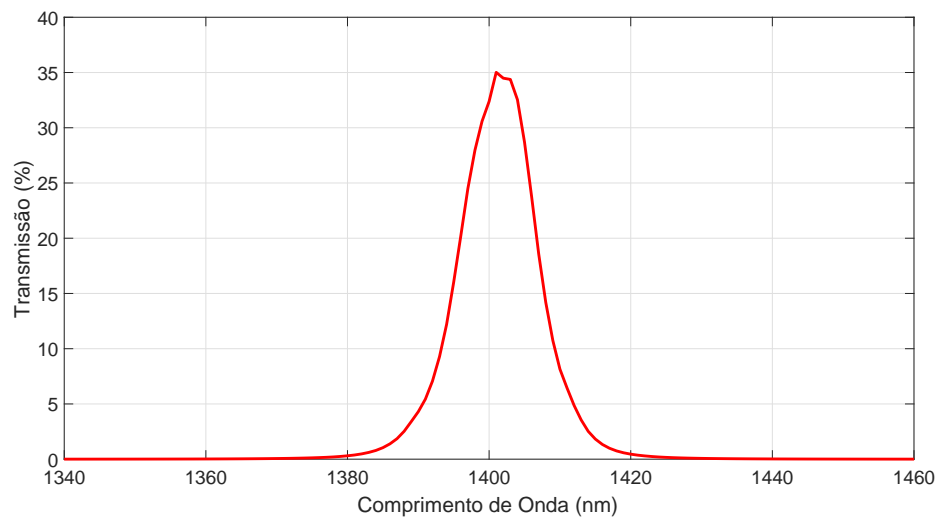
Filtro	CWL <sup>2</sup> (nm)	FWHM <sup>3</sup> (nm)
FB1400-12	1.400	12
FB1650-12	1.650	12
FB2000-500	2.000	500

<sup>2</sup> *Center Wavelength*

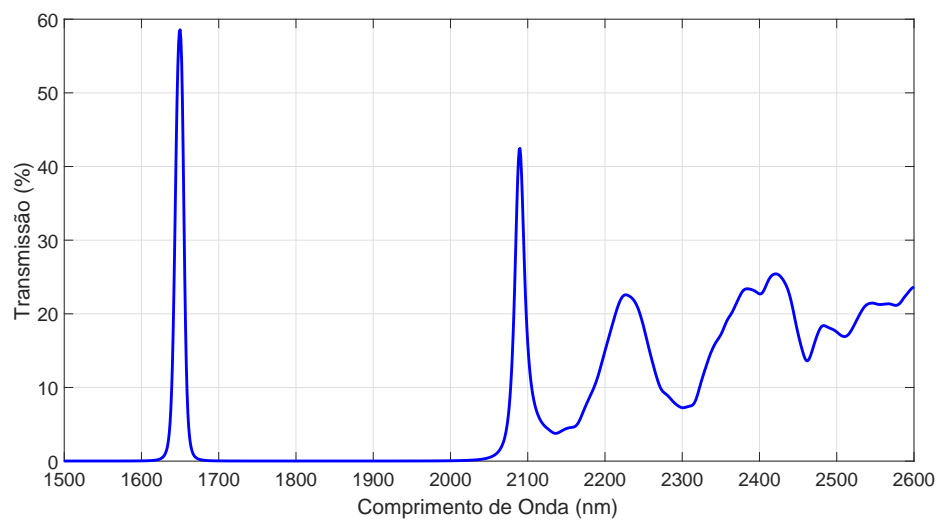
<sup>3</sup> *Full Width at Half Maximum*

Fonte: Elaborado pela autora.

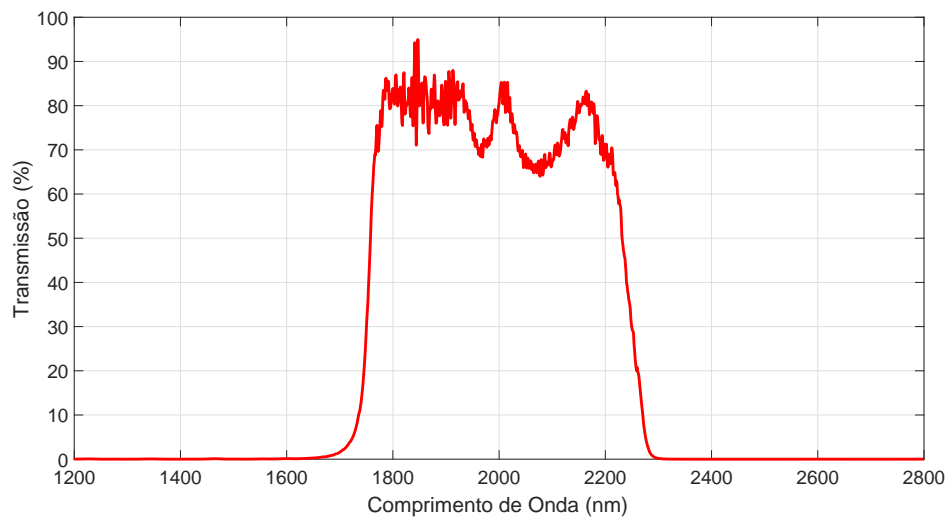


**Figura 3.6:** Banda passante do filtro de 1.400 nm.

Fonte: Adaptado de (THORLABS, 2018b).

**Figura 3.7:** Banda passante do filtro de 1.650 nm.

Fonte: Adaptado de (THORLABS, 2018b).

**Figura 3.8:** Banda passante do filtro de 2.000 nm.

Fonte: Adaptado de (THORLABS, 2018a).

Como os filtros apresentam características conhecidas, é possível determinar o quanto de cada comprimento de onda utilizado é transmitido, enquanto o restante do espectro é refletido pela superfície da esfera até a chegada ao sensor.

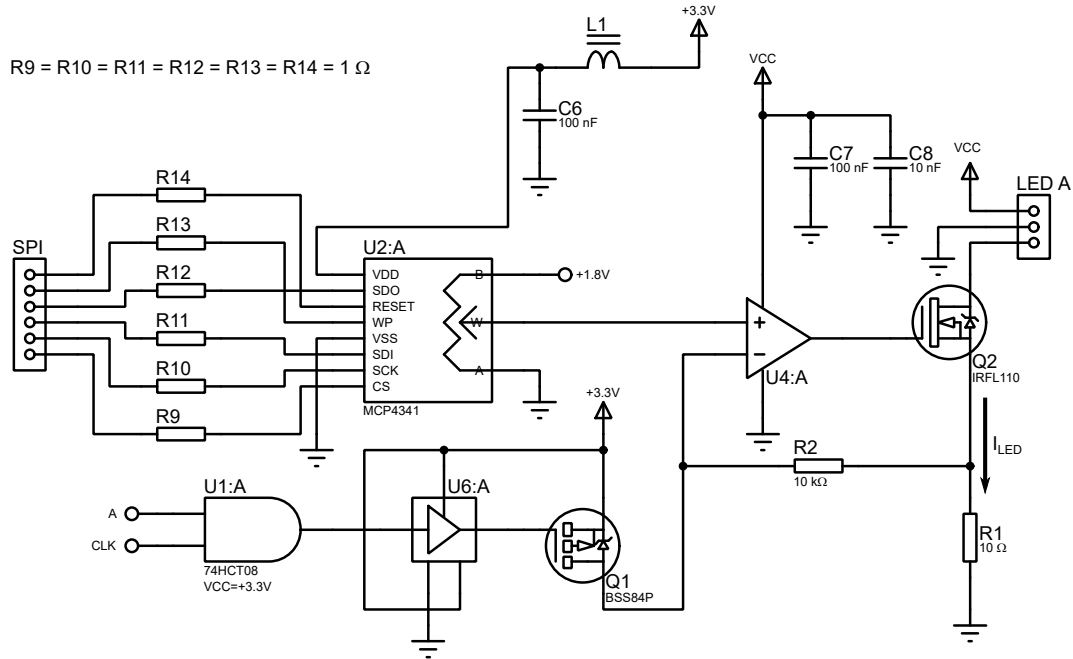
## 3.3 Circuitos de condicionamento

### 3.3.1 Circuito de acionamento dos LEDs

A Figura 3.9 mostra o circuito utilizado para acionamento do LED identificado como A. O esquemático completo, apresentado no Apêndice A.2, mostra que o acionamento dos demais componentes é realizado com a mesma topologia. Essa configuração garante que a potência emitida pelos emissores seja igual em todas as análises realizadas. É essencial que o acionamento seja feito de forma pulsada, caso contrário, o detector não apresenta sensibilidade ao sinal. Assim, foi utilizado um controle de acionamento pulsado através dos pinos de controle (A, B, C, D e CLK) e de um circuito integrado de portas lógicas AND (74HCT08). O sinal CLK determina a frequência de acionamento das fontes emissoras, e os pinos de A a D, habilitam os quatro canais de saída.

A conexão do LED, identificada como LED A na Figura 3.9, é feita através de um cabo blindado, onde a malha de terra do cabo é conectada ao GND para redução de ruídos. O valor da corrente de acionamento é determinado pelo ajuste

Figura 3.9: Circuito de acionamento do LED A.



Fonte: Adaptado de (RIBEIRO, 2015).

do potenciômetro digital (MCP4341) e do resistor R1. O potenciômetro permite ajustar a tensão que alimenta a entrada não inversora do circuito de *buffer*, que pode variar de 1,8 V a 0 V que, conseqüentemente, corresponde ao valor de tensão do terminal *Source* do transistor Q2. Portanto, o valor da corrente,  $I_{LED}$ , que aciona o conjunto de LEDs é

$$I_{LED} = \frac{V^+}{10}, \quad (3.2)$$

onde  $V^+$  é a tensão da entrada não inversora do amplificador operacional.

Por se tratar de um potenciômetro digital, a troca da corrente de saída pode ser feita via *software*, através do protocolo de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*). Logo, uma vez que a tensão não inversora é proporcional ao ajuste do *tap*,  $n$ , do potenciômetro MCP4341, tem-se

$$V^+ = \frac{390,625 \cdot n}{50 \cdot 10^3} \cdot 1,8. \quad (3.3)$$

Substituindo (3.3) na Equação (3.2),

$$\begin{aligned}
 I_{LED} &= \frac{390,625 \cdot n}{10 \cdot 50 \cdot 10^3} \cdot 1,8, \\
 I_{LED} &= \frac{390,625 \cdot n}{500 \cdot 10^3} \cdot 1,8,
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

onde  $n$  é um valor inteiro entre 0 e 128. Com isso, o valor de corrente pode ser ajustado entre 0 A a 180 mA.

Para esse sistema os LEDs adotados são apresentados na Tabela 3.2. Foram escolhidos LEDs com faixa de emissão capaz de cobrir uma ampla faixa do espectro infravermelho coincidentes com a faixa de absorção dos filtros ópticos utilizados.

**Tabela 3.2:** LEDs adotados para o protótipo.

Componente	$\lambda$ (nm)	FWHM (nm)	Faixa de emissão (nm)
LED 1450-03	1.450	100	1.400 - 1.500
LED 15R	1.530	150	1.455 - 1.605
LED 17R	1.730	150	1.655 - 1.805
LED 19R	1.950	150	1.875 - 2.025
LED 21R	2.150	200	2.050 - 2.250

Fonte: Elaborado pela autora.

Cada porta de acionamento (A, B, C e D) comporta três emissores iguais dispostos em série, logo, foram utilizados dois módulos para acionamento do conjunto.

### 3.3.2 Circuito de condicionamento do fotodiodo

Fotodiodos são sensíveis a luz ambiente, fato que pode dificultar seu uso em diversas aplicações. Normalmente, o condicionamento de um fotosensor envolve a aplicação de um circuito amplificador de transimpedância, o qual fornece uma tensão de saída proporcional a fotocorrente gerada. Contudo, este sinal exibe um *offset* intrínseco em função do único sentido de condução do fotodiodo, que se soma à tensão gerada pela luz ambiente.

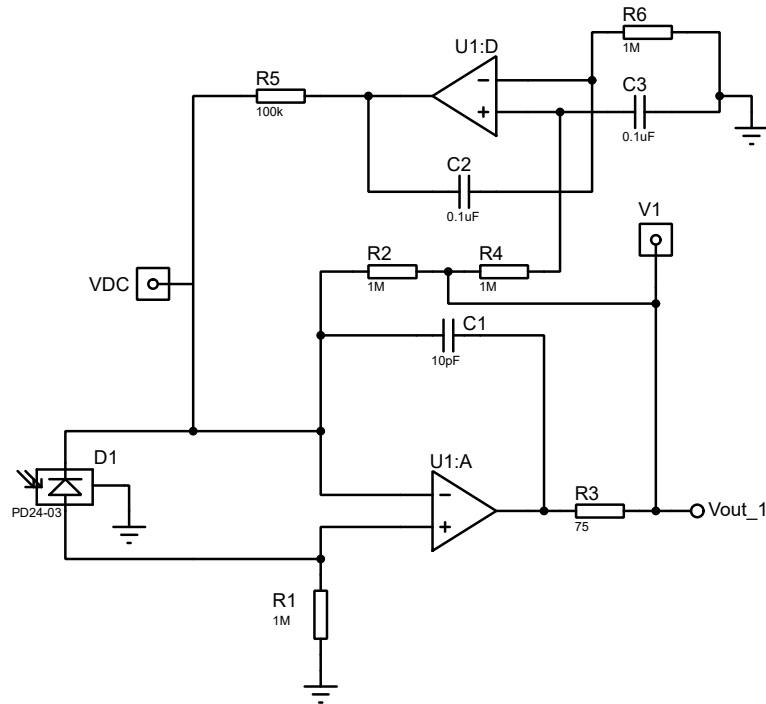
Em aplicações como a detecção da absorção de luz em determinadas substâncias, geralmente, é registrada uma pequena variação na intensidade luminosa, logo, é necessário amplificar o sinal recebido. Para viabilizar uma máxima excursão do sinal, e reduzir efeitos externos, uma compensação de *offset* pode ser

necessária.

O condicionamento proposto envolve um circuito dinâmico para compensação de *offset* (Figura 3.10). O amplificador U1:D atua como um integrador não inversor, o qual soma a influência da tensão DC ao circuito de transimpedância por meio do resistor  $R5$ . A corrente através de  $R5$  cancela a corrente fornecida pelo fotodiodo em frequências inferiores a frequência de corte do integrador, dada por

$$f_{\text{corte integrador}} = \frac{R2}{2\pi C2R5R6} \quad (3.5)$$

**Figura 3.10:** Circuito de transimpedância e compensação de *offset*.



Fonte: Elaborado pela autora.

O circuito exibido possui uma frequência de corte de 15,91 Hz. Esta configuração requer que os pares  $C2$  e  $C3$ ,  $R4$  e  $R6$  tenham os mesmos valores. Neste sistema a tensão de saída do circuito,  $V1$ , é dada por

$$V1 = I_{\text{fotodiodo}} \cdot (R1 + R2) - VDC, \quad (3.6)$$

onde  $VDC$  é a tensão de *offset*.

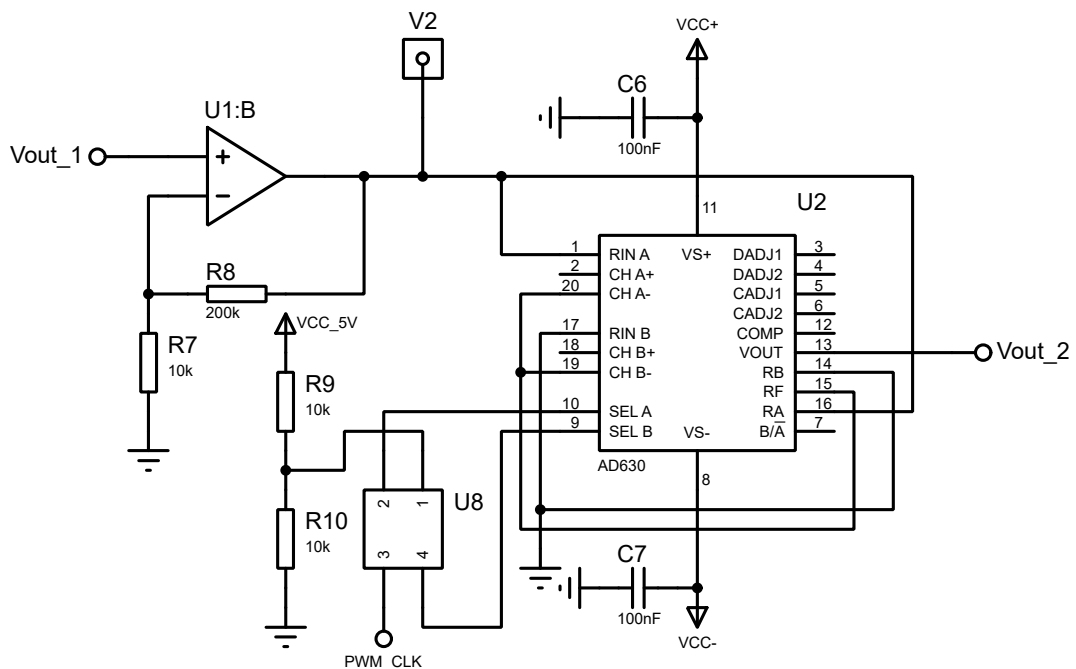
Para elevar a sensibilidade do sensor e aumentar sua imunidade a ruídos, é

utilizado um detector síncrono por meio de um amplificador Lock-In. O sinal de saída do circuito de transimpedância, com frequência de 700 Hz, é pré-amplificado por meio de um amplificador não inversor, com ganho dado por

$$V_2 = V_1 \left( 1 + \frac{R_8}{R_7} \right), \quad (3.7)$$

e então demodulado por meio do CI AD630 (Figura 3.11). Nesta configuração, o sinal condicionado de intensidade de luz é multiplicado por um ganho  $\pm 1$  em função do *clock* gerador do pulso luminoso, o qual, idealmente, apresenta mesma fase e frequência.

**Figura 3.11:** Circuito de pré-amplificação e Lock-In.



Fonte: Elaborado pela autora.

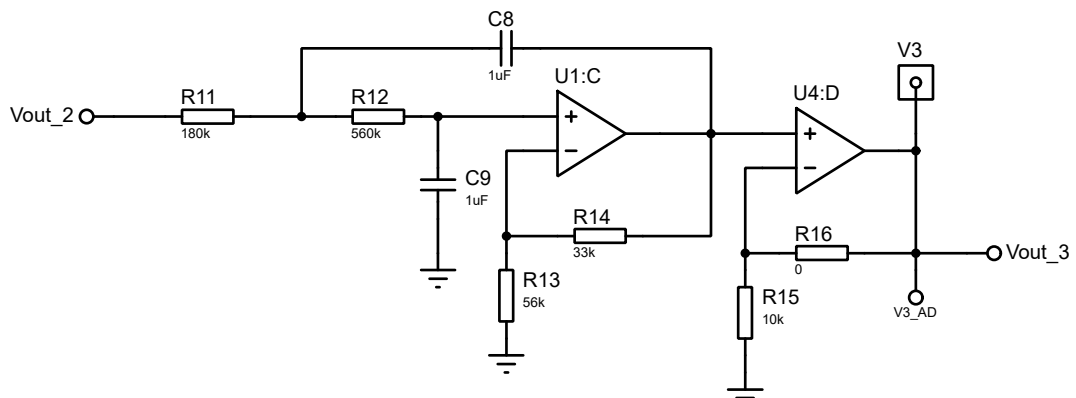
Desse modo, a informação desejada tem seu espectro devolvido à banda base, frequência central de 0 Hz, enquanto sinais espúrios são modulados em frequências distintas. Desta forma, é possível recuperar a informação desejada aplicando um filtro passa-baixas com frequência de corte próxima a zero. Neste circuito foi empregado um filtro de segunda ordem Sallen-key com frequência de corte de 0,5 Hz, seguido de um circuito *buffer*, como mostra a Figura 3.12. Neste filtro tem-se a frequência de corte,  $f_c$ , dada por,

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R11R12C8C9}}, \quad (3.8)$$

e fator de qualidade,

$$Q = \frac{\sqrt{R11R12C8C9}}{C9(R11 + R12)}. \quad (3.9)$$

**Figura 3.12:** Circuito Sallen-key passa-baixas e *buffer*.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após esses estágios, a saída  $V3$  é, então, digitalizada pelo conversor A/D de 24 *bits*. Este é um conversor A/D do tipo delta-sigma e conta com entradas diferenciais, ganhos internos programáveis (que amplificam o sinal em até 128 vezes), uma referência de tensão interna de 2,048 V e taxa de amostragem de até 2 kHz. A taxa utilizada para esse circuito foi de 20 amostras/segundo.

O conversor A/D utilizado possui  $2^{23}$  passos, ou seja, como o sinal de referência é +5 V, e o sinal de saída lido é sempre maior que 0 V, a menor tensão que o conversor é capaz de amostrar é de 298 nV.

O esquemático completo para o circuito de condicionamento é apresentado no Apêndice A.1.

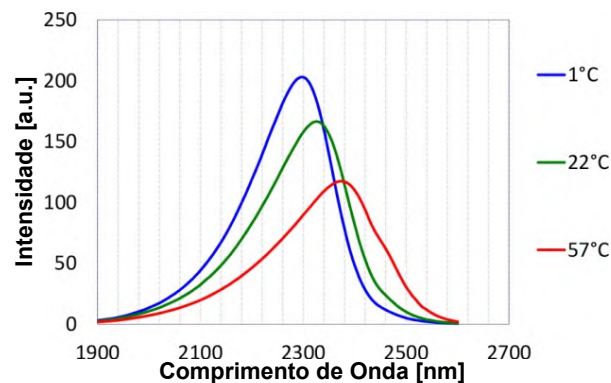
### 3.3.3 Circuito do controle de temperatura

A variação de temperatura no sistema afeta, principalmente, o comprimento de onda central emitido pelos LEDs podendo, além disso, variar a intensidade de emissão de luz. A variação da intensidade de luz emitida pelos LEDs é indesejável para o sistema pois pode causar medidas errôneas. É desejável que o

aumento ou redução do sinal recebido pelo fotodetector seja proporcional a absorção ocorrida na amostra analisada e não devido mudanças causadas por diferença de temperatura.

A Figura 3.13 ilustra o espectro emitido pelo componente LED23-PR para diferentes valores de temperatura. Apesar do LED operar na faixa de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  seus parâmetros não são os mesmos em toda a faixa. No gráfico nota-se a redução de intensidade de emissão do LED com o aumento de temperatura, característica indesejada para o sistema.

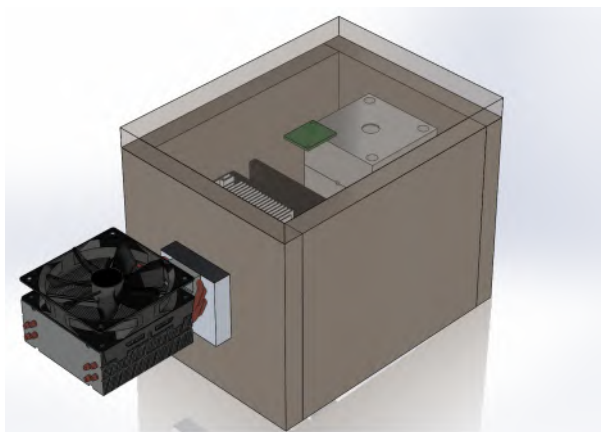
**Figura 3.13:** Espectro de emissão do LED23-PR para diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de (LASERTECHNIK, 2015).

Para diminuir a influência da temperatura no sistema, a estrutura óptica composta pela esfera de integração, circuito de condicionamento, sensor e LEDs, foram alocados dentro de um compartimento fechado e com um controle de temperatura atuante. A renderização da estrutura projetada, posteriormente fabricada em madeira MDF 15 mm, é apresentada na Figura 3.14.

**Figura 3.14:** Estrutura projetada para controle de temperatura.



Fonte: Elaborado pela autora.



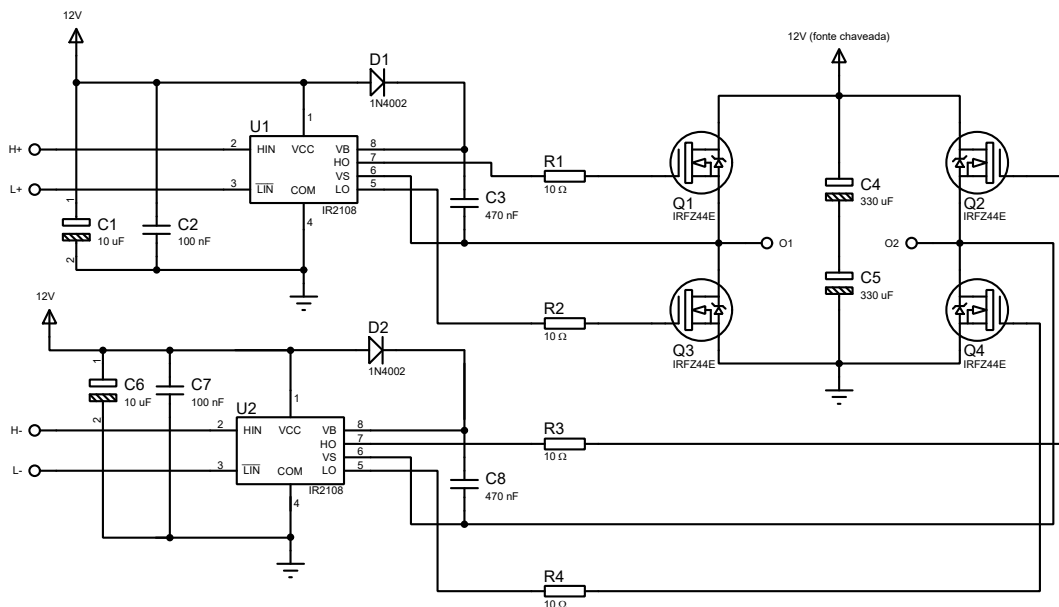
Dentro do compartimento a temperatura é estabilizada em 25 °C para que os efeitos térmicos atuantes sobre os componentes sejam minimizados. O sistema de controle de temperatura é composto por uma pastilha Peltier, dissipadores, ventoinhas e sensor de temperatura.

O sensor de temperatura utilizado foi o LM92. Esse sensor possui saída digital, comunicação I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*), exatidão de  $\pm 0,33$  °C, e resolução de doze *bits* para leitura e um *bit* de sinal (temperatura positiva ou negativa), além de permitir a conferência de dados através de *checksum*.

A pastilha termoelétrica, sob o efeito Peltier, produz um gradiente de temperatura na junção de dois condutores/semicondutores de diferentes materiais quando submetidos a uma tensão. Esse efeito proporciona o resfriamento de uma junção enquanto a outra aquece. O aquecimento/resfriamento pode ser controlado de acordo com a polarização da tensão aplicada a seus terminais com um circuito ponte H.

O circuito da ponte H, Figura 3.15, permite que a carga seja polarizada em ambos os sentidos. Os sinais H<sup>+</sup> e H<sup>-</sup> são modulados por PWM (*Pulse-Width Modulation*), onde o CI IR2108 é responsável pelo acionamento dos MOSFETs IRFZ44E. No esquemático também são mostrados os terminais O<sub>1</sub> e O<sub>2</sub>, onde a carga é conectada.

**Figura 3.15:** Circuito da ponte H.



Fonte: Adaptado de (DIAS, 2017).

A atuação do controle de temperatura é executada em malha fechada com con-

trolador Proporcional-Integral (PI), proporcionando ao sistema controle a temperatura de forma autônoma.

### 3.4 Validação do sistema proposto

Para validar a metodologia proposta, ou seja, verificar a repetibilidade da resposta do sistema, e seu comportamento no caso de absorção de algum comprimento de onda, além de medir a contribuição, em tensão, de cada comprimento de onda utilizado, foram realizados diferentes testes.

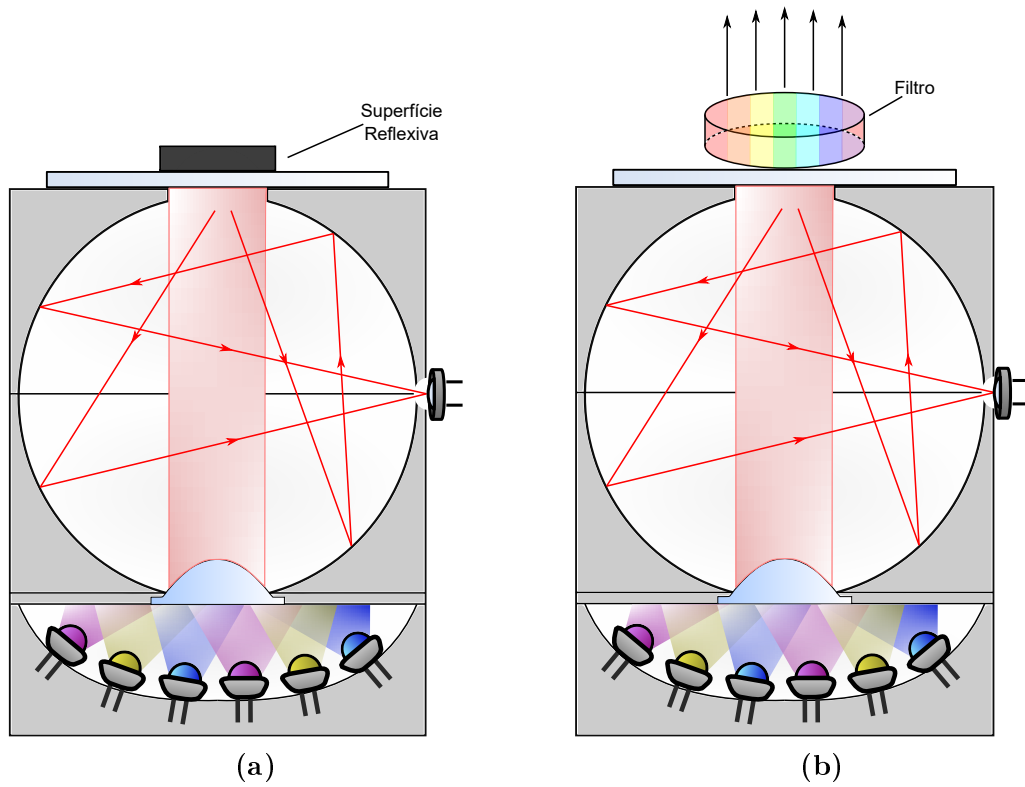
No primeiro conjunto de ensaios Figura 3.16(a), foi posicionada uma superfície reflexiva na abertura destinada à amostra. Essa superfície possui dimensões 30x30x3 mm e foi confeccionada em ABS com revestimento de Sulfato de Bário utilizado no restante da esfera. Todos os LEDs foram acionados para medição do sinal de tensão na saída do circuito de detecção, sem que houvesse absorção em um comprimento de onda específico por meio de uma amostra. Depois, cada conjunto de LEDs, com mesma faixa de emissão, foi desligado separadamente para medir a sua contribuição no sinal de tensão na saída do sistema.

No segundo (Figura 3.16(b)), foram posicionados três filtros ópticos com banda-passante distintas na abertura destinada à amostra, para verificar a atenuação devido a transmissão dos mesmos.

A tensão de saída do sistema foi medida da seguinte forma: foram realizadas três leituras, com 1.200 pontos cada, e calculada a média de todos esses pontos para resultar em uma medida. Esse processo de medição foi realizado trinta vezes, para cada configuração descrita anteriormente.

Todos os dados coletados pelo conversor A/D são referentes a tensão no ponto V3 do circuito de condicionamento do sensor, mostrado na Figura 3.12.

**Figura 3.16:** Testes realizados com o sistema: (a) Superfície reflexiva posicionada na abertura para amostra, (b) Filtro posicionado na abertura para amostra.



Fonte: Elaborado pela autora.

## 4 Resultados

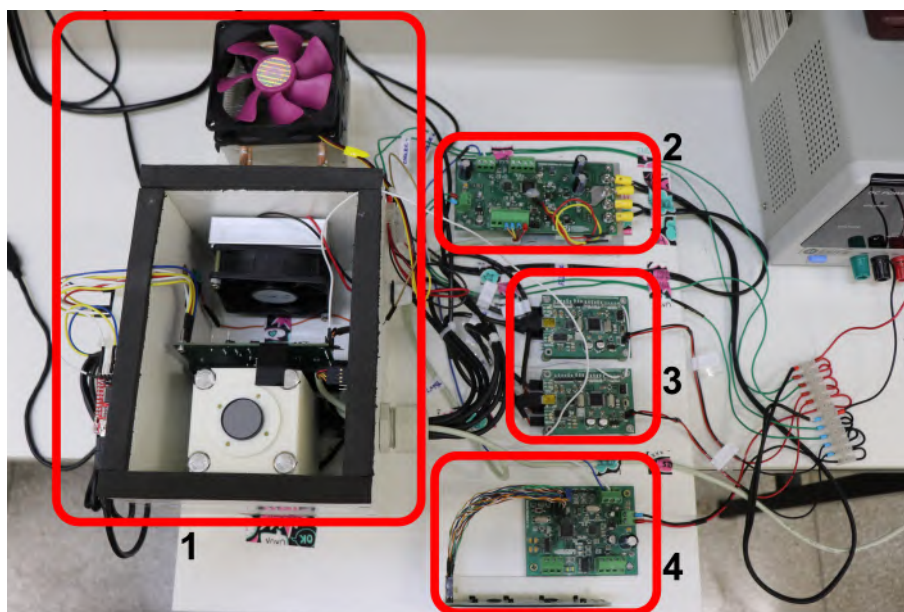
---

Este capítulo apresenta o protótipo desenvolvido para aplicação em determinação de substâncias de interesse na região do infravermelho próximo, bem como os testes realizados com filtros para validação do funcionamento do mesmo.

### 4.1 Protótipo

O protótipo proposto é mostrado na Figura 4.1. Para fixação e organização de todos os módulos foi utilizada uma chapa de MDF 15 mm.

**Figura 4.1:** Foto do protótipo desenvolvido.



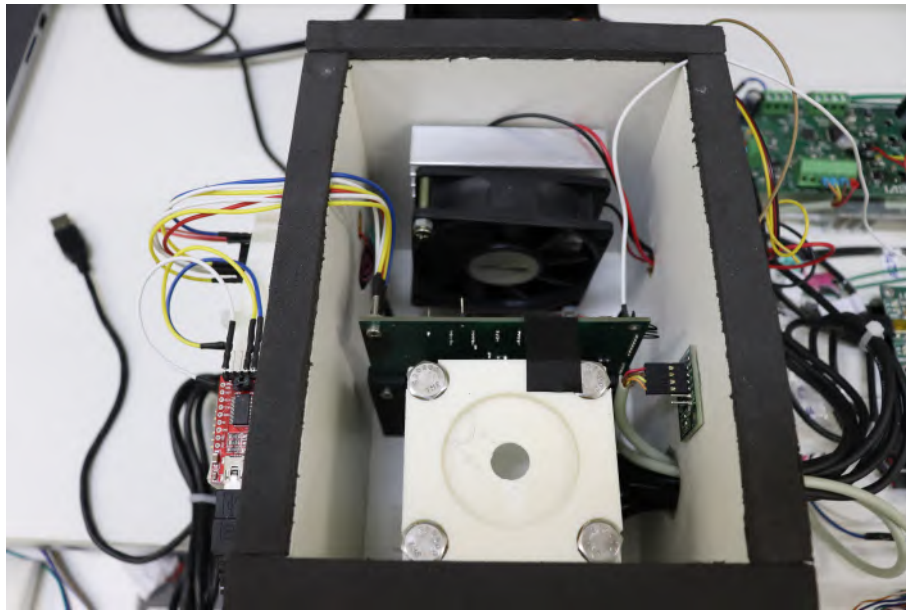
Fonte: Elaborado pela autora.

Na imagem, lado esquerdo, é apresentada a estrutura que mantém os componentes ópticos em temperatura controlada (referenciado como 1). Ao lado direito da imagem estão localizados o módulo de controle de temperatura, dois módulos de emissão e módulo de interface (referenciados como 2, 3 e 4, respectivamente).

Na Figura 4.2 é mostrado o interior da caixa com os elementos ópticos. O sensor de temperatura foi disposto ao lado da esfera de integração fixado através de fita dupla-face. Os cabearmentos dos LEDs, sensor de temperatura, pastilha

Peltier e ventoinha, foram passados através de três orifícios com prensa-cabos, dois dispostos do lado direito da caixa e um ao lado esquerdo. Os cabos do conversor A/D, devido interrupção na comunicação ao serem passados pelo prensa-cabos, foram realocados na borda da estrutura. Para melhorar a vedação entre estrutura e ambiente externo, foi utilizada uma fita de espuma adesiva, fixando os cabos do conversor A/D, e impedindo troca de calor entre meio interno/externo, pois obstrui frestas entre tampa e caixa.

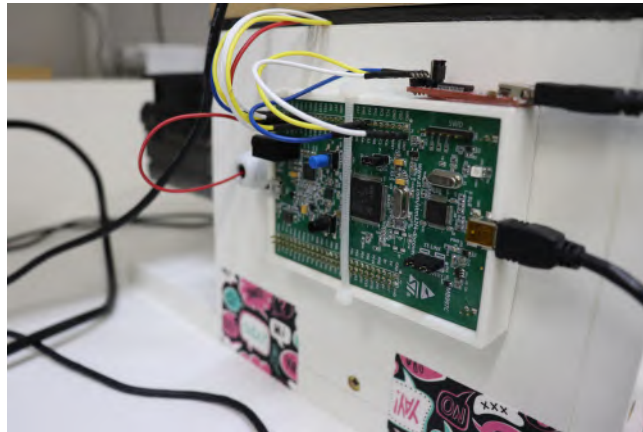
**Figura 4.2:** Foto do interior da estrutura com controle de temperatura.



Fonte: Elaborado pela autora.

A leitura dos dados do conversor A/D da placa de condicionamento do sensor InGaAs é realizada através de uma placa de desenvolvimento STM32F407VG *Discovery*, da STMicroelectronics. A disposição da placa no sistema é mostrada na Figura 4.3. Foi projetada em *software* CAD uma base para a placa de desenvolvimento e impressa em plástico ABS. A base foi fixada à lateral da estrutura através de dois parafusos auto atarraxantes, enquanto a placa de desenvolvimento foi fixada a base por meio de abraçadeiras plásticas mantendo-a, assim, segura na lateral da estrutura.

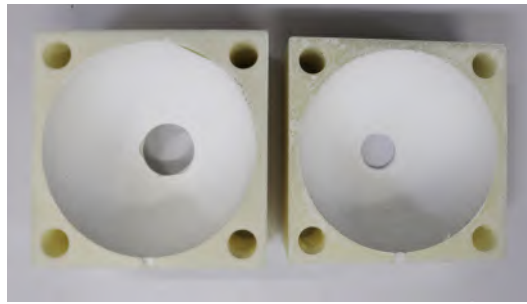
**Figura 4.3:** Placa de desenvolvimento *ARM* para coleta de dados do conversor A/D.



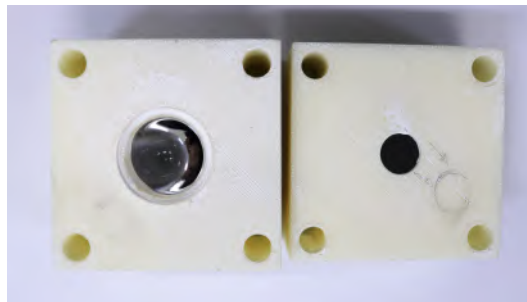
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.4 mostra a esfera de integração utilizada para testes. Como descrito anteriormente, não foi possível obter o valor aproximado da reflectância da esfera devido seu formato inadequado para o equipamento comercial de medição de reflectância. O equipamento comercial possui uma janela circular plana com 14 mm de diâmetro, proporcionando uma área de análise de aproximadamente  $154 \text{ mm}^2$ . Devido o formato da janela, peças que não apresentam formato geométrico plano, como a esfera, dificultam a análise dada pelo equipamento. A Figura 4.4(a) mostra o interior da esfera com aplicação uniforme do polímero, enquanto a Figura 4.4(b) mostra o exterior da esfera com a lente convergente encaixada na abertura da metade inferior.

**Figura 4.4:** Fotos da esfera de integração utilizada no projeto: (a) Interior com revestimento de  $\text{BaSO}_4$ , (b) Metade inferior e superior da esfera de integração.



(a)

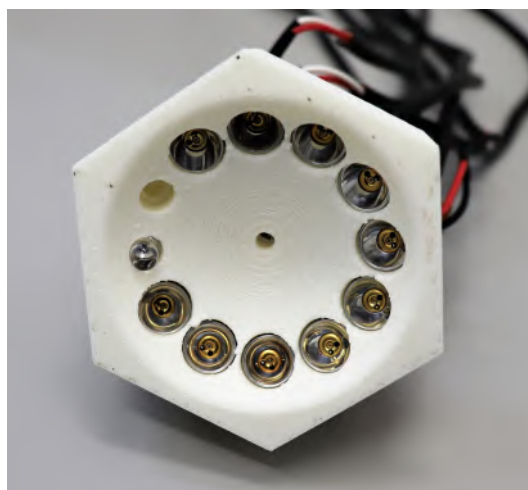


(b)

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.5 mostra a disposição dos LEDs na estrutura. A base foi projetada com doze orifícios, sendo dois para cada comprimento de onda utilizado. No entanto, não viu-se a necessidade de acrescentar mais um LED de 1.450 nm, visto que é o emissor com maior potência dentre os utilizados.

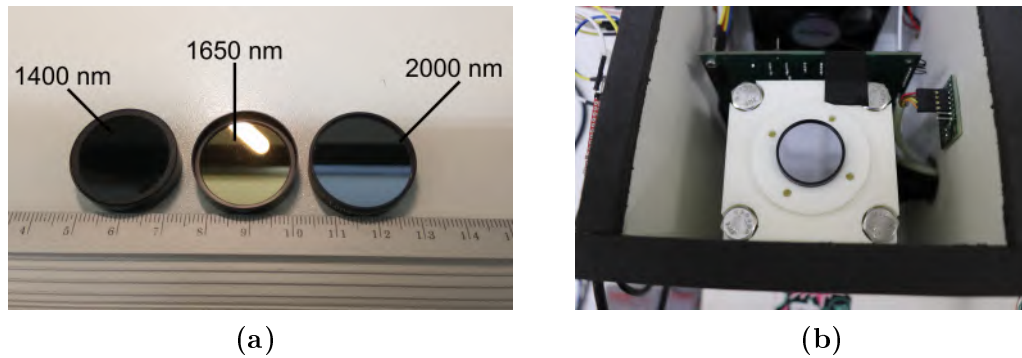
**Figura 4.5:** Foto do posicionamento dos LEDs na base projetada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 4.6(a) são mostrados os filtros utilizados para teste. Os filtros possuem diâmetro de 1 polegada e foram posicionados no protótipo conforme mostrado na Figura 4.6(b). Foi utilizado um suporte ABS para encaixe dos filtros de modo a dispo-los sempre na mesma posição em relação a abertura destinada a amostra.

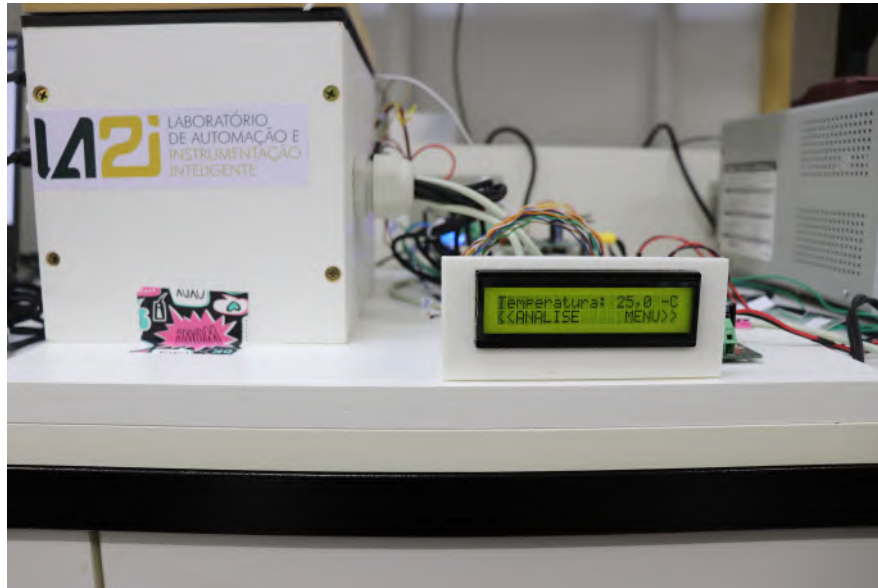
**Figura 4.6:** Filtros utilizados para teste: (a) Filtros passa-banda, (b) Posicionamento do filtro no sistema.



Fonte: Elaborado pela autora.

A temperatura do interior da estrutura é mostrada através de um *display* alfanumérico (Figura 4.7). Apesar da interface exibir um menu de comandos para navegação com botões, estes não foram utilizados no sistema, onde todos os comandos foram realizados via comunicação serial USB. A temperatura é atualizada no *display* a cada 3 segundos, sendo possível visualizar rapidamente caso haja um aumento ou queda de temperatura no interior da caixa.



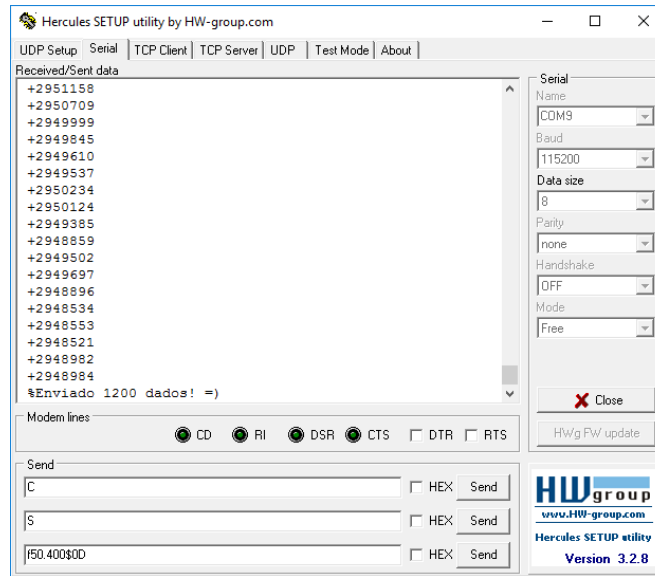
**Figura 4.7:** Foto da interface do protótipo.

Fonte: Elaborado pela autora.

Para alimentar todos os módulos foi utilizada uma fonte de corrente linear variável, modelo MPL-3305M da Minipa. Como a fonte DC possui dois canais, estes foram ligados em série, fornecendo alimentação simétrica ( $\pm 12$  V) para a placa de condicionamento do sensor, e alimentação assimétrica (0 - 12 V) para os demais circuitos. A capacidade de corrente fornecida pela fonte quando conectada em série é limitada em 5 A, porém o consumo maior de corrente ocorre ao ligar o protótipo consumindo aproximadamente 4,6 A, até estabilização da temperatura, que ocorre em torno de 4 minutos após ligar o protótipo, onde passado esse tempo continua operando na faixa de 0,9 a 2,5 A.

## 4.2 Coleta de dados

A coleta de dados do conversor A/D foi realizada através de um *software* terminal-serial (Figura 4.8). Os valores, em *bits*, foram armazenados em arquivos *.log* para posterior análise.

**Figura 4.8:** Visualização da resposta do conversor A/D em *bits*.

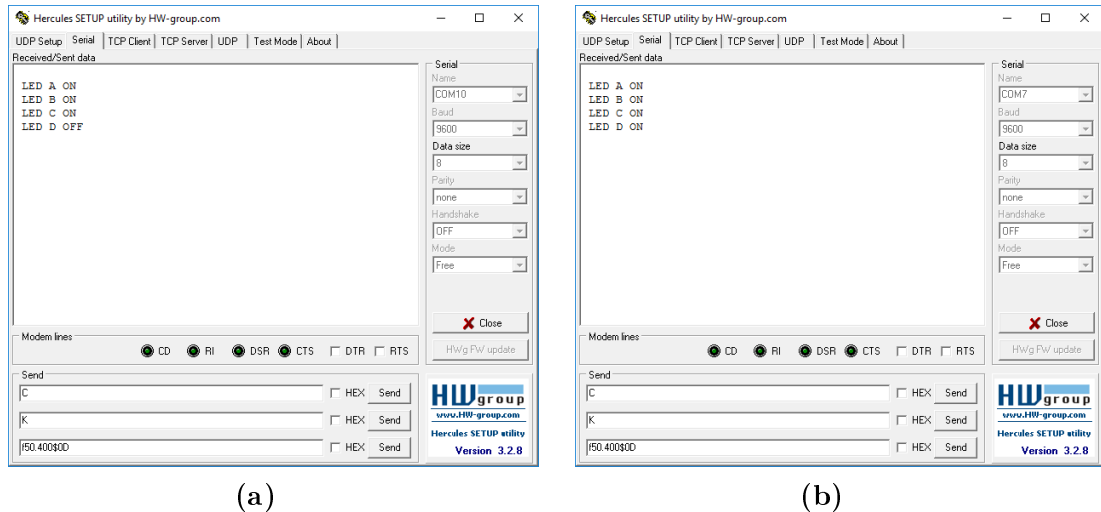
Fonte: Elaborado pela autora.

Com o mesmo *software* foram controlados quais os emissores do sistema seriam ligados/desligados. A Tabela 4.1 mostra os LEDs conectados a cada módulo de emissão (Figura 4.1, item 3) e, respectivamente, à porta correspondente (A, B, C ou D). O módulo 1 (Figura 4.9(a)), ao ser ligado, inicia as portas A, B e C, correspondente aos comprimentos de onda 1.450 nm, 1.530 nm e 1.730 nm, enquanto o módulo 2 (Figura 4.9(b)) inicia as portas A e B, responsáveis pelo acionamento do comprimento 1.950 nm, e porta C, que liga o comprimento de 2.150 nm.

**Tabela 4.1:** Conexão dos LEDs nos módulos de emissão.

Módulo	Porta	N.º de LEDs	$\lambda$ (nm)
Módulo 1	A	1	1.450
	B	2	1.530
	C	2	1.730
	D	-	-
Módulo 2	A	2	1.950
	B	1	1.950
	C	2	2.150
	D	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 4.9:** Configuração dos LEDs: (a) Módulo 1, (b) Módulo 2.

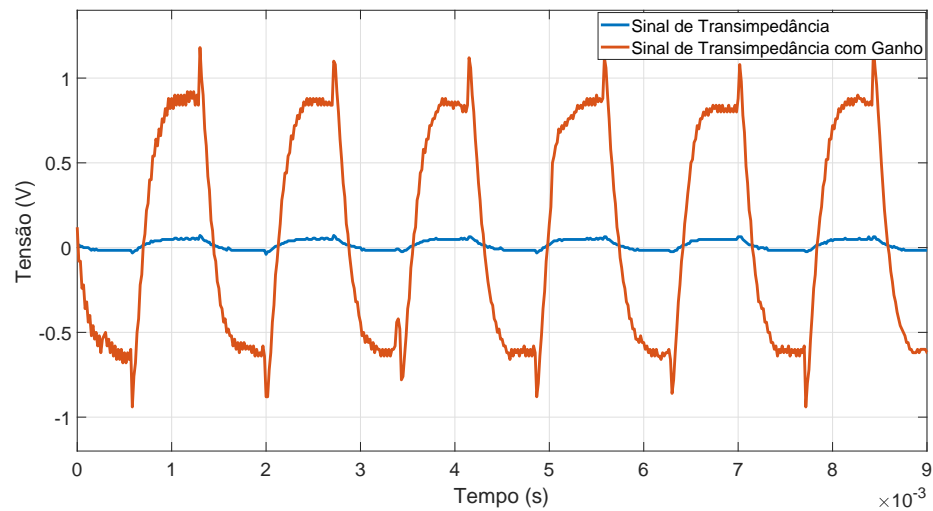
Fonte: Elaborado pela autora.

O *software* utilizado permite configurar à qual porta serial serão enviados, ou recebidos, os comandos. Portanto, para controlar a emissão dos LEDs, foram abertas duas janelas distintas.

Para desligar um emissor, envia-se o caractere correspondente a porta (A, B, C ou D) pela serial, através do programa.

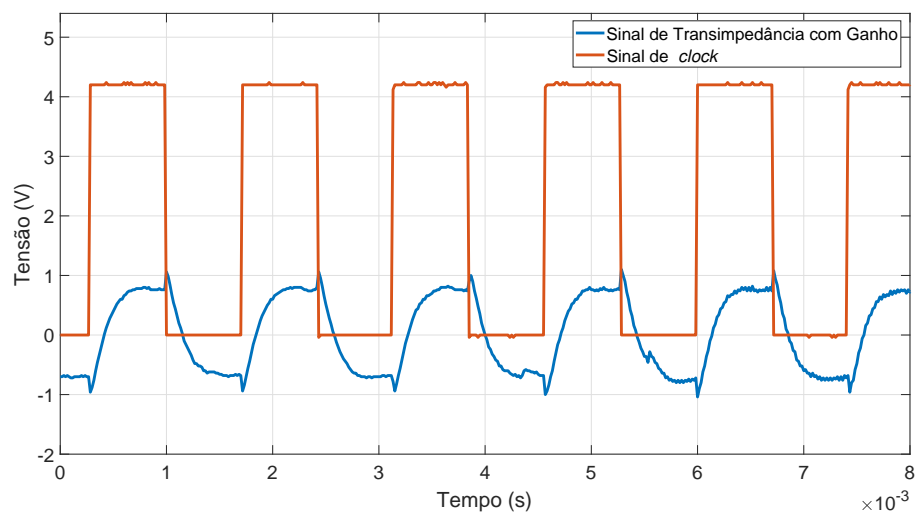
### 4.3 Sinais da placa de condicionamento do sensor InGaAs

Na Figura 4.10 é mostrado o sinal de saída do circuito de transimpedância (tensão em  $V_1$ ) juntamente com o mesmo sinal após o estágio de amplificação (tensão em  $V_2$ ). Esses dados foram coletados com todos os emissores acionados. A amplitude do sinal de transimpedância é de aproximadamente 96 mV, enquanto o sinal com ganho apresentou uma amplitude aproximada de 2,08 V. O ganho é necessário para evidenciar a diferença, geralmente na faixa de mV, entre os sinais coletados.

**Figura 4.10:** Sinal de saída do circuito de transimpedância.

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.11 mostra o sinal de referência, com frequência de 700 Hz, em fase com o sinal de transimpedância amplificado. Essa frequência para o sistema foi escolhida variando seu valor na faixa de 500 Hz a 2 kHz e observando o sinal de transimpedância no ponto *V1*. Para frequências maiores que 1 kHz foi observado que o sinal de transimpedância começava a perder seu formato característico, decorrente principalmente do uso do circuito de correção de *offset*.

**Figura 4.11:** Sinal de *clock* dos emissores.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os sinais apresentados na Figura 4.11 e Figura 4.10 foram coletados com um osciloscópio digital modelo DS203, fabricado pela Mini DSO.

## 4.4 Testes realizados

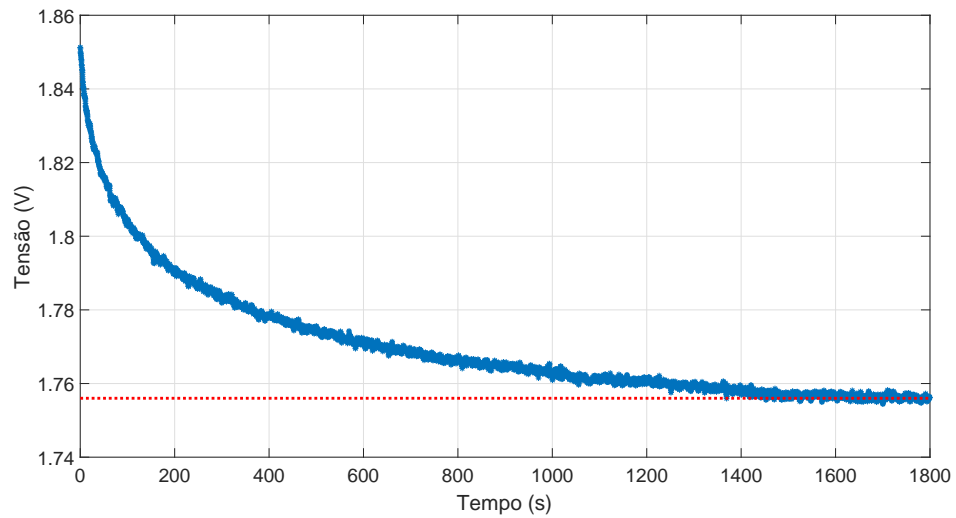
Ao longo do desenvolvimento do sistema foram realizados alguns testes para verificar parâmetros importantes, como controle de temperatura, tempo de estabilização da emissão dos LEDs, variação de corrente nos emissores e variação de temperatura no sistema. Os resultados obtidos são descritos a seguir.

### 4.4.1 Tempo de estabilização dos LEDs

Como ocorre com a maior parte das fontes de luz, há uma queda na potência luminosa emitida no decorrer do tempo, porém, após um determinado período, a potência emitida estabiliza-se. O mesmo ocorre com os LEDs, sendo necessários deixá-los estabilizar antes de iniciar qualquer medida com o sistema.

Para encontrar o tempo transcorrido a qual ocorre a estabilização do conjunto de LEDs, o sistema foi iniciado com os módulo de emissão desligados. Após estabilização do sistema em 25 °C, os módulos de emissão foram ligados. Os dados foram coletados de forma contínua pelo conversor A/D, isto é, foram coletados os dados no ponto V3 (Figura 3.12), e armazenados em um arquivo *.log*, totalizando 11.628 pontos em um período de 1.800 segundos.

A Figura 4.12 mostra a curva obtida com os dados coletados pelo conversor A/D. A imagem mostra que a potência emitida pelo conjunto de LEDs estabiliza-se em torno de 25 minutos, com um valor de tensão de aproximadamente 1,756 V. Isso indica que qualquer leitura realizada em sistemas com esse tipo de emissão deve ser iniciada somente após um determinado período, a qual esse tempo diverge para cada tipo de fonte emissora adotada.

**Figura 4.12:** Tempo de estabilização da emissão do conjunto de LEDs.

Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4.2 Mudança de temperatura no sistema proposto

Como descrito na Seção 3.3.3, a mudança de temperatura afeta o sistema ocasionando leituras equivocadas. Logo, para averiguação deste fato, o *setpoint* do controle de temperatura foi variado de 22 °C a 32 °C. Após cada mudança no valor de controle, assim que o sistema atingia o novo valor esperado, foi estabelecido um período de estabilização do comportamento de emissão dos LEDs de, no mínimo, 30 minutos. Foram coletadas três amostras em sequência para cada valor setado, onde cada conjunto foi coletada pelo conversor A/D a 20 Hz durante um minuto, totalizando 1.200 amostras/coleta. O conjunto de dados do conversor A/D foi convertido em tensão para facilidade de análise. Os dados coletados são mostrados na Tabela 4.2.

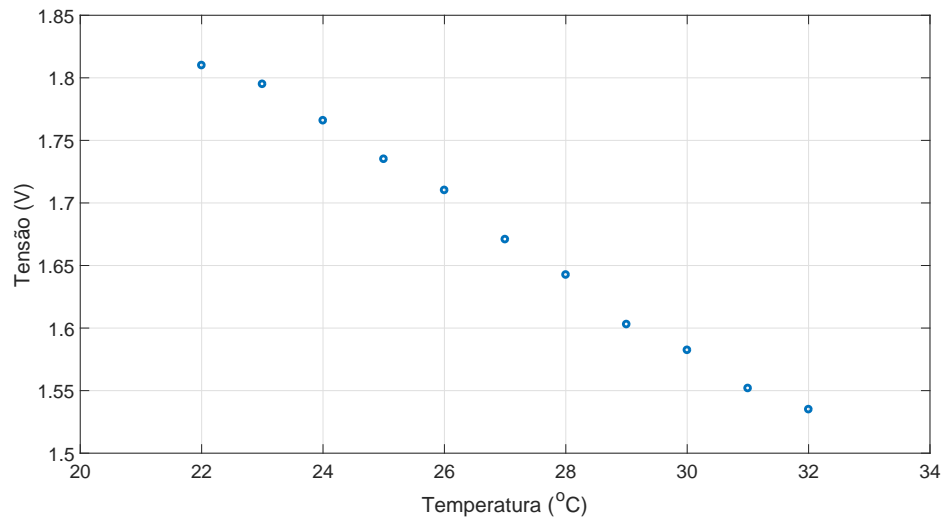
**Tabela 4.2:** Leitura da tensão de saída do circuito de condicionamento, ponto V3, em diferentes temperaturas.

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tensão		
	Média (V)	$\sigma$ (V)	Coefficiente de Variação
22	1,8100	$7,8856 \cdot 10^{-4}$	$4,3568 \cdot 10^{-4}$
23	1,7950	$6,4801 \cdot 10^{-4}$	$3,6101 \cdot 10^{-4}$
24	1,7659	$8,3651 \cdot 10^{-4}$	$4,7369 \cdot 10^{-4}$
25	1,7351	$7,4483 \cdot 10^{-4}$	$4,2927 \cdot 10^{-4}$
26	1,7102	$7,5578 \cdot 10^{-4}$	$4,4193 \cdot 10^{-4}$
27	1,6709	$6,6667 \cdot 10^{-4}$	$3,9898 \cdot 10^{-4}$
28	1,6426	$7,7545 \cdot 10^{-4}$	$4,7208 \cdot 10^{-4}$
29	1,6030	$7,4115 \cdot 10^{-4}$	$4,6235 \cdot 10^{-4}$
30	1,5824	$6,7818 \cdot 10^{-4}$	$4,2857 \cdot 10^{-4}$
31	1,5519	$8,1222 \cdot 10^{-4}$	$5,2337 \cdot 10^{-4}$
32	1,5350	$7,1880 \cdot 10^{-4}$	$4,6829 \cdot 10^{-4}$

Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela além de apresentar o valor médio das leituras (três ciclos separados de 1.200 pontos), também apresenta o valor de desvio padrão ( $\sigma$ ), variância ( $\sigma^2$ ) e coeficiente de variação, que expressa a repetibilidade dos ensaios.

Para melhor visualização da mudança de leitura ocasionada com a mudança de temperatura, os dados de tensão média da Tabela 4.2 foram plotados (Figura 4.13).

**Figura 4.13:** Tensão para diferentes temperaturas.

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.13 mostra o decaimento da tensão com o aumento da temperatura. A tensão variou 275 mV para um  $\Delta T$  de 10 °C, tendo a maior diferença ocorrido entre 28 °C e 29 °C (39,6 mV). Reiterando que, não somente a potência luminosa dos componentes diminui, como também ocorre o deslocamento do comprimento de onda central dos componentes.

#### 4.4.3 Variação de corrente nos emissores

Para avaliar a sensibilidade da esfera quanto a diferentes intensidades de emissão do conjunto de LEDs, a corrente destes foi variada. Foram escolhidos valores inteiros no intervalo de 0 a 128 e ajustados no potenciômetro MCP4341, onde para cada conjunto de LEDs foi fornecida a mesma corrente. Os resultados obtidos foram lidos na saída do sistema, ponto V3 (Figura 3.12), e encontram-se na Tabela 4.3, na qual a corrente foi calculada com uso da Equação (3.4)



**Tabela 4.3:** Leitura da tensão no ponto V3 para diferentes valores de corrente nos LEDs.

Tap $n$	Corrente (mA)	Tensão		
		Média (V)	$\sigma$ (V)	Coefficiente de Variação
10	14,06	1,4044	$5,8978 \cdot 10^{-4}$	$4,1996 \cdot 10^{-4}$
15	21,09	1,4337	$5,0741 \cdot 10^{-4}$	$3,5391 \cdot 10^{-4}$
25	35,16	1,4767	$4,9237 \cdot 10^{-4}$	$3,3343 \cdot 10^{-4}$
35	49,22	1,5284	$5,5860 \cdot 10^{-4}$	$3,6547 \cdot 10^{-4}$
40	56,25	1,5507	$4,9501 \cdot 10^{-4}$	$3,1922 \cdot 10^{-4}$
50	70,31	1,5863	$6,7071 \cdot 10^{-4}$	$4,2281 \cdot 10^{-4}$
65	91,41	1,6410	$5,9615 \cdot 10^{-4}$	$3,6327 \cdot 10^{-4}$
75	105,47	1,6664	$5,6849 \cdot 10^{-4}$	$3,4115 \cdot 10^{-4}$
90	126,56	1,7064	$5,9987 \cdot 10^{-4}$	$3,5154 \cdot 10^{-4}$
100	140,62	1,7228	$6,8529 \cdot 10^{-4}$	$3,9777 \cdot 10^{-4}$
115	161,72	1,7545	$6,1191 \cdot 10^{-4}$	$3,4877 \cdot 10^{-4}$
127	178,59	1,7682	$6,7307 \cdot 10^{-4}$	$3,8064 \cdot 10^{-4}$

Fonte: Elaborado pela autora.

Esses resultados mostram que, mesmo para baixas intensidades luminosas, o conjunto composto pela esfera de integração e condicionamento do sensor detectaram a variação emitida. Os valores da Tabela 4.3 mostram também que é necessário um controle estável da corrente, caso contrário, a leitura na saída do sistema será equivocada, pois para pequenas variações na corrente dos emissores, ocorre uma mudança significativa na tensão de saída do sistema.

#### 4.4.4 Controle de temperatura

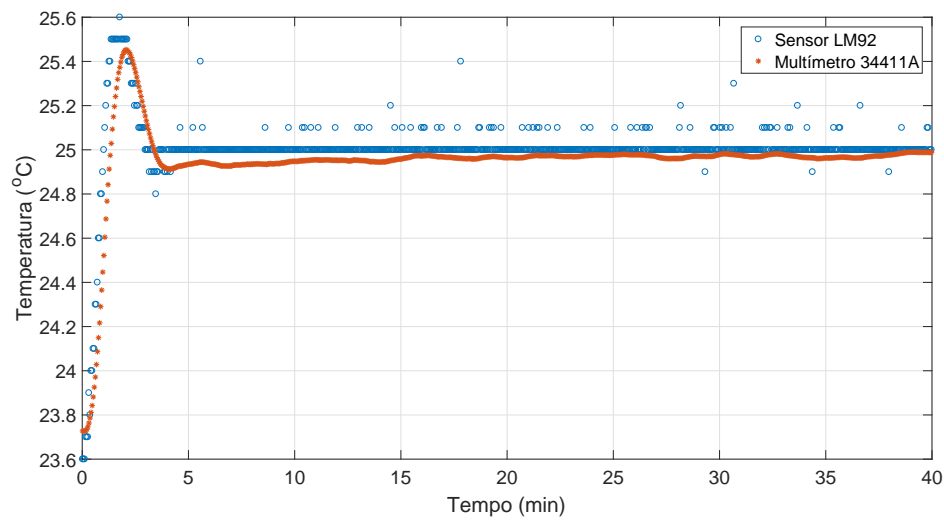
No protótipo foi utilizado um controlador PI para atuar sobre o sistema de temperatura, sendo que os valores utilizados dos parâmetros foram 6.750 para o ganho integral ( $K_i$ ) e 50 para ganho proporcional ( $K_p$ ).

Para verificar se o controle estaria atuando corretamente, foi inserido junto ao sensor LM92 um termistor de 2 W/5 k $\Omega$  conectado a um multímetro de bancada 34411A, da Keysight. Após ligar o sistema de controle, os valores de temperatura foram coletados por duas horas, com a realização de uma medida a cada três segundos.

A Figura 4.14 mostra os dados coletados durante os 40 minutos iniciais. Pelos dados do LM92, o *overshoot* do sistema ocorreu em aproximadamente 1 minuto e 46 segundos, com um valor de 25,6 °C. Com essa informação, o *overshoot*

percentual calculado foi de 2,4%.

**Figura 4.14:** Estabilização da temperatura no sistema proposto.



Fonte: Elaborado pela autora.

## 4.5 Medida do sinal de tensão de saída

Como descrito na Seção 3.4, os ensaios foram realizados da seguinte forma: com superfície reflexiva e filtros (três banda-passantes) no porta amostras. Para a primeira configuração, foram realizados seis modos de acionamento dos emissores, como apresentado na primeira coluna da Tabela 4.4. Os resultados obtidos com os filtros são apresentados na Tabela 4.5. Os valores apresentados nestas Tabelas foram determinados a partir de trinta ensaios, totalizando 270 medições.

**Tabela 4.4:** Resultados da média e desvio padrão das trinta medidas realizadas, para os modos de acionamento dos emissores, do sistema com superfície reflexiva no porta amostras e a contribuição de cada emissor.

Configuração	Sem filtro		Contribuição (V)
	Média (V)	$\sigma$ (V)	
Todos Ligados	1,7548	$7,4929 \cdot 10^{-4}$	-
1.450 nm Desligado	1,5033	$1,2106 \cdot 10^{-3}$	0,2515
1.530 nm Desligado	1,5920	$1,0191 \cdot 10^{-3}$	0,1628
1.730 nm Desligado	1,6491	$1,1557 \cdot 10^{-3}$	0,1057
1.950 nm Desligado	1,7501	$9,2928 \cdot 10^{-4}$	0,0047
2.150 nm Desligado	1,7477	$1,1173 \cdot 10^{-3}$	0,0071

Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela 4.5:** Resultados da média e desvio padrão das trinta medidas realizadas com cada filtro óptico no porta amostras.

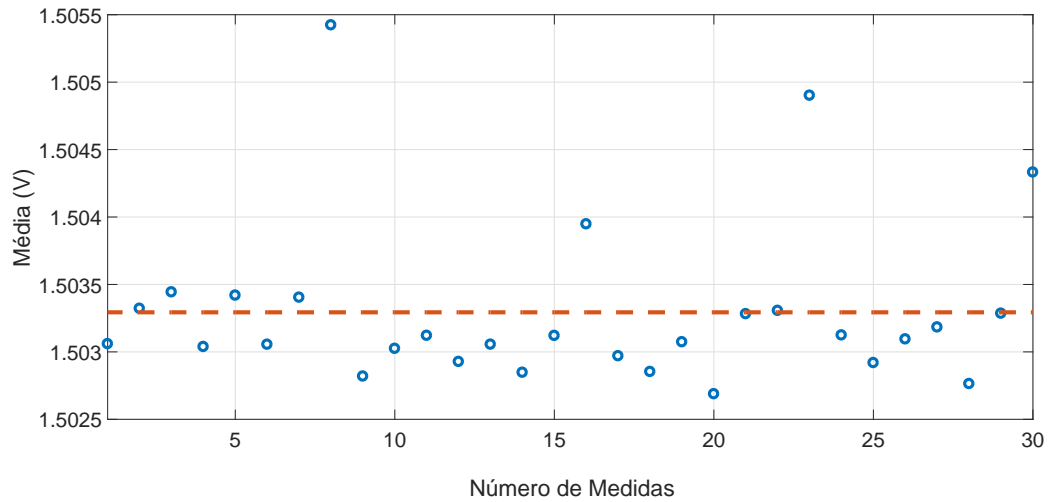
Configuração	Tensão	
	Média (V)	$\sigma$ (V)
Filtro 1.400 nm	1,7440	$1,4078 \cdot 10^{-3}$
Filtro 1.650 nm	1,7448	$4,5074 \cdot 10^{-4}$
Filtro 2.000 nm	1,7426	$1,2744 \cdot 10^{-3}$

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 4.4 observa-se que o nível máximo de tensão obtido no sistema, sem que haja absorção por uma amostra, é de 1,7548 V. Com esse resultado, as contribuições de cada conjunto de emissores foram calculadas. Constata-se que os emissores com menor comprimento de onda possuem maior contribuição.

Observando a coluna com resultado de desvio padrão das trinta medidas na Tabela 4.4, pode-se concluir que o sistema apresenta uma boa repetibilidade, visto que o maior valor encontrado foi de  $1,2106 \cdot 10^{-3}$ . Para uma melhor visualização deste resultado, é mostrado o gráfico da dispersão das trintas medidas (Figura 4.15), que resultaram nesse pior caso (LED 1.450 nm desligado).

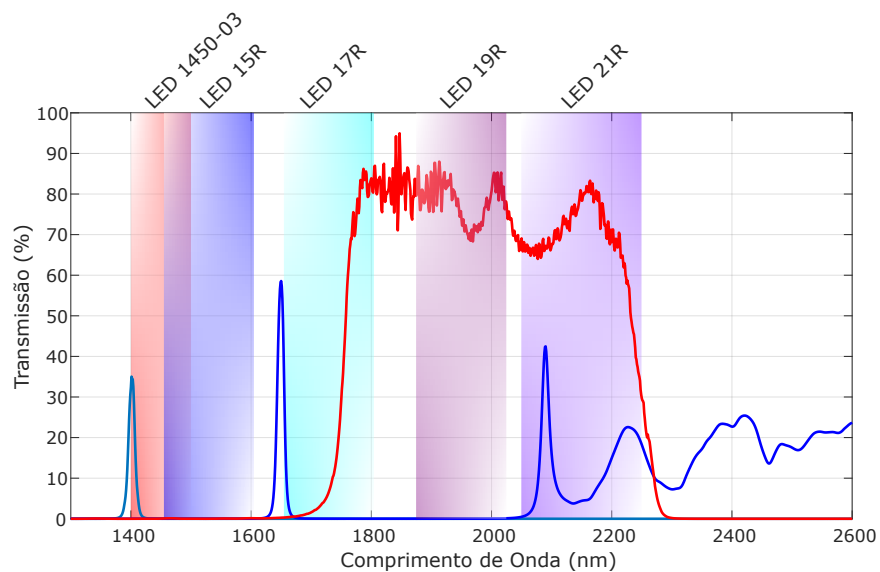
**Figura 4.15:** Dispersão das trinta medidas em torno da média 1,5033 V, com LED de 1.450 nm desligado, com desvio padrão de  $1,2106 \cdot 10^{-3}$  V.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os filtros utilizados, para simular a absorção de determinados comprimentos de onda que ocorreria em uma amostra, possuem comprimentos de onda central 1.400 nm, 1.650 nm e 2.000 nm. Como forma de visualizar as respostas dos filtros sobrepostas às regiões de emissão dos LEDs utilizados, foi elaborado o gráfico representado na Figura 4.16.

**Figura 4.16:** Sobreposição das respostas dos filtros ópticos e região de emissão dos LEDs.



Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar na Tabela 4.5 que, para os filtros 1.400 nm, 1.650 nm e 2.000 nm, foram encontrados máximos de 1,7440 V, 1,7448V e 1,7426V, respectivamente. Houve uma atenuação em relação ao valor máximo obtido na configuração anterior, já que os filtros possibilitam a passagem de luz no porta amostra. Uma parcela do espectro foi transmitida, enquanto a parcela restante foi refletiva pelo superfície esférica até ser capturada pelo sensor.

O filtro com a maior banda de transmissão teve o menor sinal lido pelo circuito de condicionamento do fotodiodo, o que é esperado, devido à resposta do filtro de 2.000 nm a três diferentes comprimentos dentre os cinco que foram usados. Como pode ser visto, o filtro de 1.650 nm teve o maior valor de leitura de tensão em comparação com os outros, devido a suas resposta a apenas um comprimento de onda (1.730 nm). Embora o de filtro 1.400 nm também permita que apenas um comprimento de onda seja transmitido, a contribuição do LED 1.450 nm é maior.

## 5 Conclusão

---

Neste trabalho foi proposto um sistema opto-eletrônico capaz de excitar vários LEDs de comprimentos de onda diferentes, onde estas são refletidas em uma esfera de integração até atingir a amostra e retornar ao sensor. O sistema foi estruturado nos seguintes módulos: emissão, controle de temperatura, esfera de integração, detecção e interface.

Foram utilizados três filtros com banda-passante diferentes posicionados no porta amostras para simular substâncias de interesse.

Os resultados mostraram que a radiação emitida pelos LEDs, com os filtros posicionados no porta amostras, possui uma parte que foi transmitida pelo filtro e outra que foi refletida pela superfície da esfera até chegar a abertura destinada ao fotodetector.

A Tabela 4.5 mostra que para cada filtro utilizado houve uma atenuação distinta. Como esperado, o sinal recebido pelo fotodiodo foi menor quando o filtro de 2.000 nm encontrava-se no porta amostras, pois parte da radiação emitida por três comprimentos utilizados foi transmitida, enquanto a radiação restante foi refletida pela superfície. Com o filtro de 1.650 nm obteve-se o maior valor de leitura em tensão, devido a sua resposta somente ao LED de 1.730 nm, a qual possui menor contribuição comparado ao LED 1.450 nm.

Com os resultados não foi possível obter uma relação satisfatória sobre o multiplicador da esfera.

O sistema apresentou uma ótima repetibilidade, onde o maior desvio padrão encontrado foi de  $1,2106 \cdot 10^{-3}$  V, para a configuração onde o LED de 1.450 nm estava desligado.

Quanto a estabilização de temperatura, o protótipo mostrou-se capaz de manter um nível constante de 25 °C enquanto eram realizados os ensaios. A Tabela 4.2 mostra que é importante manter um controle contínuo pois, para mesma configuração (todos os emissores ligados), houve uma diferença na leitura do sinal de até 39,6 mV para um  $\Delta T$  de 1 °C.

Por fim, como a estrutura do protótipo foi projetada de forma modular, é possível substituir os comprimentos de onda utilizados por outros de interesse.

A estrutura projetada possui um total de doze encaixes para os emissores, onde somente dez destes foram utilizados.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Visando a continuidade e aplicação prática do trabalho, são listadas algumas sugestões que visam o aperfeiçoamento do sistema:

- Projeto e confecção da esfera de integração com parâmetros diferentes dos apresentados neste trabalho;
- Uma melhor fixação do sensor na porta de saída da esfera de integração evitando, assim, medidas errôneas causadas pelo deslocamento do fotodiodo em relação a saída;
- Aplicação do mesmo procedimento adotado neste trabalho para substâncias que respondam ao espectro visível, visto que os emissores nesta região apresentam largura de banda significativamente menor;
- Inserção de um segundo fotodetector no sistema, de modo que o sinal de referência (sem que ocorra absorção por uma amostra) seja colhido no mesmo instante que o sinal atenuado.

## Referências

ALBERT, D. R.; TODT, M. A.; DAVIS, H. F. A low-cost quantitative absorption spectrophotometer. **Journal of Chemical Education**, v. 89, n. 11, p. 1432–1435, 2012.

AMMA, S.-i.; LUO, J.; PANTANO, C. G.; KIM, S. H. Specular reflectance (sr) and attenuated total reflectance (atr) infrared (ir) spectroscopy of transparent flat glass surfaces: a case study for soda lime float glass. **Journal of Non-Crystalline Solids**, Elsevier, v. 428, p. 189–196, 2015.

ARAÚJO, F. C.; FIALHO, R. R. **Cálculo numérico do fator de forma entre duas superfícies**. Trabalho de conclusão de curso — Univerdidade de Brasília, 2015.

BALDAUF, N. A.; RODRIGUEZ-ROMO, L. A.; MÄNNIG, A.; YOUSEF, A. E.; RODRIGUEZ-SAONA, L. E. Effect of selective growth media on the differentiation of salmonella enterica serovars by fourier-transform mid-infrared spectroscopy. **Journal of Microbiological Methods**, v. 68, n. 1, p. 106 – 114, 2007. ISSN 0167-7012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167701206001989>>.

BARRETO, I. M. **Cálculo do fator-de-forma exato entre áreas diferencial e finita usando CGS**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2008.

BORGES, G. S. **Análise e projeto de filtros ópticos**. Trabalho de conclusão de curso — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, 2007.

BURNS, E. W. C. D. A. **Handbook of Near Infrared Analysis**. 3. ed. : CRC Press, 2007. (Practical Spectroscopy). ISBN 9780849373930,084937393X.

CAI, B.; CHEN, H.; ZHANG, Y.; JIANG, J. Non-destructive determination of the quality components in fresh pork meat using near diffuse reflectance spectroscopy. In: **2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics**. 2010. p. 1–4. ISSN 2156-8464.

CORREIA, J.; EMADI, A.; WOLFFENBUTTEL, R. Uv bandpass optical filter for microspectrometers. **ECS transactions**, The Electrochemical Society, v. 4, n. 1, p. 141–147, 2007.

DANTAS, H. V.; BARBOSA, M. F.; PEREIRA, A.; PONTES, M. J.; MOREIRA, P. N.; ARAÚJO, M. C. An inexpensive nir led webcam photometer for detection of adulterations in hydrated ethyl alcohol fuel. **Microchemical Journal**, v. 135, p. 148 – 152, 2017. ISSN 0026-265X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X16306099>>.



- DEGNER, M.; DAMASCHKE, N.; EWALD, H.; LEWIS, E. High resolution led-spectroscopy for sensor application in harsh environment. In: **2010 IEEE Instrumentation Measurement Technology Conference Proceedings**. 2010. p. 1382–1386. ISSN 1091-5281.
- DIAS, L. da S. **Desenvolvimento de um fotômetro para detecção de adulteração de leite cru por adição de água baseado no uso da esfera de integração**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, 2017.
- DIAS, L. da S.; JUNIOR, J. C. da S.; FELÍCIO, A. L. de S. M.; FRANÇA, J. A. de. A nir photometer prototype with integrating sphere for the detection of added water in raw milk. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, p. 1–8, 2018. ISSN 0018-9456.
- FERNANDES, J.; PIMENTA, S.; SOARES, F. O.; MINAS, G. A complete blood typing device for automatic agglutination detection based on absorption spectrophotometry. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 64, n. 1, p. 112–119, Jan 2015. ISSN 0018-9456.
- FRIEBELE, E. J. Fiber bragg grating strain sensors: present and future applications in smart structures. **Optics and Photonics News**, Optical Society of America, v. 9, n. 8, p. 33, 1998.
- GENTILIN, F. A.; KOBO, B. T.; RIBEIRO, L. de S.; FRANÇA, J. A. de; FELÍCIO, A. L. de S.; FRANÇA, M. B. de M.; Toginho Filho, D. de O. Development and testing of a hardware platform for measuring instruments based on near-infrared diffuse reflection. **Measurement**, v. 86, p. 14 – 25, 2016. ISSN 0263-2241.
- HART, J. R.; NORRIS, K. H.; GOLUMBIC, C. Determination of the moisture content of seeds by near-infrared spectrophotometry of their methanol extracts. **Cereal Chem**, v. 39, n. 2, p. 94–99, 1962.
- HERSCHEL, W. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun. **Philosophical Transactions**, 1800.
- KAWAMURA, S.; KAWASAKI, M.; NAKATSUJI, H.; NATSUGA, M. Near-infrared spectroscopic sensing system for online monitoring of milk quality during milking. **Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety**, v. 1, n. 1, p. 37–43, Mar 2007. ISSN 1932-9954.
- KNAGGE, K.; RAFTERY, D. Construction and evaluation of a lego spectrophotometer for student use. **The Chemical Educator**, v. 7, n. 6, p. 371–375, Dec 2002. ISSN 1430-4171.
- LABSPHERE INC. **Technical Guide - Integrating sphere theory and applications**. 2017.
- LABSPHERE INC. **Technical Guide - Integration sphere radiometry and photometry**. 2017.
- LARRAIN, M.; GUESALAGA, A. R.; AGOSIN, E. A multipurpose portable instrument for determining ripeness in wine grapes using nir spectroscopy. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 57, n. 2, p. 294–302, Feb 2008. ISSN 0018-9456.

LASERTECHNIK, R. **LED23 Datasheet**. Abril 2015.

LELOUP, F. B.; LEYRE, S.; ABEELE, T. Van den; HANSELAER, P. Design of an inexpensive integrating sphere laboratory setup for the optical characterization of a light source. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. **Education and Training in Optics and Photonics**. 2015. p. TPE13.

LIANCUN, X.; ZHIZHONG, Z.; CHUNXIA, C.; YANG, G. Mineral identification and geological mapping using near-infrared spectroscopy analysis. In: **2017 International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC)**. 2017. p. 119–123.

MAHONY, N. O.; MURPHY, T.; PANDURU, K.; RIORDAN, D.; WALSH, J. Machine learning algorithms for estimating powder blend composition using near infrared spectroscopy. In: **2018 2nd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS)**. 2018. p. 1–6.

MOREIRA, M.; FELÍCIO, A. L. de S. M.; FRANÇA, J. A. de. Calibration of a photometer for quantification of ethanol in gasoline: Absorbance determination. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2018.

MOREIRA, M.; FRANÇA, J. A. de; Toginho Filho, D. de O.; BELOTI, V.; YAMADA, A. K.; FRANÇA, M. B. de M.; RIBEIRO, L. de S. A low-cost nir digital photometer based on ingaas sensors for the detection of milk adulterations with water. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 10, p. 3653–3663, May 2016. ISSN 1530-437X.

NEWPORT CORPORATION. **Integrating Sphere Components**. 2015.

NICODEMUS, F. E. Radiance. **American Journal of Physics**, v. 31, n. 5, p. 368–377, 1963. ISSN 0002-9505. Disponível em: <<http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1969512>>.

NORRIS, K. H.; HART, J. R. 4. direct spectrophotometric determination of moisture content of grain and seeds. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 4, n. 1, p. 23–30, 1996.

PASQUINI, C. Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, scielo, v. 14, p. 198 – 219, 04 2003. ISSN 0103-5053.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. A. **Introduction to Spectroscopy**. 4. ed. : Brooks/Cole, Cengage Learning, 2009. ISBN 9780495114789,0495114782.

RAHIM, A. A. A.; SAWAL, M. S. A.; TAJJUDIN, M.; HALIM, I. S. A. A non-invasive method to measure the sweetness of malaysian papaya quantitatively using nir full-transmittance technique - a preliminary study. In: **2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks**. 2011. p. 379–384.

REIS, M. V. F. dos. **Simulação numérica da transferência de calor em problemas radiativos - condutivos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

RIBEIRO, L. d. S.; GENTILIN, F. A.; FRANÇA, J. A. d.; FELÍCIO, A. L. d. S. M.; FRANÇA, M. B. d. M. Development of a hardware platform for detection of milk adulteration based on near-infrared diffuse reflection. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 65, n. 7, p. 1698–1706, July 2016. ISSN 0018-9456.

RIBEIRO, L. de S. **Desenvolvimento e teste de uma plataforma de hardware para detecção de adulteração em leite baseada em reflexão difusa no infravermelho próximo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, 2015.

SANDGREN, V. **Characterization of an integrating sphere radiation reference source**. Dissertação (Mestrado) — Chalmers University of Technology, 2011.

SHEN, Y.; TIAN, J.; LI, L.; WU, Y.; LI, L. Feasibility of non-destructive internal quality analysis of pears by using near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. In: **2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)**. 2017. p. 31–36.

SINHA, R.; GARG, S.; DEORI, K. Design of a thin-film-based optical filter for broadband multichannel communication systems. **Czechoslovak Journal of Physics**, v. 53, n. 5, p. 417–424, May 2003. ISSN 1572-9486. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1024003117903>>.

SPHEREOPTICS LLC. **Integrating sphere design and applications**. 2007.

SUN, D.-W. **Infrared Spectroscopy for Food Quality Analysis and Control**. 1. ed. : Academic Press, 2009. ISBN 9780123741363,012374136X.

TAHA, S.; RAFAT, G.; ABOSHOSHA, F.; MANSOUR, F. R. A simple home-made spectrophotometer. **Journal of Analytical Chemistry**, v. 72, n. 2, p. 239–242, Feb 2017. ISSN 1608-3199.

THORLABS. **Filtros Passa-banda IR: 1750 nm - 6000 nm Comprimento de Onda Central**. 2018. [Online; Acesso em 28 de Julho de 2018]. Disponível em: <[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=5871](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5871)>.

THORLABS. **Filtros passa-banda para o Infravermelho Próximo e para Linha Laser: Comprimento de Onda Central em 700-1650nm**. 2018. [Online; Acesso em 28 de Julho de 2018]. Disponível em: <[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1000](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1000)>.

TOMES, J. J.; FINLAYSON, C. E. Low cost 3d-printing used in an undergraduate project: an integrating sphere for measurement of photoluminescence quantum yield. **European Journal of Physics**, IOP Publishing, v. 37, n. 5, p. 055501, 2016.

VERAS, G.; SILVA, E. C.; LYRA, W. S.; SOARES, S. F. C.; GUERREIRO, T. B.; SANTOS, S. R. B. A portable, inexpensive and microcontrolled spectrophotometer based on white led as light source and cd media as diffraction grid. **Talanta**, v. 77, n. 3, p. 1155 – 1159, 2009. ISSN 0039-9140. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039914008006218>>.

WEXLER, A.; STANDARDS, U. S. N. B. of. **Humidity and Moisture: Principles and methods of measuring moisture in liquids and solids.** P.N. Winn, Jr., editor. : Reinhold Publishing Corporation, 1965. (Humidity and Moisture: Measurement and Control in Science and Industry).

WORKMAN, J.; WEYER, L. **Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy, Second Edition.** 2. ed. : CRC Press, 2012.

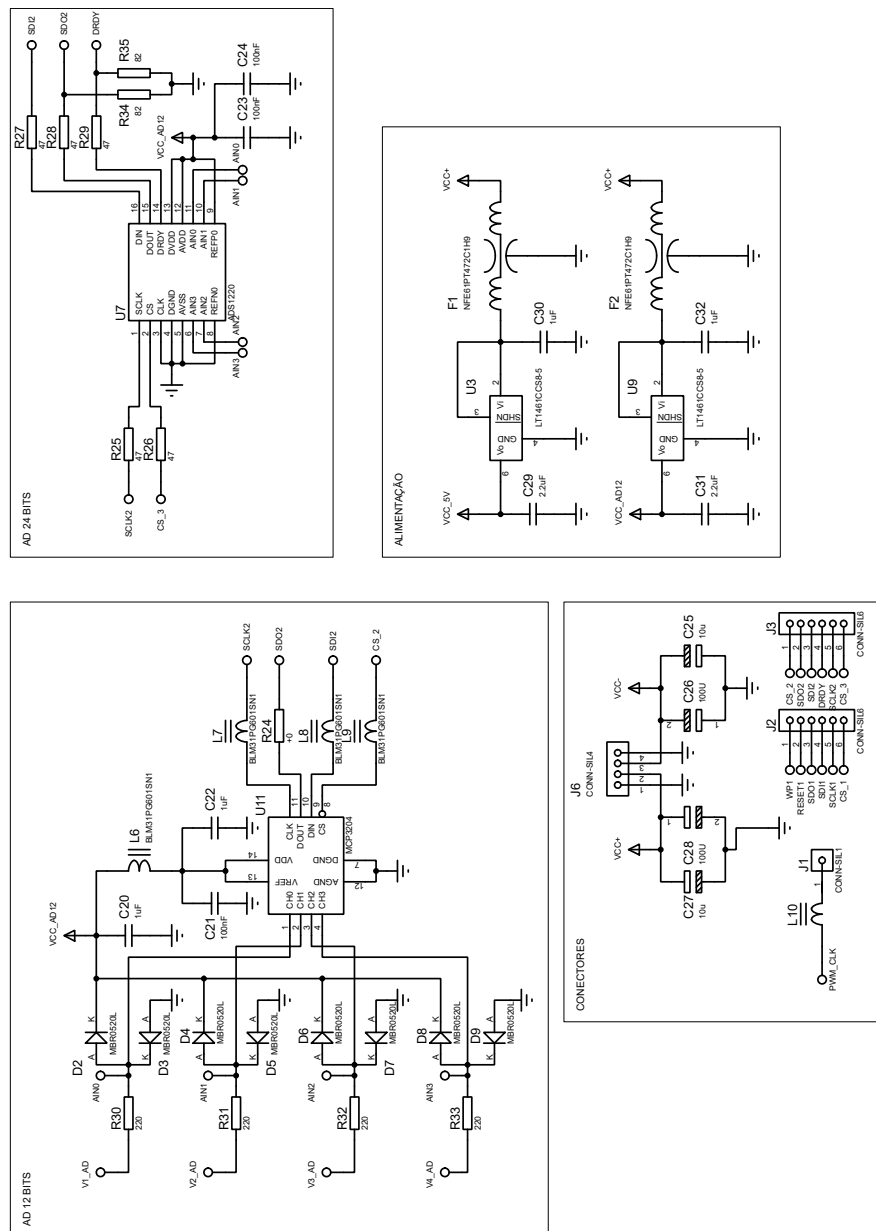
YU, G.; SHANG, Y. Near-infrared diffuse optical spectroscopies for measurement of deep tissue blood flow, oxygenation and metabolism. In: **2011 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings.** 2011. p. 52–55.

## Apêndice A - Esquemático dos Circuitos Eletrônicos

---

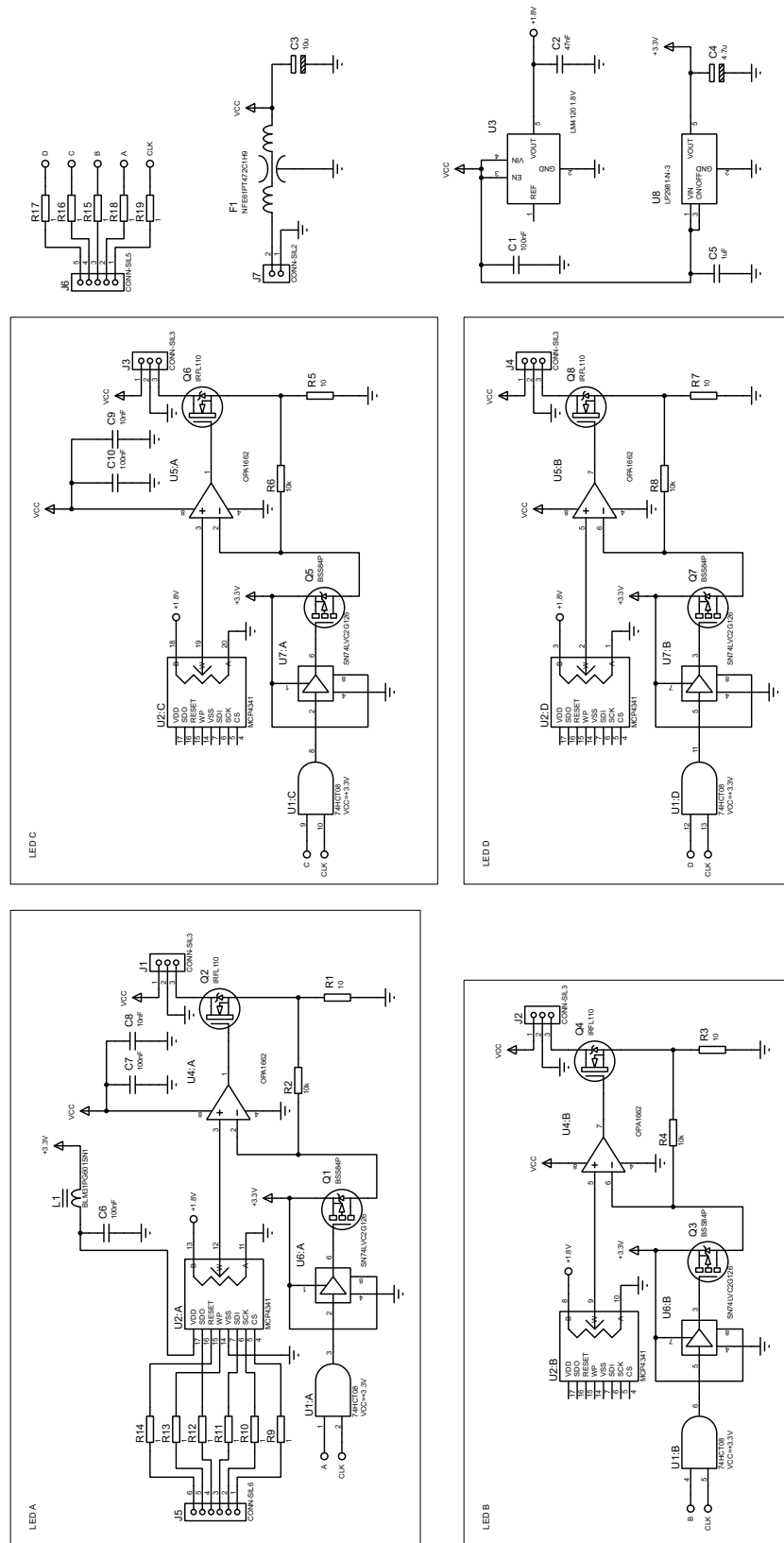


Figura A.2: Diagrama esquemático da placa do sensor pontual - Conectores, alimentação e A/D.



## A.2 Placa driver LEDs

Figura A.3: Diagrama esquemático da placa de driver dos LEDs.

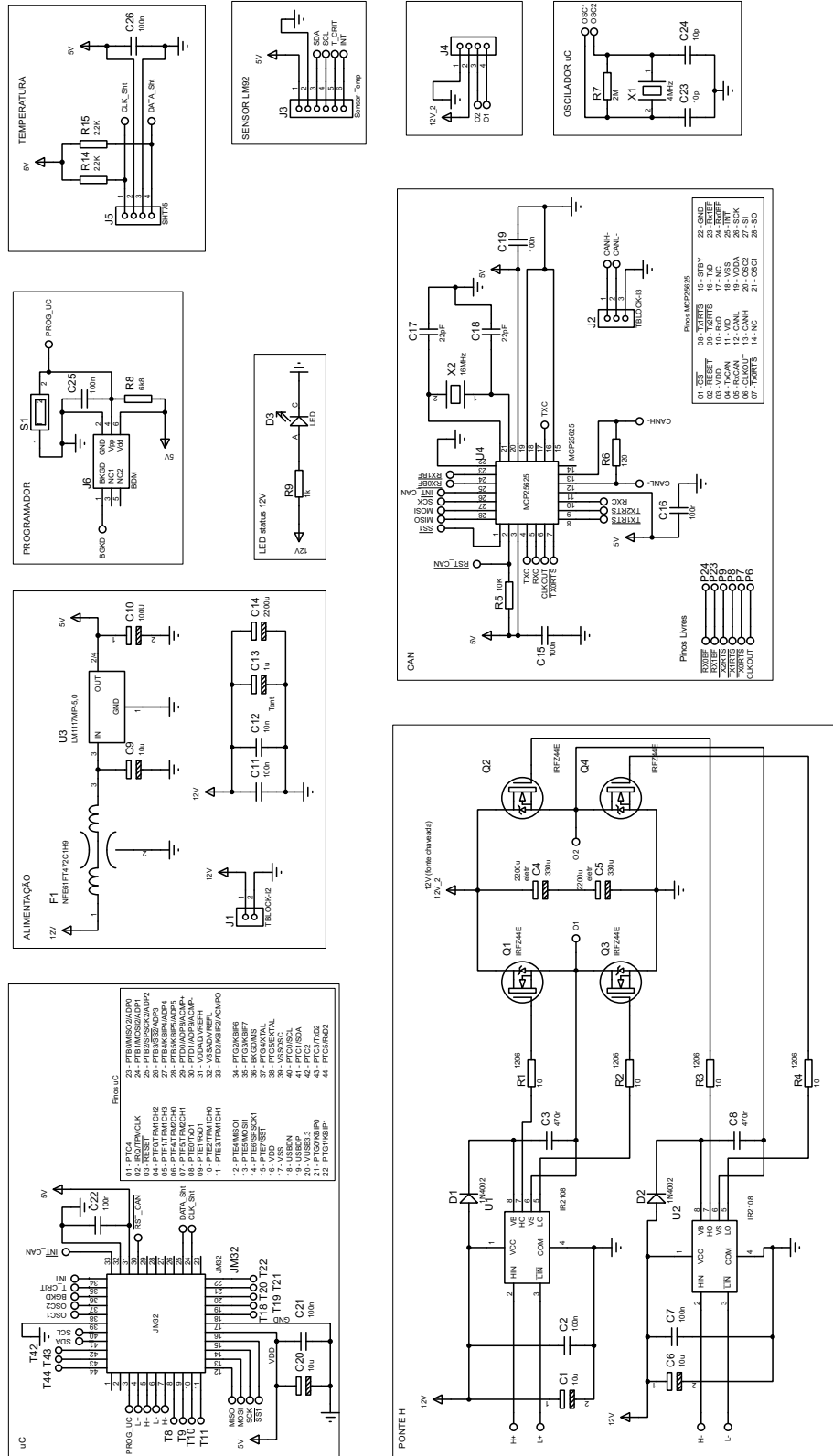






# A.4 Placa do sistema de controle de temperatura

Figura A.5: Diagrama esquemático da placa do controle de temperatura.



Apêndice B - Artigo publicado no  
ICNTET 2018 (*International Conference  
On New Trends In Engineering &  
Technology*)

---

# Development of a Hardware Platform LED-Based Spectroscopy

Priscila Pagliari Pinheiro  
Dept. of Electrical Engineering (DEEL)  
State University of Londrina (UEL)  
Londrina, Brazil  
priscilapagliari@gmail.com

Maria Bernadete de Morais França  
Dept. of Electrical Engineering (DEEL)  
State University of Londrina (UEL)  
Londrina, Brazil

**Abstract**— One way to qualify substances in complex mixtures is by observing the interaction of these substances with electromagnetic radiation. The chemical bonds present in the molecules of the substances absorb specific wavelengths, which provides much information about the physical properties of the analyzed element. Several commercial equipment uses this principle; however, they are expensive instruments. With new optoelectronic components available in the market, several authors have suggested portable instruments, with lower cost, using the same principle of commercial equipment, however only applicable to the UV-VIS range, making their development less complicated. This paper presents the project of an optoelectronic system for substance qualification using LEDs as a source of light with near-infrared emission. The system also uses InGaAs sensor, which gives fast response and good sensitivity to the spectrum for detecting light diffused reflection.

**Keywords**—optoelectronic devices; integrating sphere; infrared LEDs; IR Bandpass Filters.

## I. INTRODUCTION

Many techniques are used to qualify certain substances in complex mixtures by observing the interaction of these substances with electromagnetic radiation. The chemical bonds present in the molecules absorb energy at specific wavelengths and, measuring the intensity of light that passes through or is reflected by a sample, it is possible to measure the amount of the substance of interest. This principle is used by various equipment that is used for example: to identify powder blends for application in the pharmaceutical and food processing industries [1], fruit quality analysis [2], mineral analysis [3], monitoring the quality of cow's milk during milking [4]. However, the higher the light spectrum band analyzed by the equipment, the more expensive they become.

To overcome the high values of commercial equipment, several authors have suggested portable instruments, based on the same physical principle of commercial equipment, for specific applications. One can mention the prototypes developed for ABO, Rh phenotype, reverse, and Cross-matching human blood typing [5], measure parameters of ripeness in wine grapes [6], measurement of relative changes of tissue blood flow and oxygenation [7]. Some of these prototypes were made using LEGO pieces for construction of the optical support elements for educational use [8], [9].

All the prototypes mentioned above have in common the spectrum range observed. These prototypes measure the light intensity at wavelengths below 1,100 nm, i.e., they are prototypes geared towards the ultraviolet and visible region (UV-VIS). A typical spectrophotometer consists basically of a light source, a monochromator, and a detector. The light source used may be a deuterium lamp, which emits electromagnetic radiation in the ultraviolet region, and a second light source such as a tungsten lamp, to the visible region [10]. The monochromator is the component responsible for separating the light beam at different wavelengths and, for this physical principle to occur a CD can be used, as described in the works of [11] and [12].

Another way to separate the wavelengths is to use LEDs as a light source, which does not require the use of the monochromator. LEDs have a narrower bandwidth than other light sources, making them ideal for applications where the compounds analyzed absorb the radiation at specific wavelengths. An optical sensor system to measure the concentration of nitrogen dioxide, sulfur dioxide with a resolution below 1 ppm and ozone down to 30 ppb was developed by [13] using LEDs with peak emission at five different wavelengths. The work of [14] used LEDs with peak emission at seven different wavelengths to detect adulterations of hydrated ethyl alcohol fuel by water or methanol. Both works obtained satisfactory results using this type of light source in their prototypes.

In this work, the development of an optoelectronic system of a prototype for the qualification of substances of interest in non-homogeneous substances is presented. The range of interest ranges from 1,400 to 2,460 nm (near-infrared range). The system uses as light sources eleven LEDs with infrared emission, in six different wavelengths, where the light emitted by the sources is reflected multiple times inside an integrating sphere before being detected by an InGaAs sensor. The voltage level given by the sensor conditioning circuit, along with chemometric treatments, infer if there was absorption at a particular wavelength, thus, to determine the presence of a specific substance in the sample.

In the literature, we can highlight other authors who also proposed prototypes that measure the absorption of light in wavelengths in the near-infrared range using LEDs. For example, in the works of [15] and [16], for the quantification

of water in milk, the work of [17], for the measurement of moisture in coffee powder, and the work of [18], to the quantification of ethanol in gasoline. In these works [15]-[18], the absorption of radiation was observed in less than five different wavelengths.

## II. NEAR INFRARED SPECTROSCOPY

The NIR spectroscopy technique, which ranges from 780 nm to 2,500 nm [19], is based on the transfer of electromagnetic energy to mechanics associated with the movement of atoms. Every molecule vibrates in its fundamental state; however, the incidence of light at particular wavelengths can be absorbed by the covalent bonds of the molecule, generating stretching and folding movements [20]. The absorptions observed in the near-infrared region are overtones or combinations of the fundamental stretching bands which occur in the 3,000 - 5,800 nm regions. The bands involved are usually due to C-H, N-H or OH stretching [21].

### A. Diffuse Reflectance

There are several sampling methods associated with spectroscopy. Each technique has its advantages and limitations, so it is convenient to study them for specific applications. This work uses diffuse reflection as a sampling technique, shown in Fig. 1.

The principle of reflection is to measure the reflected radiation of the sample to be analyzed. It is widely used because it is a non-destructive technique and has a typically lower signal-to-noise ratio (SNR) than other methods. In a nutshell, diffuse reflection occurs when an infrared beam is reflected by the sample in random directions, involving dispersion and absorption. An integrating sphere is used in this technique (Fig. 2) [22].

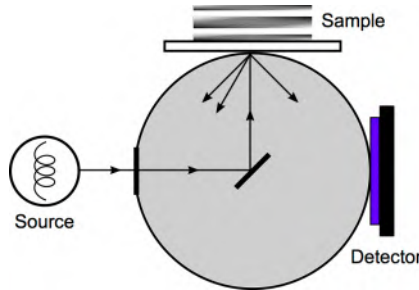


Fig. 1. Diffuse reflection in a sphere.

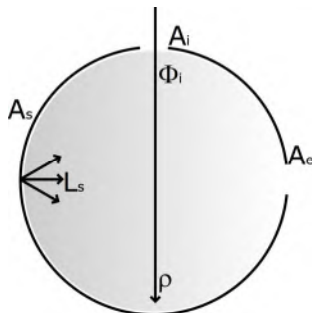


Fig. 2. Integrating sphere with input and exit ports.

### B. Integrating Sphere

The integrating sphere is a device for measuring optical radiation. Among its characteristics, the main one is that any fraction of luminous flux received by an infinitesimal area of the sphere is the same for any point of its surface.

As described in [23], the incident light in a diffuse surface creates a virtual light source for reflection. The light emanating from the surface is best described by its radiance, i. e., the flux density per unit of the solid angle. Radiance is important in predicting the amount of flow that will be collected by an optical system. The radiance,  $L_s$ , of a diffuse surface, for an input flux,  $\Phi_i$ , is given by

$$L_s = (\Phi_i \rho) / (\pi A_s), \quad (1)$$

where  $\rho$  is the reflectance of the sphere wall and  $\pi$  is the total projected solid angle from that surface.

For an integrating sphere, the radiance equation must consider both multiple surface reflections and losses through the port openings. Considering a sphere with input flux,  $\Phi_i$ , input port area,  $A_i$ , exit port area,  $A_e$ , and total area,  $A_s$ , as can be seen in Fig. 2.

The input flux is perfectly diffused by the initial reflection. The amount of flux incident on the entire sphere surface is, after the first reflection ( $n = 1$ ), given by,

$$\Phi_{incident, n=1} = \Phi_i \rho [(A_s - A_i - A_e) / A_s]. \quad (2)$$

In (2), the quantity in brackets denotes the fraction of flux received by the sphere surface that is not consumed by the port openings. The term can be calculated as  $(1 - f)$ , where  $f$  is the port fraction  $f = (A_i - A_e) / A_s$ . When more than two ports exist,  $f$  is calculated from the sum of all port areas.

After  $n$  reflections, given that  $\rho(1 - f) < 1$ ,

$$\Phi_{incident total} = \Phi_i \rho (1 - f) / (1 - \rho(1 - f)). \quad (3)$$

Equation (3) indicates that the total flux incident on the sphere surface is higher than the input flux due to multiple reflections inside the cavity. Thus, the radiance of the surface of the sphere given by (1) can be rewritten as,

$$L_s = (\Phi_i) / (\pi A_s (1 - f)) \cdot (\rho(1 - f)) / (1 - \rho(1 - f)),$$

$$L_s = (\Phi_i) / (\pi A_s) \cdot \rho / (1 - \rho(1 - f)). \quad (4)$$

Equation (4) is used to predict integrating sphere radiance for a given input flux as a function of sphere diameter, reflectance, and port fraction. Note that the radiance decreases as sphere diameter increases.

Analyzing the multiplicative terms of (4), we note that the first term is approximately equal to (1) and the second is a

unitless quantity which can be referred as the sphere multiplier,  $M$ , given by [24]:

$$M = \rho / (1 - \rho(1 - f)). \quad (5)$$

It accounts for the increase in radiance due to multiple reflections. Equation (5) shows the magnitude of the sphere multiplier,  $M$ , and its strong dependence on both the port fraction,  $f$ , and the sphere surface reflectance,  $\rho$ .

A handy rule of thumb is that for most real integrating spheres, the approximate values are  $0.94 < \rho < 0.99$  and  $0.02 < f < 0.05$ , thus the sphere multiplier is in the range from 10 to 30.

### III. PROPOSED SYSTEM

The prototype diagram is presented in Fig. 3. The system consists of emission modules, integrating sphere, detection, interface and temperature control.

In this prototype was adopted a set of eleven LEDs with emission in the infrared range with wavelengths in the range of 1.400 nm to 2.350 nm.

The emitters are individually driven via a driver circuit, thus ensuring the same light output at all drives. In the circuit, the microcontroller MC9S08JM32 of NXP Semiconductors is responsible for generating the drive signal while a digital potentiometer is used to determine the current value for each emitter.

The light emitted by the LEDs passes through a 27 mm diameter and 13 mm focal length aspheric lens, manufactured by Edmund Optics, coupled to the integrating sphere to allow convergence of the infrared rays emitted by the diodes. After the incident light on the sample, one part is absorbed while another is reflected multiple times by the sphere until it is directed to the sensor. The photodiode used is the GaInAsSb-based PD24-03 model, manufactured by Roithner LaserTechnik, which has a sensitivity in the range of 1,000 nm to 2,430 nm. The signal received by the photodiode is conditioned through several stages before being sampled by a 24-bit ADS1220 ADC from Texas Instruments.

For that the temperature does not vary and consequently change the characteristics of the components, a temperature control module was used to guarantee 25 °C in the compartment containing the LEDs, sphere, and sensor. To heated or cooled the enclosed contents with the control, a Peltier chip was used. For reverse polarity of the Peltier chip, an H-bridge was used.

Finally, the interface module uses a 20x2 alphanumeric display to display the current temperature in the enclosure and also to send commands to the prototype via the buttons located on its panel.

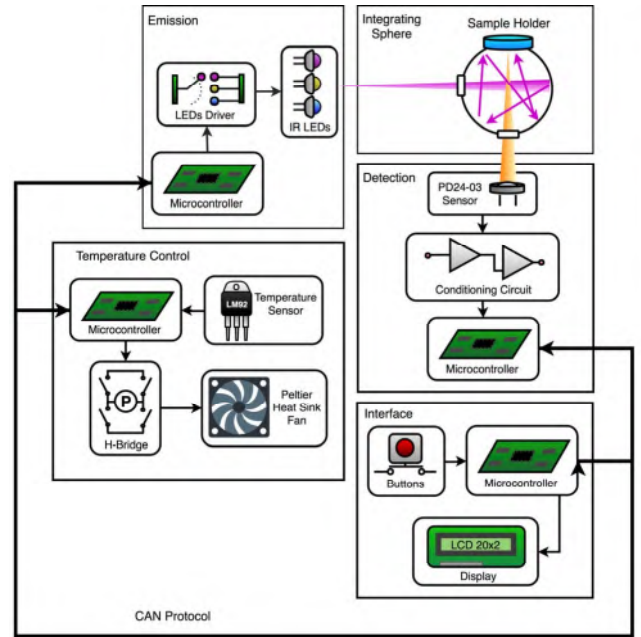


Fig. 3. Prototype block diagram.

Communication between the modules is established by the CAN (Controller Area Network) protocol. The CAN is a real-time communication protocol with a high level of security and multi-master capability, which also includes the multicast concept, which allows the message to be transmitted to a set of receivers simultaneously.

### IV. OPTICAL SYSTEM

#### A. Integrating Sphere Development

The optical structure developed is shown in Fig. 4. The structure is composed of an integrating sphere with three ports, the first one for light input, the second for sample and the last one for the exit of the reflected light to the detection system. In addition to the integrating sphere, the system contains a converging lens, LEDs with infrared emission range, photodiode and glass to ensure insulation between sphere and sample.

The light emitted by the LEDs is converged by the lens and directed to the sample, where part of the energy will be absorbed and partly reflected diffusely. The integrating sphere is coated with a polymer reflecting the rays until they exit through the port where the sensor is located. Once the rays reach the sensor, the signal is conditioned and sampled for further analysis.

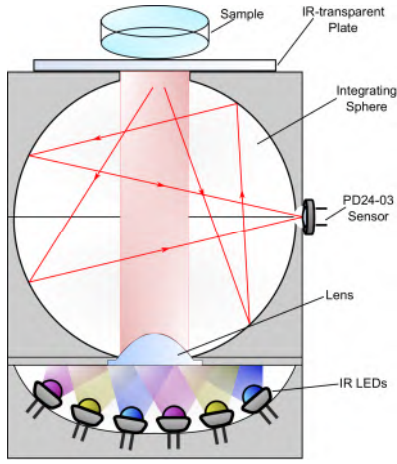


Fig. 4. Optical structure of the system.

The sphere structure was printed on ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) material using a 3D printer, with an internal diameter of 60 mm, a 15 mm diameter port for light, a 12.50 mm port for the sample, and one port with 3 mm for the detection system. With this configuration, a sphere with  $M$  multiplier equal to 5 was obtained, with reflectance index  $\rho$  equal to 0.85.

## V. CONDITIONING CIRCUITS

### A. Driver Circuit for the NIR Emitters

Fig. 5 shows the diagram used to activate the LED identified as A. It is essential that the light be pulsed; otherwise, the detector has no sensitivity to the signal. In this way, a pulsed drive control was used through control pins and an AND gate logic circuit. The clock signal determines the frequency of the light sources. In this system was used 700 Hz.

The current value is determined by setting a digital potentiometer. The potentiometer allows adjusting the voltage supplying the non-inverting input of a buffer circuit, which can vary from 1.8 V to 0 V, corresponding to the voltage value of the Source terminal of a MOSFET transistor. Because the circuit has a digital potentiometer, the adjustment of the output current can be done via software, through SPI (Serial Peripheral Interface) communication protocol.

The LEDs that were used are shown in the Table I. Were chosen LEDs with emission range that could cover a range of the infrared spectrum coincident with the filters' bandpass that were used for tests.

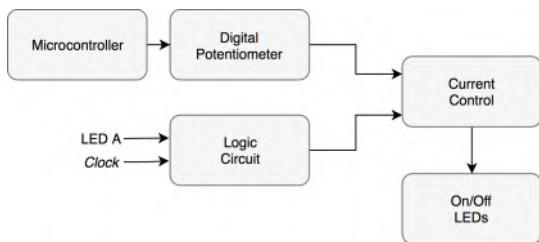


Fig. 5. Turn LED on/off circuit diagram.

TABLE I. LEDS USED IN THE SYSTEM

Component	$\lambda$ (nm)	FWHM (nm)	Emission Range (nm)
LED 1450-03	1,450	100	1,400 – 1,500
LED 15R	1,530	150	1,455 – 1,605
LED 17R	1,730	150	1,655 – 1,800
LED 19R	1,950	150	1,875 – 2,025
LED 21R	2,150	200	2,050 – 2,250
LED 23PR	2,350	220	2,240 – 2,460

### B. Photodiode Conditioning Circuit

The electronic conditioning circuit is divided into four stages, as shown in Fig. 6. In the first stage, light reflected by the sample is converted into an electric signal proportional to its intensity through a transimpedance amplifier. The light that arrives on the photodetector generates an electric current where, this current, is converted into voltage through the transimpedance amplifier. In the second stage, the voltage signal is pre-amplified to pass through the Lock-In amplifier. The Lock-In amplifier minimizes the influence of external sources on the system and attenuates signal noise by using a reference signal of the same frequency of the received signal, whereby it can detect signals of low intensity even under noise. Finally, in the fourth, and last stage, the signal is applied to the gain and offset circuit. The MCP4341 digital potentiometer was used so that the gain could be controlled via software, in sequence, the resulting signal is digitized by the ADC.

### C. Temperature Control System

The temperature variation in the system affects the central wavelength emitted by the LEDs and, also, it can vary the intensity of light emission. The variation of the light intensity emitted by the LEDs is undesirable for the system as it may cause erroneous measurements. It is believed that the increase or reduction of the signal received by the photodetector is due to absorption of the analyzed sample and not due to changes caused by temperature difference. Although some components operate in the range  $-200$  °C to  $+50$  °C, their parameters are not the same across the range, as there is a reduction in the emission intensity of the LED with increasing temperature, an undesired characteristic for the system.

In order to reduce the influence of temperature in the system, the optical structure composed of the integrating sphere, conditioning circuit, photodiode, and LEDs were allocated inside a closed compartment with temperature control.

Inside the compartment, the temperature is stabilized at 25 °C so that the thermal effects acting on the components are minimized. The temperature control system consists of a Peltier chip, heatsinks, fans and temperature sensor.

The temperature value inside the compartment is measured by the LM92. This integrated circuit has a digital output, Inter-Integrated Circuit (I2C), an accuracy of  $\pm 0.33$  °C, and 12-bit resolution for reading and a sign bit (positive or negative temperature).



The thermoelectric chip, under the Peltier effect, produces a temperature gradient at the junction of two conductors/semiconductors of different materials when subjected to a voltage. This effect causes a cooling occurs while the other junction heats. The heating/cooling can be controlled according to the polarization of the voltage applied to its terminals with an H-bridge.

The performance of the temperature control is performed in closed-loop with Proportional-Integral (PI) controller, which causes the system to control the temperature autonomously.

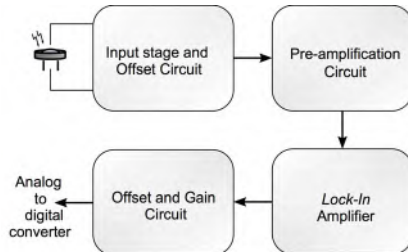


Fig. 6. Conditioning circuit block diagram.

## VI. METHODOLOGY

A reflective surface, with  $\rho$  equal to the sphere, was placed in the sample port. All LEDs were turned on for measurement of the voltage signal at the output of the detection circuit without absorption at a specific wavelength by a sample. Once all the LEDs were measured, each set of LEDs with the same emission range was turned off, separately, to measure their contribution to the total voltage signal of the system output.

After knowing the voltage contribution of each wavelength in the total voltage signal, three optical filters with different wavelengths were used to verify the operation of the proposed prototype. The filters used are bandpass type, manufactured by ThorLabs, with central wavelengths  $1,400 \pm 12$  nm,  $1,650 \pm 12$  nm and  $2,000 \pm 500$  nm. The filters were positioned in two distinct locations of the prototype, as shown in Fig. 7.

Fig. 7 a) shows the filter positioned in the sample port. In this configuration, with all the LEDs on, a small portion of the radiation emitted by the LEDs passes through the filter, while the surface of the sphere reflects most of the signal and are detected by the sensor.

In the second configuration, shown in Fig. 7 b), the optical filter is positioned between the output port of the sphere and the sensor. The whole sphere reflects the radiation emitted by the set of LEDs, but only the portion referring to the filter band reaches the sensor.

The radiation incident on the sensor, is converted into voltage by the transimpedance circuit of the sensor's conditioning, is collected by the ADC for one minute, with a resolution of 20 Hz, resulting in 1,200 points, which is performed the arithmetic mean to obtain the voltage of the circuit.

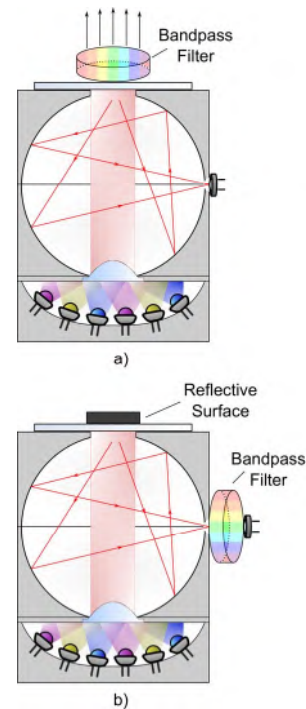


Fig. 7. Filters position on the structure.

## VII. RESULTS

The Table II shows the voltage obtained in the detection circuit without interference from the filters. The most significant contribution to the total signal is from the LED with emission around 1,450 nm, which is expected, since the information provided by the manufacturer, compared with the other lengths used, is the one with the highest power.

The results obtained with the filters are shown in Table III. With the  $2,000 \pm 500$  nm filter positioned at the sample port, the radiation reflected by the sphere and received by the sensor was 98.22% of the total emitted. While with the  $1,400 \pm 12$  nm filter, the radiation received by the sensor was 99.25%. With the  $2,000 \pm 500$  nm filter positioned at the exit port of the sphere, the percentage of radiation received by the sensor was 65.54%, while for the 1,400 nm filter, the sensor received 64.96%, reversing the situation of the previous test.

These results show that there was, indeed, a difference in the measurements made for the different wavelengths used for testing, where the radiation emitted by the LEDs coincident with the filter bandwidth was "absorbed", while the remaining portion of the radiation was diffusely reflected by the sphere to reach the sensor. Thus, it is possible to show that when placing a sample in the system to be analyzed, the radiation emitted by the LEDs will be directed to the sample, which will absorb part of this energy, and reflect the rest diffusely. The integrating sphere is used to integrate the light flux into an output port, where the incident rays arrive on the sensor.



TABLE II. CONTRIBUTION OF EACH SET OF LEDS USED IN THE SYSTEM

LED	Lock-In Voltage (V)	Contribution (V)
(11 LEDS) All on	1.7785	-
(1 LED) 1,450 Off	1.5022	0.2763
(2 LEDS) 1,530 Off	1.6056	0.1729
(2 LEDS) 1,730 Off	1.6596	0.1189
(3 LEDS) 1,950 Off	1.7684	0.0101
(2 LEDS) 2,150 Off	1.7559	0.0226
(1 LED) 2,350 Off	1.7605	0.0180

TABLE III. CIRCUIT LOCK-IN VOLTAGE USING THE FILTERS

Filter (nm)	Lock-In Voltage with Filter located on	
	Sample Port (V)	Exit Port (V)
1,400 ± 12	1.7652	1.1553
1,650 ± 12	1.7546	1.1489
2,000 ± 500	1.7469	1.1656

### VIII. CONCLUSION

This work showed the development of an optoelectronic system for the qualification of non-homogeneous substances. The tests to verify the operation of the system were carried out with three filters with distinct bandwidth, where it was shown that the detection system only received part of the radiation related to the emission reflected by the sphere, when the filter was positioned in the sample port, or emission equal to the filter bandpass, when positioned at the exit port of the sphere. Thus, it is possible to infer the wavelengths that were absorbed when analyzing a sample, and it is feasible to identify the compound identifying the band in which a reduction in the voltage reached the sensor occurred.

### Acknowledgment

The authors would like to thanks Capes for financial support.

### References

- [1] N. O. Mahony, T. Murphy, K. Panduru, D. Riordan, and J. Walsh, "Machine learning algorithms for estimating powder blend composition using near infrared spectroscopy," in 2018 2nd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS), April 2018, pp. 1–6.
- [2] Y. Shen, J. Tian, L. Li, Y. Wu, and L. Li, "Feasibility of non-destructive internal quality analysis of pears by using near-infrared diffuse reflectance spectroscopy," in 2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), July 2017, pp. 31–36
- [3] X. Liancun, Z. Zhizhong, C. Chunxia, and G. Yang, "Mineral identification and geological mapping using near-infrared spectroscopy analysis," in 2017 International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC), Dec 2017, pp. 119–123
- [4] S. Kawamura, M. Kawasaki, H. Nakatsuji, and M. Natsuga, "Nearinfrared spectroscopic sensing system for online monitoring of milk quality during milking," Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, vol. 1, no. 1, pp. 37–43, Mar 2007
- [5] J. Fernandes, S. Pimenta, F. O. Soares, and G. Minas, "A complete blood typing device for automatic agglutination detection based on

- absorption spectrophotometry," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 64, no. 1, pp. 112–119, Jan 2015.
- [6] M. Larrain, A. R. Guesalaga, and E. Agosin, "A multipurpose portable instrument for determining ripeness in wine grapes using nir spectroscopy," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 57, no. 2, pp. 294–302, Feb 2008.
- [7] G. Yu and Y. Shang, "Near-infrared diffuse optical spectroscopies for measurement of deep tissue blood flow, oxygenation and metabolism," in 2011 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings, Nov 2011, pp. 52–55.
- [8] K. Knagge and D. Raftery, "Construction and evaluation of a lego spectrophotometer for student use," The Chemical Educator, vol. 7, no. 6, pp. 371–375, Dec 2002.
- [9] D. R. Albert, M. A. Todt, and H. F. Davis, "A low-cost quantitative absorption spectrophotometer," Journal of Chemical Education, vol. 89, no. 11, pp. 1432–1435, 2012.
- [10] G. S. K. J. A. V. Donald L. Pavia, Gary M. Lampman, Introduction to Spectroscopy. Brooks/Cole, Cengage Learning, 2009.
- [11] G. Veras, E. C. Silva, W. S. Lyra, S. F. C. Soares, T. B. Guerreiro, and S. R. B. Santos, "A portable, inexpensive and microcontrolled spectrophotometer based on white led as light source and cd media as diffraction grid," Talanta, vol. 77, no. 3, pp. 1155 – 1159, 2009.
- [12] S. Taha, G. Rafat, F. Aboshosha, and F. R. Mansour, "A simple homemade spectrophotometer," Journal of Analytical Chemistry, vol. 72, no. 2, pp. 239–242, Feb 2017.
- [13] M. Degner, N. Damaschke, H. Ewald, and E. Lewis, "High resolution led-spectroscopy for sensor application in harsh environment," in 2010 IEEE Instrumentation Measurement Technology Conference Proceedings, May 2010, pp. 1382–1386.
- [14] H. V. Dantas, M. F. Barbosa, A. Pereira, M. J. Pontes, P. N. Moreira, and M. C. Araújo, "An inexpensive nir led webcam photometer for detection of adulterations in hydrated ethyl alcohol fuel," Microchemical Journal, vol. 135, pp. 148 – 152, 2017.
- [15] M. Moreira, J. A. de França, D. de Oliveira Toghinho Filho, V. Beloti, A. K. Yamada, M. B. de M. França, and L. de Souza Ribeiro, "A lowcost nir digital photometer based on ingaas sensors for the detection of milk adulterations with water," IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 10, pp. 3653–3663, May 2016.
- [16] L. d. S. Ribeiro, F. A. Gentilin, J. A. de França, A. L. d. S. M. Felício, and M. B. d. M. França, "Development of a hardware platform for detection of milk adulteration based on near-infrared diffuse reflection," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 65, no. 7, pp. 1698–1706, July 2016.
- [17] F. A. Gentilin, B. T. Kobo, L. de Souza Ribeiro, J. A. de França, A. L. de S.M. Felício, M. B. de M. França, and D. de O. Toghinho Filho, "Development and testing of a hardware platform for measuring instruments based on near-infrared diffuse reflection," Measurement, vol. 86, pp. 14 – 25, 2016.
- [18] M. Moreira, A. L. de Souza Madureira Felício, and J. A. de França, "Calibration of a photometer for quantification of ethanol in gasoline: Absorbance determination," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018.
- [19] J. Workman and L. Weyer, Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy, Second Edition, 2nd ed. CRC Press, 2012.
- [20] C. Pasquini, Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications, Journal of the Brazilian Chemical Society, vol. 14, pp. 198 – 219, 04 2003.
- [21] B. H. Stuart, Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications, 1st ed., ser. Analytical Techniques in the Sciences AnTs \*. Wiley, 2004.
- [22] D.-W. Sun, Infrared Spectroscopy for Food Quality Analysis and Control, 1st ed. Academic Press, 2009.
- [23] Integrating sphere design and applications, SphereOptics LLC, 2007.
- [24] Technical Guide - Integration sphere radiometry and photometry, Labsphere INC.

Anexo A - *Datasheet* do fotodiodo  
PD24-03

---



## PD24-03

- Mid-IR PD
- Sensitivity: 1.0 – 2.43  $\mu\text{m}$
- Sensitive Area Diameter:  $\varnothing$  300  $\mu\text{m}$
- TO-18 Can, with cap
- Without window



### Description

**PD24-03** is fabricated from narrow band-gap GaInAsSb/AlGaAsSb-based heterostructures lattice matched to GaSb substrate. The photodiode chip has a photosensitive area of  $\varnothing$  300  $\mu\text{m}$  and is disposed inside a TO-18 package.

The PD is specified with a maximum sensitivity wavelength of 1.85 – 2.30  $\mu\text{m}$  and a cut-off wavelength at 2.42 – 2.43  $\mu\text{m}$ .

### Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Values		Unit
		Min.	Max.	
Operating Temperature	$T_{CASE}$	- 50	+ 60	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature	$T_{STG}$	- 50	+ 80	$^{\circ}\text{C}$
Lead Solder Temperature *	$T_{SLD}$		+ 230	$^{\circ}\text{C}$

\* must be completed within 5 seconds

design for higher storage/operating temperature is available under request

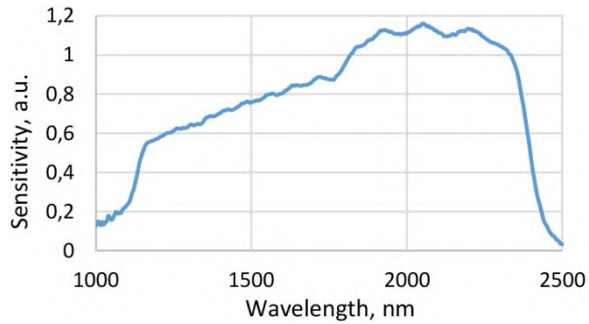
### Photodiode Characteristics $(T_{CASE}=25^{\circ}\text{C})$

Parameter	Symbol	Min.	Values		Unit
			Typ.	Max.	
Sensitive Area Diameter	d		300		$\mu\text{m}$
Cut-off Wavelength	$\lambda_{cut}$	2.42		2.43	$\mu\text{m}$
Max. Sensitivity Wavelength (>90%)	$\lambda_P$	1.85		2.30	$\mu\text{m}$
Reverse Voltage	$V_R$		1		V
Dark Current ( $V_R=-0.1\text{V}$ )	$I_D$	10		60	$\mu\text{A}$
Shunt Resistance ( $V_R=-10\text{mV}$ )	$R_{STH}$	5		20	k $\Omega$
Capacitance	C	50		200	pF
Sensitivity	S	0.7		1.0	A/W
Noise Equivalent Power	NEP	$0.9 \cdot 10^{-12}$		$2.5 \cdot 10^{-12}$	$\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$
Detectivity	$D^*$	$2 \cdot 10^{10}$		$5 \cdot 10^{10}$	$\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}} \cdot \text{W}^{-1}$

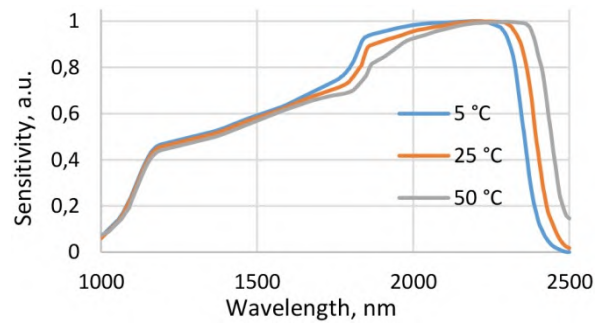


## Performance Characteristics

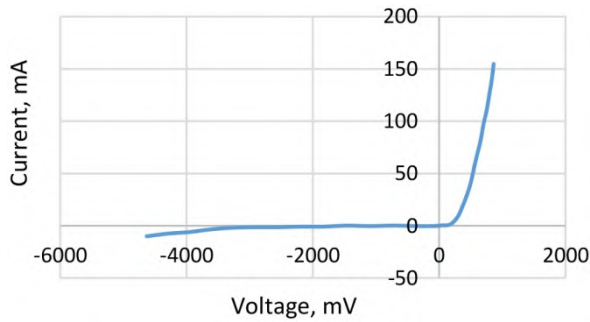
Spectral Response (typical)



Temperature Shift of Spectral Response



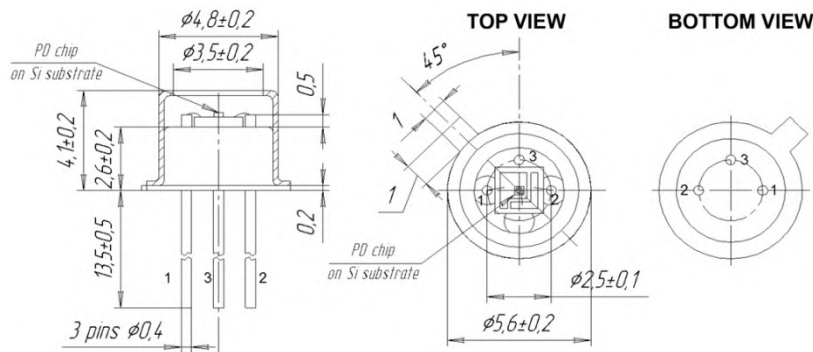
Typ. Current-Voltage Characteristic



## Outline Dimensions

PD24-03

TO-18, without window



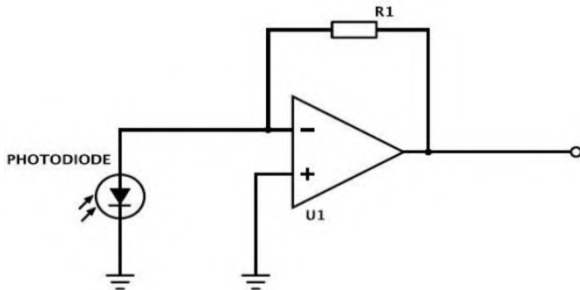
All Dimensions in mm

Lead	Description
PIN 1	PD Cathode
PIN 2	PD Anode
PIN 3	Ground

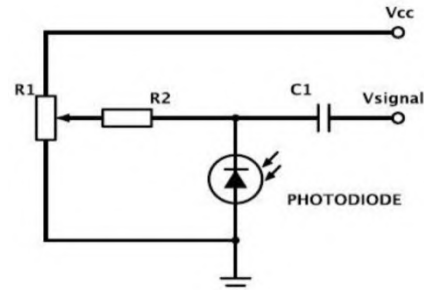


## Recommended Modes of Photodiode Operation

### Photovoltaic Mode



### Photoconductive Mode



We recommend using photovoltaic mode, when PD is used under reverse bias.  
Use Photoconductive mode (mode with reverse bias) with caution!

## Precautions

### Operation:

- Check your connection circuits before turning on the PD.
- Mind the PD polarity: PD anode is marked with a RED dot.
- DO NOT connect the PD to the multimeter.

### Soldering:

- Do avoid overheating of the PD
- Do avoid electrostatic discharge (ESD)
- Do avoid mechanical stress, shock, and vibration
- Do only use non-corrosive flux
- Do not apply current to the LED until it has cooled down to room temperature after soldering

### Static Electricity:

PDs are **sensitive to electrostatic discharge (ESD)**. Precautions against ESD must be taken when handling or operating these PDs. Surge voltage or electrostatic discharge can result in complete failure of the device.



Anexo B - *Datasheet* do conversor  
analógico-digital ADS1220

---

# ADS1220 4-Channel, 2-kSPS, Low-Power, 24-Bit ADC with Integrated PGA and Reference

## 1 Features

- Low Current Consumption: As Low as 120  $\mu$ A (typ) in Duty-Cycle Mode
- Wide Supply Range: 2.3 V to 5.5 V
- Programmable Gain: 1 V/V to 128 V/V
- Programmable Data Rates: Up to 2 kSPS
- Up to 20-Bits Effective Resolution
- Simultaneous 50-Hz and 60-Hz Rejection at 20 SPS with Single-Cycle Settling Digital Filter
- Two Differential or Four Single-Ended Inputs
- Dual Matched Programmable Current Sources: 10  $\mu$ A to 1.5 mA
- Internal 2.048-V Reference: 5 ppm/ $^{\circ}$ C (typ) Drift
- Internal 2% Accurate Oscillator
- Internal Temperature Sensor: 0.5 $^{\circ}$ C (typ) Accuracy
- SPI-Compatible Interface (Mode 1)
- Package: 3.5-mm x 3.5-mm x 0.9-mm VQFN

## 2 Applications

- Temperature Sensor Measurements:
  - Thermistors
  - Thermocouples
  - Resistance Temperature Detectors (RTDs): 2-, 3-, or 4-Wire Types
- Resistive Bridge Sensor Measurements:
  - Pressure Sensors
  - Strain Gauges
  - Weigh Scales
- Portable Instrumentation
- Factory Automation and Process Control

## 3 Description

The ADS1220 is a precision, 24-bit, analog-to-digital converter (ADC) that offers many integrated features to reduce system cost and component count in applications measuring small sensor signals. The device features two differential or four single-ended inputs through a flexible input multiplexer (MUX), a low-noise, programmable gain amplifier (PGA), two programmable excitation current sources, a voltage reference, an oscillator, a low-side switch, and a precision temperature sensor.

The device can perform conversions at data rates up to 2000 samples-per-second (SPS) with single-cycle settling. At 20 SPS, the digital filter offers simultaneous 50-Hz and 60-Hz rejection for noisy industrial applications. The internal PGA offers gains up to 128 V/V. This PGA makes the ADS1220 ideally-suited for applications measuring small sensor signals, such as resistance temperature detectors (RTDs), thermocouples, thermistors, and resistive bridge sensors. The device supports measurements of pseudo- or fully-differential signals when using the PGA. Alternatively, the device can be configured to bypass the internal PGA while still providing high input impedance and gains up to 4 V/V, allowing for single-ended measurements.

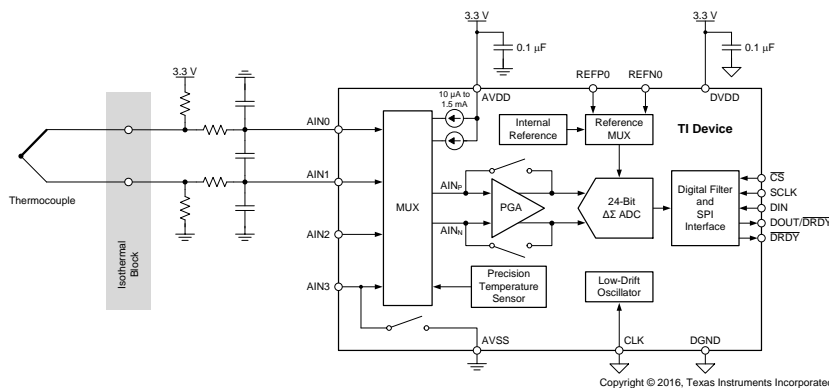
Power consumption is as low as 120  $\mu$ A when operating in duty-cycle mode with the PGA disabled. The ADS1220 is offered in a leadless VQFN-16 or a TSSOP-16 package and is specified over a temperature range of  $-40^{\circ}$ C to  $+125^{\circ}$ C.

### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
ADS1220	VQFN (16)	3.50 mm x 3.50 mm
	TSSOP (16)	5.00 mm x 4.40 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

### K-Type Thermocouple Measurement



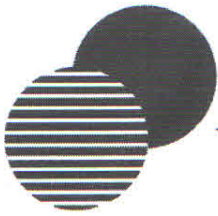
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated



## Anexo C - *Datasheet* dos emissores utilizados

---



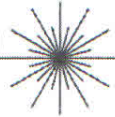


# ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

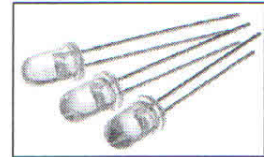
WIEDNER HAUPTSTRASSE 76  
TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

1040 VIENNA

AUSTRIA



## LED1450-series



### TECHNICAL DATA

#### Infrared LED

#### InGaAsP

LED1450-series are InGaAsP LEDs mounted on a lead frame and encapsulated in various types of epoxy lens, which offers different design settings.  
On forward bias, it emits a high power radiation of typical 2.5 mW at a peak wavelength at 1450 nm.

#### Specifications

- Structure: InGaAsP
- Peak Wavelength: typ. 1450 nm
- Optical Output Power: typ. 2.5 mW
- Resin Material: Epoxy resin
- Solder: Lead free



#### Absolute Maximum Ratings ( $T_a=25^\circ\text{C}$ )

Type	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation	$P_D$	140	mW
Forward Current	$I_F$	100	mA
Pulse Forward Current	$I_{FP}$	1000	mA
Reverse Voltage	$V_R$	5	V
Operating Temperature	$T_{OP}$	-40 ... +85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{STG}$	-40 ... +100	$^\circ\text{C}$
Soldering Temperature (for 5 sec.)	$T_{SOL}$	265	$^\circ\text{C}$

#### Electro-Optical Characteristics ( $T_a=25^\circ\text{C}$ )

Item	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	$V_F$	$I_F = 50 \text{ mA}$	-	1.0	1.5	V
Reverse Current	$I_R$	$V_R = 5 \text{ V}$	-	-	10	$\mu\text{A}$
Radiated Power	$P_O$	$I_F = 50 \text{ mA}$	1.3	2.5	-	mW
Peak Wavelength	$\lambda_P$	$I_F = 50 \text{ mA}$	1400	1450	1500	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F = 50 \text{ mA}$	-	100	-	nm
Rise Time	$t_r$	$I_F = 50 \text{ mA}$	-	10	-	ns
Fall Time	$t_f$	$I_F = 50 \text{ mA}$	-	10	-	ns

## LIGHT EMITTING DIODE

LED15-PR-22,23,24,25,26

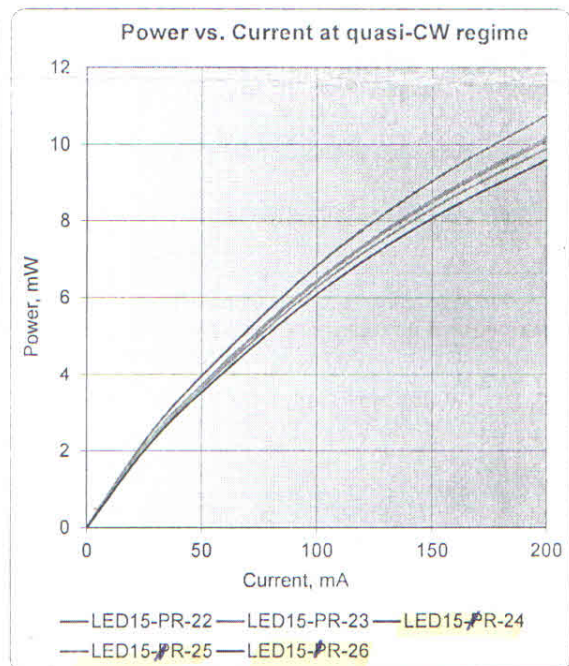
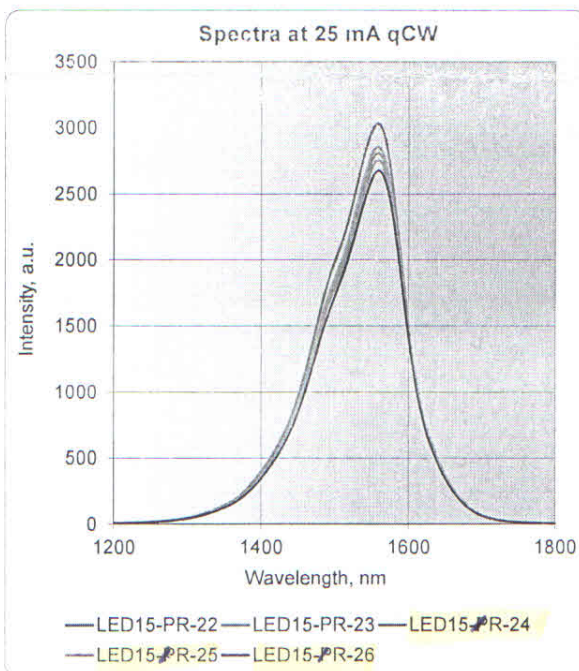
Serial Number P-1550-63,65,66,67,68

Parameter	Units	Conditions	Ratings				
			22	23	24	25	26
Ordinal number			22	23	24	25	26
Peak emission wavelength	$\mu\text{m}$	T=300 K	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
FWHM of the emission band	nm		125	125	125	125	125
Optical power, qCW mode	mW	25 mA	2,1	2,1	2,2	2,1	2,0
Optical power, qCW mode	mW	50 mA	3,6	3,7	4,0	3,7	3,5
Optical power, qCW mode	mW	100 mA	6,3	6,5	6,8	6,4	6,1
Optical power, qCW mode	mW	150 mA	8,3	8,6	9,0	8,5	8,1
Optical power, qCW mode	mW	200 mA	9,9	10,2	10,8	10,1	9,6
Operating Temperature	$^{\circ}\text{C}$		-60...+90				
Type of heatsink			TO-18 with Parabolic Reflector				
Date			15.09.16				

Maximum Direct Current (DC) 100 mA

Maximum current 200 mA quasi-CW (pulse duration 1ms, repetition rate 0,5kHz (duty cycle 50%))

Maximum pulsed current 1 A (pulse duration 20 us, repetition rate 0,5 kHz (duty cycle 1 %))



**ROITHNER LASERTECHNIK GmbH**  
 WEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA  
 TEL. +43 1 586 52 43 -0. FAX. +44 0FFICE@ROITHNER-LASER.COM





## LIGHT EMITTING DIODE

LED17-PR-63,64,65,66,67

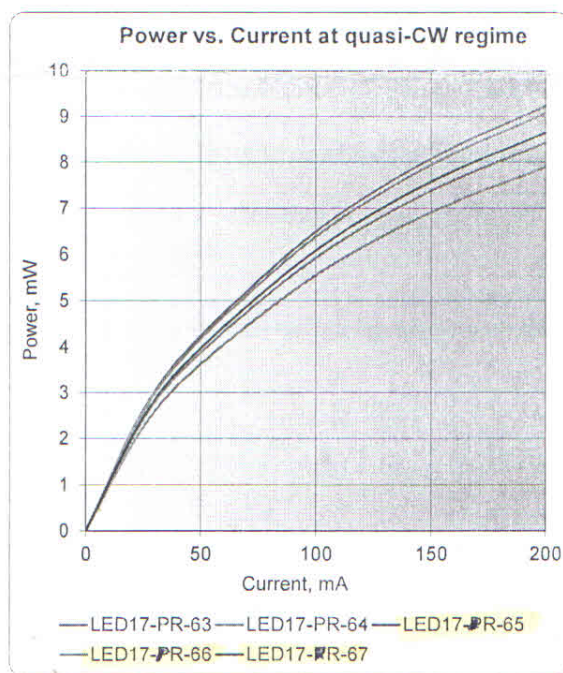
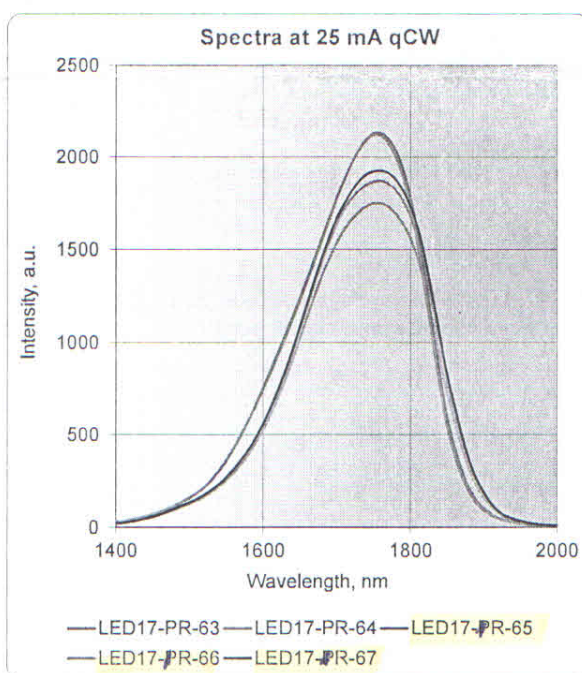
Serial Number P-1750-205,206,207,208,209

Parameter	Units	Conditions	Ratings				
			63	64	65	66	67
Ordinal number			63	64	65	66	67
Peak emission wavelength	$\mu\text{m}$	T=300 K	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76
FWHM of the emission band	nm		205	205	200	190	205
Optical power, qCW mode	mW	25 mA	2,4	2,2	2,6	2,6	2,5
Optical power, qCW mode	mW	50 mA	3,9	3,6	4,2	4,2	4,0
Optical power, qCW mode	mW	100 mA	5,9	5,6	6,5	6,4	6,1
Optical power, qCW mode	mW	150 mA	7,4	6,9	8,1	7,9	7,6
Optical power, qCW mode	mW	200 mA	8,4	7,9	9,2	9,1	8,7
Operating Temperature	$^{\circ}\text{C}$	-60...+90					
Type of heatsink	TO-18 with Parabolic Reflector						
Date	15.09.16						

Maximum Direct Current (DC) 100 mA

Maximum current 200 mA quasi-CW (pulse duration 1ms, repetition rate 0,5kHz (duty cycle 50%))

Maximum pulsed current 1 A (pulse duration 20 us, repetition rate 0,5 kHz (duty cycle 1 %))



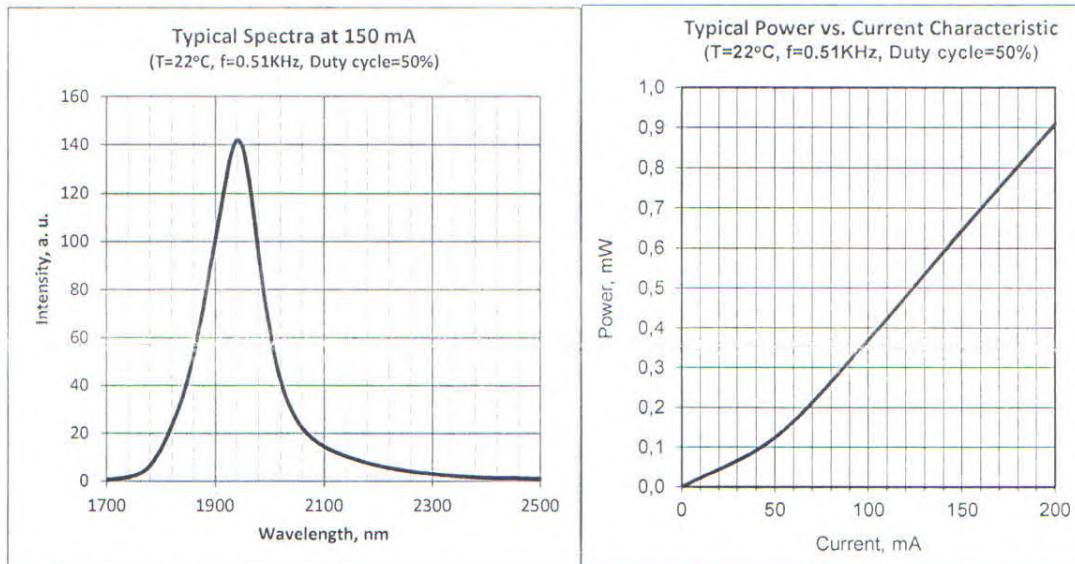

**ROITHNER LASERTECHNIK GmbH**

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA  
 TEL. +43 1 586 52 43 -O. FAX. -44 OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

**LED19-R Serial Number 34-36**

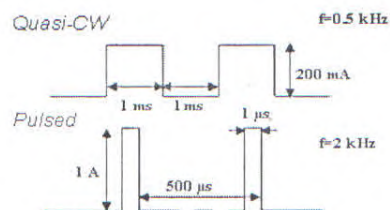
Typical

Parameters	Values
FWHM, nm	115±125
Operating Temperature Range, °C	-200÷+50
Emitting Area, μm	350x350
Soldering temperature	180 °C
Package	TO-18 with Parabolic Reflector
Date	18.09.2016



**IMPORTANT:** Anode is marked with a RED dot

Recommended Operation Regimes:





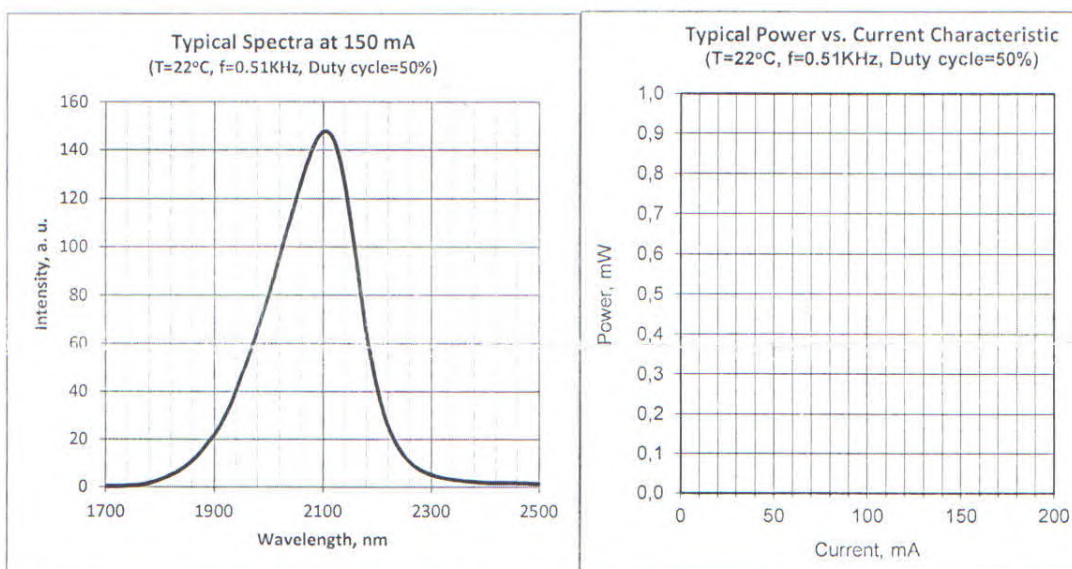

**ROITHNER LASERTECHNIK GmbH**

 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA  
 TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44 OFFICE@ROITHNER-LASER.COM

**LED21-R Serial Number 16-18**

Typical

Parameters	Values
FWHM, nm	180±200
Operating Temperature Range, °C	-200÷+50
Emitting Area, μm	350x350
Soldering temperature	180 °C
Package	TO-18 with Parabolic Reflector
Date	18.09.2016



**IMPORTANT:** Anode is marked with a RED dot

**Recommended Operation Regimes:**
