



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

RAFAEL LONI MARTINS

**PROPOSTA DE SISTEMA OPTOELETRÔNICO DE
VARREDURA ESPECTRAL PARA ANÁLISE DO
INFRAVERMELHO PELA REFLEXÃO DIFUSA
UTILIZANDO MÚLTIPLAS ESFERAS DE INTEGRAÇÃO**

Londrina
2020

RAFAEL LONI MARTINS

**PROPOSTA DE SISTEMA OPTOELETRÔNICO DE
VARREDURA ESPECTRAL PARA ANÁLISE DO
INFRAVERMELHO PELA REFLEXÃO DIFUSA
UTILIZANDO MÚLTIPLAS ESFERAS DE INTEGRAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Eletrônicos Especialidade: Instrumentação Eletrônica

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre de França

Londrina
2020

Ficha Catalográfica

Rafael Loni Martins,

Proposta de sistema optoeletrônico de varredura espectral para análise do infravermelho pela reflexão difusa utilizando múltiplas esferas de integração. Londrina, PR, 2020. 87 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica

1. Instrumentação Eletrônica. 2. Esfera Integradora. 3. Espectroscopia. I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica . II. Título.

RAFAEL LONI MARTINS

**PROPOSTA DE SISTEMA OPTOELETRÔNICO DE VARREDURA
ESPECTRAL PARA ANÁLISE DO INFRAVERMELHO PELA
REFLEXÃO DIFUSA UTILIZANDO MÚLTIPLAS ESFERAS DE
INTEGRAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Eletrônicos Especialidade: Instrumentação Eletrônica

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre de França
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Francisco Granziera Júnior
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Newton da Silva
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dra. Maria Bernadete de Moraes França
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

10 de fevereiro de 2021

"A fé coroa quem não vacilar..." - Frei Gilson.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por estar sempre comigo.

A minha família, Edson, Marinês e Franciele, pai, mãe e irmã, que sempre me apoiaram nos estudos e vida profissional. A minha noiva Carolina, que está sempre ao meu lado.

A todos aos integrantes do Laboratório de Automação e Instrumentação Inteligente da Universidade Estadual de Londrina, em especial ao meu orientador José Alexandre de França e à Ana Lúcia de Souza Madureira Felício, que me auxiliaram durante o mestrado.

Ao Lucas e ao Gabriel, integrantes do Fab Lab Escola SESI de Taubaté-SP, que se dispuseram a me ajudar com a impressão das peças 3D utilizadas no protótipo deste trabalho.

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

MARTINS, Rafael Loni. **Proposta de sistema optoeletrônico de varredura espectral para análise do infravermelho pela reflexão difusa utilizando múltiplas esferas de integração**. 2020. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

RESUMO

Este trabalho apresenta um sistema optoeletrônico, baseado em reflexão difusa, para corrigir um sinal espectral da região do infravermelho próximo. Um conjunto com múltiplas esferas de integração é usado para compensar o sinal de entrada e melhorar as leituras realizadas. A primeira esfera separa a radiação em duas partes, um feixe é direcionado para uma segunda esfera de onde é obtido o sinal referente à amostra, e o outro é direcionado para uma terceira, que gera um sinal de referência utilizado para compensar as interferências. As análises realizadas mostraram uma redução de 77% na influência da variação da temperatura e do decaimento optoeletrônico ao longo do tempo. Desta forma, as interferências intrínsecas e extrínsecas dos protótipos básicos da espectroscopia no infravermelho próximo são minimizadas e seus desempenhos podem ser melhorados.

Palavras-chaves: Instrumentação Eletrônica. Esfera Integradora. Espectroscopia.

MARTINS, Rafael Loni. **Proposal for a spectral scanning optoelectronic system for analysis of infrared by diffuse reflection using multiple spheres of integration.** 2020. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

ABSTRACT

This work presents an optoelectronic system, based on diffuse reflection, to correct a spectral signal of the near-infrared region. A set with multiple integration spheres is used to compensate the input signal and improve the readings performed. The first sphere separates the radiation in two parts, one beam is directed to a second sphere from where the signal related to the sample is obtained, and the other is directed to a third, that generates a reference signal used to compensate interferences. The analyses performed showed a 77% reduction on the influence of the temperature variation and the optoelectronics decay over time. In this way, intrinsic and extrinsic interferences of basics near-infrared spectroscopy prototypes are minimized, and their performance can be improved.

Keywords: Electronic Instrumentation; Integration Sphere; Spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figura 2.1 | Faixas de interesse para diferentes análises espectrais | 30 |
| Figura 2.2 | Técnicas de amostragem da espectrometria NIR: (a) transmitância, (b) refletância por atenuação total, (c) refletância difusa na esfera de integração, e (d) refletância especular | 31 |
| Figura 2.3 | Aberturas típicas de uma esfera de integração..... | 35 |
| Figura 2.4 | Defletores da esfera de integração | 37 |
| Figura 3.1 | Diagrama do sistema proposto..... | 40 |
| Figura 3.2 | Aberturas da esfera de integração menor..... | 41 |
| Figura 3.3 | Topologia final das múltiplas esferas de integração para refletância difusa e correção do sinal..... | 43 |
| Figura 3.4 | Esfera de integração menor: (a) defletores internos, (b) abertura da amostra, (c) abertura da entrada de luz e (d) vista explodida | 43 |
| Figura 3.5 | Esfera de integração maior: (a) semi esfera e (b) esfera completa | 44 |
| Figura 3.6 | Acessórios do sistema: (a) suporte para LEDs infra vermelho, (b) suporte para o porta amostra e (c) tampa do porta amostra | 45 |
| Figura 3.7 | Peças que compõem o protótipo | 46 |
| Figura 3.8 | Vista explodida das múltiplas esferas de integração..... | 46 |
| Figura 3.9 | Procedimento de impressão | 47 |
| Figura 3.10 | Materiais utilizados na tinta de sulfato de bário | 48 |
| Figura 3.11 | Circuito de acionamento dos LEDs infravermelhos | 50 |
| Figura 3.12 | PCIs: (a) controle e fonte de corrente dos LEDs e (b) posicionamento dos LEDs..... | 51 |
| Figura 3.13 | Resposta característica do fotodiodo PD24-03 | 52 |
| Figura 3.14 | Circuito de condicionamento do fotodiodo PD24-03 | 53 |
| Figura 3.15 | PCI de condicionamento do fotodiodo PD24-03 | 54 |
| Figura 4.1 | Esfera de integração menor..... | 56 |
| Figura 4.2 | Sistema completo | 57 |
| Figura 4.3 | Suporte para placa de condicionamento do fotorreceptor..... | 58 |
| Figura 4.4 | Estabilização do sinal de saída: (a) LED 1.550 nm, (b) LED 1.450 nm, (c) LED 1.200 nm e (d) LED 970 nm. Curva azul corresponde ao sinal da esfera de análise e a curva laranja ao sinal da esfera de referência..... | 59 |

Figura 4.5 Sinais resultantes no teste de estabilização: vermelho corresponde ao LED 970 nm, o laranja 1.200 nm, o azul 1.450 nm e o verde 1.530 nm.. 59

Figura 4.6 (a) Sinais de saída da esfera de análise sob uma variação de temperatura, (b) Temperatura ao longo do tempo, (c) Sinais de saída da esfera de referência sob uma variação de temperatura e (d) Sinais resultantes sob uma variação de temperatura. Para todo o caso os comprimentos de onda são: vermelho 970 nm, laranja 1.200 nm, azul 1.450 nm e verde 1.550 nm 61

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabela 2.1 | Exemplos de aplicações das diferentes técnicas de amostragem da Espectroscopia | 33 |
| Tabela 3.1 | Características das esferas de integração menores..... | 42 |
| Tabela 3.2 | Características da esfera de integração maior | 42 |
| Tabela 4.1 | Dados do teste de estabilização do LED 970 nm..... | 60 |
| Tabela 4.2 | Dados do teste de estabilização do LED 1.200 nm..... | 60 |
| Tabela 4.3 | Dados do teste de estabilização do LED 1.450 nm..... | 60 |
| Tabela 4.4 | Dados do teste de estabilização do LED 1.550 nm..... | 60 |
| Tabela 4.5 | Dados do teste de variação de temperatura do LED 970 nm..... | 62 |
| Tabela 4.6 | Dados do teste de variação de temperatura do LED 1.200 nm..... | 62 |
| Tabela 4.7 | Dados do teste de variação de temperatura do LED 1.450 nm..... | 62 |
| Tabela 4.8 | Dados do teste de variação de temperatura do LED 1.550 nm..... | 62 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------|--|
| ABS | Acrilonitrila butadieno estireno |
| ATR | Refletância total atenuada, do inglês, Attenuated Total Reflectance |
| CAD | Desenho assistido por computador, do inglês, Computer Aided Design |
| FIR | Infravermelho distante, do inglês, Far Infrared |
| IR | Infravermelho, do inglês, Infrared |
| LED | Diodo emissor de luz, do inglês, Light-Emitting Diode |
| MIR | Infravermelho médio, do inglês, Mid-Infrared |
| NIR | Infravermelho próximo, do inglês, Near Infrared |
| NMR | Ressonância magnética nuclear, do inglês, Nuclear Magnetic Resonance |
| PCI | Placa de circuito impresso |
| PTFE | Politetrafluoroetileno |
| PWM | Modulação por largura de pulso, do inglês, Pulse Width Modulation |
| RMS | Valor eficaz, do inglês, Root-Mean-Square |
| SNR | Relação sinal ruído, do inglês, Signal-to-Noise Ratio |
| UV | Ultravioleta |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 23 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA DO TRABALHO | 27 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 27 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TEXTO..... | 28 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 29 |
| 2.1 | ESPECTROSCOPIA | 29 |
| 2.1.1 | Espectroscopia NIR..... | 31 |
| 2.1.2 | Técnicas De Amostragem | 31 |
| 2.2 | ESFERA DE INTEGRAÇÃO | 34 |
| 2.2.1 | Equação De Radiação Da Esfera De Integração | 34 |
| 2.2.2 | Multiplicador Da Esfera De Integração..... | 35 |
| 2.2.3 | Projeto Da Esfera De Integração | 36 |
| 2.3 | CONCLUSÕES DO CAPÍTULO..... | 38 |
| 3 | METODOLOGIA | 39 |
| 3.1 | DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO | 39 |
| 3.2 | PROJETO DA ESFERA DE INTEGRAÇÃO..... | 40 |
| 3.2.1 | Projeto No Software CAD 3D..... | 42 |
| 3.2.2 | Impressão E Construção Das Esferas De Integração | 46 |
| 3.2.3 | Pintura Das Esferas De Integração | 48 |
| 3.3 | SISTEMA ELETRÔNICO..... | 49 |
| 3.3.1 | Circuito De Controle E Acionamento | 49 |
| 3.3.2 | Circuito De Foto Detecção | 52 |
| 3.4 | CONCLUSÕES DO CAPÍTULO..... | 54 |
| 4 | DISCUSSÕES DO SISTEMA PROPOSTO | 55 |
| 4.1 | MONTAGEM DA ESFERA DE INTEGRAÇÃO | 56 |
| 4.2 | TESTES REALIZADOS | 57 |
| 4.2.1 | Teste De Estabilização Do Sistema Óptico..... | 58 |
| 4.2.2 | Variação Da Temperatura | 61 |
| 4.3 | CONCLUSÕES DO CAPÍTULO..... | 63 |

| | | |
|----------|--|----|
| 5 | CONCLUSÃO | 64 |
| 5.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 65 |
| | REFERÊNCIAS | 66 |
| | APÊNDICES | 69 |
| | APÊNDICE A Artigo Submetido..... | 69 |
| | ANEXOS | 78 |
| | ANEXO A Datasheet STM32F4DISCOVERY..... | 78 |
| | ANEXO B Datasheet do amplificador OPA1662 | 80 |
| | ANEXO C Datasheet do fotodiodo PD24-03 | 82 |
| | ANEXO D Datasheet da tensão de referência LT1461 | 84 |
| | ANEXO E Datasheet do amplificador AD8630..... | 86 |

1 Introdução

A espectroscopia é um seguimento da instrumentação eletrônica que apresenta-se como um dos modelos mais promissores na identificação e quantificação de amostras físico-químicas. É chamada de espectroscopia a técnica que analisa a absorção da luz de uma determinada amostra a fim de obter informações físico-químicas, como a concentração e composição molecular. Neste procedimento, a radiação incidente produz uma resposta seletiva. Isto implica que alguns comprimentos de onda são absorvidos enquanto outros são rejeitados e outros ainda são parcialmente absorvidos. Essa informação pode ser obtida por meio da análise da redução de intensidade do sinal eletromagnético incidente, utilizada para estimar a concentração destas moléculas. Sendo assim, através da absorção da radiação incidente, é possível determinar se uma amostra é pura ou se contém uma substância específica em sua composição. Uma outra característica desta técnica é capacidade de analisar as propriedades de uma prova, em qualquer estado físico, com uma ação não destrutiva, isto é, sem alterar seus atributos. Além disso, os componentes presentes na natureza, em sua maioria, podem absorver energia de radiação luminosa em uma certa faixa do espectro eletromagnético. Assim, ao definir uma região espectral de interesse e examinar a absorção da luz nesta região, é possível determinar a presença de uma substância e quantificar sua concentração.

Sistemas de análise espectral de menor complexidade e protótipos baseados na espectroscopia com propósitos específicos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos, cada qual com suas particularidades e amostragem distintas, de acordo com a matriz de prova a ser analisada. Estes aparelhos, de um modo geral, se baseiam nos mesmos princípios de funcionamento de equipamentos comerciais, porém, visando uma aplicação singular, como, por exemplo, análise de alimentos (SUN, 2009) (WILSON, 1994), variação da umidade ambiente (GENTILIN et al., 2016), análise da temperatura em partículas de gás (LOH; WANG; THOMSON, 2016), estudo da glicose no sangue (SHULEI; XUEGUANG; YANGAN, 2017), análise da adulteração em leite cru (ARTIME et al., 2008) (DIAS et al., 2018), entre vários

outros. Entretanto, o procedimento de identificar e quantificar uma amostra através da espectrometria não é trivial, uma vez que vários fatores práticos devem ser considerados. Dentre eles, as instrumentações dos receptores infravermelhos usualmente são difíceis na prática (MORGANO et al., 2008) (SCHMILOVITCH et al., 2000), alguns compostos químicos possuem milhares de constituintes distintos, e, também, os dispositivos optoeletrônicos utilizados na espectroscopia apresentam dependências com vários fatores externos, como temperatura, umidade e luz ambiente, tornando os sistemas sensíveis, de modo que, uma variação na saída do sistema pode ser confundida com uma variação na concentração da prova.

Trabalhos desenvolvidos anteriormente, Dias et al. (2018) e Pinheiro, Santos e França (2019), buscaram minimizar algumas das referidas ocorrências, as quais são capazes de influenciar um sistema de análise espectral. Entretanto, a solução proposta é, em regra, direcionada apenas para uma destas disfunções, sem considerá-las conjuntamente. Por outro lado, em outros trabalhos, Moreira et al. (2016), estes problemas foram ignorados ou considerados como constante.

Os sinais obtidos por meio da espectroscopia, de modo geral, possuem uma escala extremamente pequena, isto é, são sinais na ordem de 10^{-9} V ou inferior. Desta forma, para que um protótipo desenvolvido possa atingir seus melhores resultados, as interferências intrínsecas e extrínsecas não podem ser ignoradas, mas sim minimizadas tanto quanto possível.

Começando com as interferências extrínsecas, a temperatura é uma das principais influências em sistemas de espectroscopia menos complexos, vez que, grande parte destes sistemas são construídos a partir de dispositivos optoeletrônicos, como LEDs (diodo emissor de luz) e fotodiodos, que possuem relação direta com a temperatura. Portanto, uma mudança na temperatura ambiente altera o comportamento desses dispositivos. Esse fenômeno pode ser observado nos trabalhos desenvolvidos por Moreira et al. (2016), Gentilin et al. (2016), Ribeiro et al. (2016), Dias et al. (2018), que utilizaram LEDs NIR (infravermelho próximo) como fonte emissora e sensor InGaAs (índio, gálio e arsênio) como receptor. Para o trabalho de Moreira et al. (2016), a temperatura foi considerada como constante e sua influência não foi considerada durante a análise. Já nos trabalhos de Gentilin et al. (2016), Ribeiro et al. (2016), Dias et al. (2018) e Pinheiro, Santos e França (2019), foi implementado um sistema de controle de temperatura utilizando pastilha Peltier, que possibilitou reduzir parte dessa influência na resposta do sistema.

Com relação à umidade, uma variação na sua concentração ambiente onde

se encontra o sistema pode gerar variação na resposta do protótipo. Isto ocorre porque as pequenas partículas do vapor de água presente no meio podem absorver parte da radiação incidente de uma faixa espectral. Tal fenômeno foi observado nos estudos de Gentilin et al. (2016), que utilizou o efeito para estimar a umidade ambiente através da espectroscopia. O controle da umidade, de fato, é mais complexo que o da temperatura, de modo que a maioria dos trabalhos consideram este fator como constante ou não discutem sua influência.

As interferências intrínsecas podem variar de acordo com o sistema e técnica de amostragem, e estão relacionadas principalmente ao alinhamento. Uma vez que a radiação consiste em feixes que incidem em uma amostra, atravessando ou sendo refletido pela mesma, é necessário garantir um alinhamento adequado para o tipo de amostragem do sistema. Por via de regra, a forma de alinhar o sistema varia de acordo com seu tipo de amostragem. Existem diferentes técnicas de amostragem na espectroscopia, baseando-se na reflexão ou transmissão da luz incidente. Cada técnica possui vantagens próprias de acordo com o tipo de amostra e objetivo de análise. A refletância difusa, por exemplo, ocorre quando o feixe da radiação é refletido de volta da superfície da amostra em direções aleatórias, envolvendo tanto a absorção quanto o espalhamento. A dispersão dos feixes transcorre devido à superfície áspera, que é a categoria a qual a maioria dos alimentos pertence. Sua desvantagem consiste em menor SNR (relação sinal-ruído) em relação à transmitância (quando os feixes atravessam a amostra), porém possui menor complexidade de implementação. A refletância difusa é adequada para materiais sólidos e em pó (PASQUINI, 2003) (SMITH, 1996) (SUN, 2009) (WILSON, 1994). Em resumo, a falta de alinhamento pode provocar leituras errôneas no sistema, ou dificultar sua calibração. Para casos baseados na refletância difusa, uma forma de minimizar a complexidade de alinhamento e aprimorar o sistema é a utilização de um dispositivo óptico conhecido como esfera de integração. As esferas são utilizadas para integrar espacialmente o fluxo luminoso, garantindo um incremento e dispersão homogênea da radiação incidente em qualquer ponto da sua superfície. Estes aparatos apresentam uma construção minuciosa de acordo com seu emprego, o que leva a alternativas em sua construção para uso em protótipos e pesquisas acadêmicas (FREITAS et al., 2016). Sua aplicação já foi realizada em trabalhos anteriores (DIAS et al., 2018) e (PINHEIRO; SANTOS; FRANÇA, 2019).

O espectro eletromagnético é extremamente vasto, deste modo, a espectroscopia é classificada de acordo com a região analisada. Sistemas de análise espectral geralmente visam uma aplicação em determinada região, e não todo espectro. A espectroscopia VIS (visível), por exemplo, possui trabalhos na estimação de

vitaminas (WANG et al., 2011), análise de imagens (CAPACCIONI et al., 2010) e estimação da tensão interfacial do óleo do transformador (BAKA et al., 2015). Já a espectroscopia NIR (infravermelho próximo), possui reconhecimento em análises quimiométricas para aplicações variadas. Com efeito, a técnica já foi empregada para análise de constituintes do leite, qualidade da carne aviária, e também para determinar a quantidade de gordura, lactose e proteína no leite cru não-homogenizado (SANTANA et al., 2018) (ARTIME et al., 2008) (LAPORTE; PAQUIN, 1999) (TSENKOVA et al., 1999). As fontes de radiação mudam de acordo com o projeto e modelo de análise proposto, lâmpadas halogêneas, por exemplos são capazes de cobrir uma grande região espectral, entretanto não permitem a seleção de uma subfaixa mais estreita ou a realização de modulação. Para esses casos, o sistema geralmente é equipado com filtros de diferentes faixas espectrais mais estreitas que alteram de posição para realizar uma seleção, ou um sensor do tipo *array*, permitindo uma varredura em diferentes faixas do espectro. Em outros casos, a fonte de radiação incidente é feita a partir da combinação de vários LEDs. Os LEDs voltados para espectroscopia possuem faixas de atuação dezenas de vezes mais estreitas que lâmpadas halogênea, permitindo uma melhor seleção e a utilização de um sensor pontual como fotoreceptor. Entretanto, LEDs são dispositivos eletrônicos que apresentam longa curva de estabilização (JOHNSON, 2003), de modo que seja necessário um tempo de espera antes da sua utilização em análise, além de também possuir dependência com a temperatura, conforme citado previamente.

Ademais, é interessante ressaltar que todo e qualquer sistema apresenta desgastes ao longo do tempo, sejam mecânicos, elétricos ou eletrônicos. Deste modo, protótipos de análise espectral podem apresentar diferentes respostas para uma mesma prova em detrimento do tempo. Esse fenômeno, em regra, não é abordado em sistemas de menor complexidade voltados a aplicações específicas. Já em sistemas comerciais, esta ocorrência é corrigida com o uso de um *background*, isto é, um sinal de referência contínuo destinado a fornecer informações para a correção do sinal. Nestes casos, o *background* geralmente é construído através de um conjunto de lentes para gerar o sinal de correlação. Apesar de funcional, esta construção demanda uma complexidade de alinhamento e, por consequência, complicação em sua implementação.

Na generalidade, a dificuldade presente nos protótipos de aplicação pontuais e de menor complexidade é a presença de várias interferências intrínsecas e extrínsecas, como o alinhamento, temperatura, umidade, vibração, estabilização dos componentes, e outros, que influenciam constantemente na resposta, e também

a falta de um *background* de correção do sinal, dificultando a calibração e desempenho do equipamento.

Com base nos modelos supracitados, neste trabalho é apresentada uma nova proposta de sistema optoeletrônico de varredura espectral para análise do infravermelho pela reflexão difusa utilizando múltiplas esferas de integração a fim de dar continuidade nas pesquisas desenvolvidas por Dias et al. (2018). Uma vez que a esfera de integração garante a homogeneidade da luz em diferentes pontos, é possível criar uma esfera de integração maior com duas esferas menores acopladas de forma simétrica. Desta forma, criam-se duas regiões de análises que possuem as mesmas características. Sendo assim, ambas esferas menores sofrerão as mesmas influências, e, portanto, pode-se utilizar a primeira para análise de uma determinada amostra e a segunda para gerar o *background* de compensação e correção do sinal. O protótipo baseado nas três esferas é construído com plástico ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e revestido com tinta à base de sulfato de bário, que possui alto índice de reflexão. Também são utilizados LEDs como fonte de luz incidente e sensores InGaAs (índio, gálio, arsênio) pontuais para a detecção. Por se basear em um sistema com esfera de integração, a complexidade de alinhamento é minimizada apenas para o projeto e construção das esferas.

1.1 Justificativa do trabalho

Este trabalho baseou-se na premissa de que protótipos optoeletrônicos de análise espectral construídos para fins específicos frequentemente desconsideram influências intrínsecas e extrínsecas presentes no sistema, dificultando ou até mesmo influenciando os sinais lidos por estes equipamentos.

1.2 Objetivos

O objetivo do trabalho foi desenvolver um equipamento para minimizar influências intrínsecas e extrínsecas presentes em sistemas optoeletrônicos. Para isso, projetou-se um protótipo com três esferas de integração, com a finalidade de analisar a radiação espectral do infravermelho próximo por reflexão difusa. Uma das esferas é responsável por separar a radiação, outra por obter o sinal de saída, e a última é utilizada como referência para correção do sinal.

As etapas de desenvolvimento do projeto foram apresentadas com detalhes, a fim de permitir que trabalhos futuros possam executar testes adicionais ou

desenvolver estruturas parecidas para análise de substâncias por espectroscopia NIR.

1.3 Organização do texto

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

O capítulo 2 descreve uma visão geral sobre a espectroscopia NIR e alguns aspectos teóricos e construtivos da esfera de integração.

No capítulo 3 são apresentadas as metodologias utilizadas para construir o protótipo proposto.

O capítulo 4 retrata os testes realizados e os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 5 são descritas as conclusões referentes a este trabalho.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão abordados conceitos relacionados à espectroscopia e suas técnicas de amostragem, além de aspectos construtivos da esfera de integração, dispositivo óptico utilizado na refletância difusa.

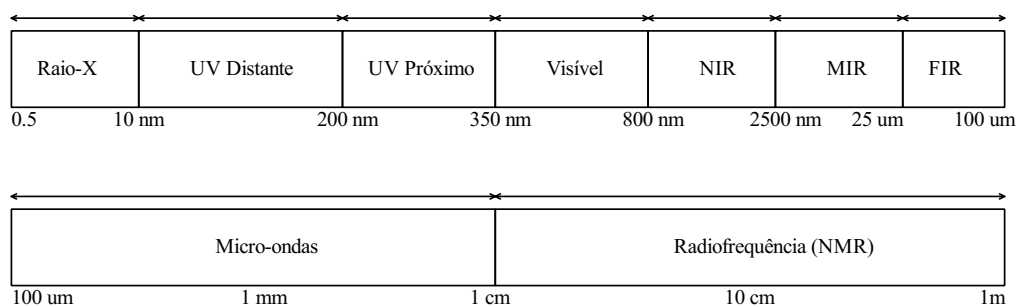
2.1 Espectroscopia

A espectroscopia pode ser dividida em dois grandes grupos (WILSON, 1994): espectroscopia fotônica, que é baseada no estudo da interação de uma onda eletromagnética com a matéria, e espectroscopia de partículas. O primeiro grupo compreende métodos espectroscópicos que exibem potencial analítico para controle rápido. O segundo grupo é representado por espectrometria de massa e métodos derivados.

Todos os métodos espectroscópicos, exceto espectrometria de massa, podem ser classificados de acordo com a energia envolvida durante a medição. A radiação eletromagnética, da qual a luz visível forma uma pequena parte, existe como ondas que se propagam de uma fonte e se movem em linha reta, se não forem refletidas ou refratadas. O fenômeno ondulatório é um campo magnético associado a um elétrico.

A maioria dos compostos que apresentam ligações covalentes, sejam eles orgânicos ou inorgânicos, possuem a capacidade de absorver faixas de frequências de radiação eletromagnética no espectro do infravermelho. Essa região compreende comprimentos de onda maiores que aqueles associados à região do espectro visível, que estão entre 350 a 800 nm aproximadamente, e menores que aqueles associados a micro-ondas, que são maiores que 1 mm. Na Figura 2.1 são apresentadas as diferentes regiões contidas no espectro eletromagnético. As definições são exibidas a seguir.

- **Raio-X:** entre 0,5 e 10 nm que está envolvida em mudanças de energia dos elétrons das camadas internas dos átomos e moléculas.

Figura 2.1: Faixas de interesse para diferentes análises espectrais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

- **UV distante:** entre 10 e 200 nm que corresponde a zona de emissão dos orbitais de valência.
- **UV Próximo:** entre 200 e 350 nm que absorve as transmissões eletrônicas dos níveis energéticos dos orbitais de valência. Esta região do espectro é caracterizada pela absorção de ligações peptídicas em proteínas e de moléculas que apresentam ligações duplas conjugadas, tais como aminoácidos aromáticos de proteínas ou vitaminas, como vitaminas A e E. Nesta faixa de comprimento de onda, a luminescência (fluorescência e fosforescência) também pode ser observada.
- **Visível:** entre 350 e 800 nm que também contém transições eletrônicas. Neste espectro, moléculas exibindo um grande número de ligações duplas conjugadas tais como carotenóides, clorofilas e porfirinas absorvem energia.
- **NIR:** entre 800 e 2500 nm, sendo a primeira zona espectral exibindo bandas de absorção relacionadas a vibrações de moléculas. É caracterizada por harmônicos e bandas de combinação e é amplamente usada para análises de composição de produtos alimentícios.
- **MIR:** entre 2500 e 4000 nm que compreende a principal faixa da espectroscopia vibracional. Estes comprimentos retém informação permitindo que moléculas orgânicas sejam identificadas e caracterizadas.
- **Micro-ondas:** entre 100 μm e 1 cm cuja energia absorvida está relacionada à rotação de molécula.
- **Radiofrequência:** entre 1 cm e 10 m que é investigada pela ressonância magnética nuclear e ressonância de rotação dos elétrons.

2.1.1 Espectroscopia NIR

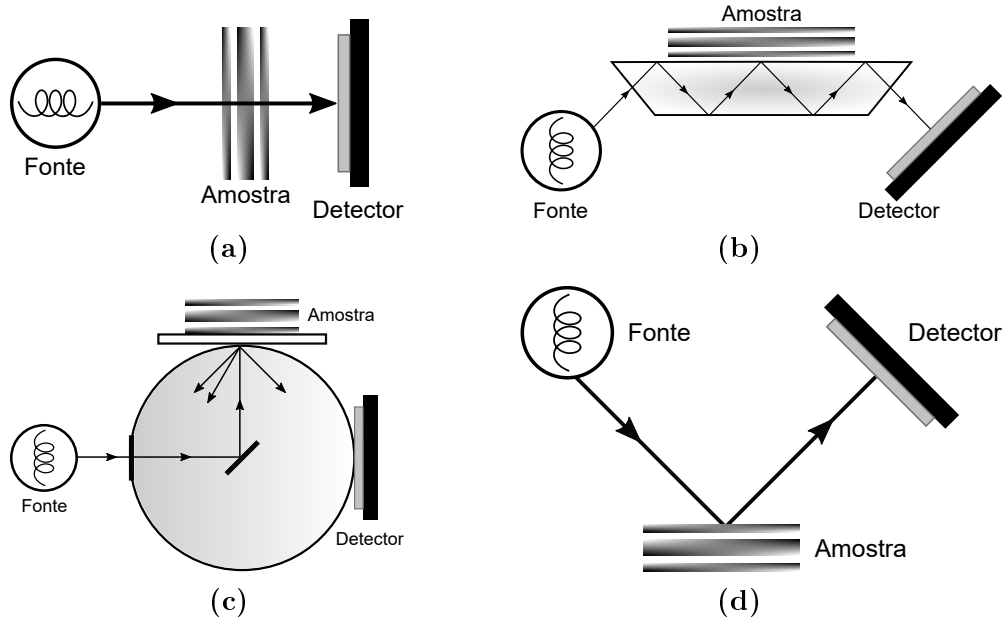
A espectroscopia NIR é a técnica de observar a radiação eletromagnética na região NIR, a fim de identificar e quantificar compostos químicos em uma determinada amostra. Este procedimento se baseia no princípio que um composto químico possui características espectrais únicas, que conferem uma espécie de assinatura, determinada pela estrutura química molecular existente no meio. Deste modo, pode-se detectar e estimar a pureza de uma determinada amostra mesmo que haja contribuição de outras substâncias.

A espectroscopia NIR também possui um reconhecimento em análises químométricas para aplicações variadas. Com efeito, a técnica já foi empregada para análise de constituintes do leite, e também para determinar a quantidade de gordura, lactose e proteína no leite cru não-homogenizado (LAPORTE; PAQUIN, 1999) (TSENKOVA et al., 1999) (ARTIME et al., 2008).

2.1.2 Técnicas de amostragem

Existem diferentes técnicas de amostragem para a espectroscopia NIR, sendo que cada procedimento apresenta vantagens e limitações de acordo com a aplicação desejada. Na Figura 2.2 são apresentadas as principais técnicas empregadas.

Figura 2.2: Técnicas de amostragem da espectrometria NIR: (a) transmitância, (b) refletância por atenuação total, (c) refletância difusa na esfera de integração, e (d) refletância especular.



Fonte: Adaptado de (SUN, 2009).

A transmitância, Figura 2.2(a), consiste na detecção da radiação infravermelha que atravessa diretamente uma amostra, sendo este, um dos procedimentos mais simples. A grande vantagem consiste na aquisição de um espectro com alto valor de SNR, adequado para análises de sólidos, líquidos e amostras gasosas. Entretanto, por se basear na detecção de raios luminosos que atravessam a amostra, o sistema torna-se limitado quanto à largura e opacidade da própria amostra, e em alguns casos, exigirá um procedimento de preparo adequado. Segundo Smith (1996), amostras dentro do intervalo de 1 a 20 μg são adequadas para análise por transmitância.

A refletância é o reverso da transmitância, na qual a luz infravermelha é medida após ser refletida na amostra. Ao contrário da transmitância, a refletância envolve uma preparação mais fácil e rápida da prova, sendo um processo não destrutivo e não influenciado por sua espessura. Esse tipo de amostragem exige acessórios especiais, os quais, em regra, possuem altos custos, razão pela qual sua aplicação é limitada. Em termos de desempenho, a SNR é tipicamente menor que da transmitância. Além disso, a profundidade de penetração na amostra não é exatamente conhecida e a superfície da amostra influencia os espectros mais do que o interior. Essas desvantagens são normalmente obscurecidas pela simplicidade e velocidade dessa técnica. Baseado no método de refletância da amostra, a técnica também inclui a refletância especular, refletância difusa e refletância total atenuada.

A refletância total atenuada (ATR), Figura 2.2(b), ocorre quando um raio infravermelho viaja de um meio de alto índice de refração (por exemplo, cristal de seleneto de zinco) para um meio de baixo índice de refração (amostra), alguma quantidade da luz é refletida de volta no meio de baixo índice de refração. Desta forma, em um determinado ângulo de incidência, quase todas as ondas de luz são refletidas de volta.

A ATR permite a análise de amostras sólidas e líquidas. Ao contrário da transmitância, ela não é influenciada pela espessura da amostra, e por apresentar baixa complexidade de utilização, é amplamente aplicada na análise de alimentos. Como os espectros de ATR são da superfície da amostra, esta técnica é limitada pela homogeneidade e espessura da mesma, sendo que, com uma boa preparação, a ATR pode fornecer espectros com características bem definidas.

A refletância difusa ocorre quando o feixe de infravermelho é refletido de volta da superfície da amostra em direção aleatória, envolvendo tanto a absorção quanto o espalhamento. A dispersão dos feixes sucede devido à superfície áspera da

amostra, que é a categoria à qual a maioria dos alimentos pertence. A refletância difusa é adequada para materiais sólidos e em pó.

A esfera de integração, acessório de refletância difusa, melhora ainda mais a análise. Esse artefato consiste em um invólucro esférico altamente reflexivo para direcionar o feixe IR para a amostra. Na esfera, a luz refletida salta muitas vezes antes de chegar ao detector, permitindo a integração espacial da luz refletida, daí o nome "esfera de integração". A refletância difusa com esfera de integração é vista na Figura 2.2(c).

As esferas de integração são acessórios de alto custo, mas oferecem vantagens, como a medição combinada de refletância difusa e especular e a análise de amostras não homogêneas, sendo frequentemente usadas para análise de amostras sólidas, volumosas, material alimentar áspero, ou em pó.

A refletância especular, Figura 2.2(d), é um tipo de técnica de refletância que ocorre quando o ângulo de incidência da radiação IR é igual ao ângulo em que está sendo refletido de volta. Um exemplo típico é a a refletância em uma superfície espelhada. Em sua forma clássica, se baseia no uso de espelhos para direcionar a luz e a radiação IR refletida da superfície para o detector. A refletância especular é usada principalmente na análise de polímeros, sendo bastante limitada em análises de alimentos.

Tabela 2.1: Exemplos de aplicações das diferentes técnicas de amostragem da espectroscopia.

| Técnicas de amostragem | Aplicação | Referência |
|------------------------|---|--------------------------------|
| ATR | Detecção quantitativa de deterioração microbiana na carne | (ELLIS et al., 2002) |
| Refletância difusa | Detecção e identificação de bactérias na matriz de suco | (RODRIGUEZ-SAONA et al., 2004) |
| Transmitância | Identificação de esporulados e bactérias vegetativas | (FOSTER et al., 2004) |

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 Esfera de Integração

A esfera de integração, ou esfera integradora, é um dispositivo responsável por integrar espacialmente o fluxo incidente (LABSPHERE, 2013). Apesar de possuir uma construção bastante simples, sua aplicação nem sempre é trivial, principalmente porque o sistema óptico deve encontrar-se no melhor alinhamento possível e, muitas vezes, a fonte de luz não está na faixa visível do espectro eletromagnético. Desta forma, para projetar uma esfera adequada à determinada aplicação, é recomendável conhecer previamente seu funcionamento.

Dentre os principais parâmetros de uma esfera de integração, tem-se o multiplicador da esfera e a refletância média, ambos derivados da radiação da superfície interna. Esses indicadores, bem como outras características e orientações, segundo Labsphere (2013), são discutidos na sequência.

2.2.1 Equação de radiação da esfera de integração

Os estudos da esfera de integração originaram-se da teoria da troca de radiação em um compartimento com superfícies difusa. Apesar do fundamento geral ser complexo, a esfera apresenta-se como uma solução mais simples de compreender.

Quando a luz incide em na superfície difusa, uma fonte de luz virtual é criada por meio da reflexão. A luz que emana da superfície pela reflexão é melhor descrita por sua radiação, isto é, a densidade de fluxo pela unidade de ângulo sólido (LABSPHERE, 2013).

Para uma esfera de integração, a equação da radiação deve considerar as múltiplas reflexões da superfície e as perdas causada pelas aberturas presentes na esfera, admitindo o fluxo de entrada, Φ_i , como o brilho resultante. Na Figura 2.3 é apresentada uma esfera considerando as áreas de abertura das portas de entrada (A_i) e saída (A_e).

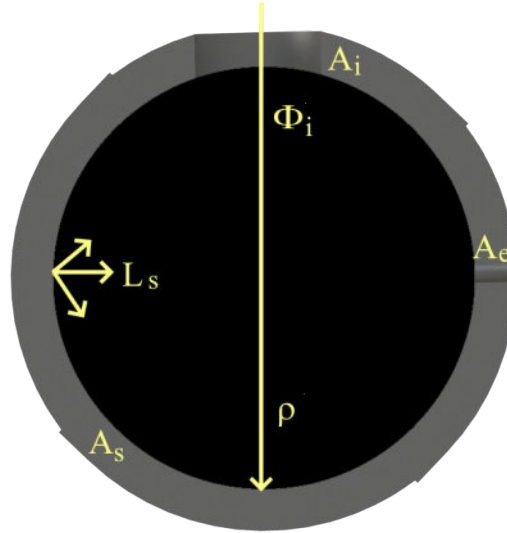
A quantidade de fluxo incidente em toda esfera após a primeira reflexão na superfície difusa é dada por:

$$\Phi_{k=1} = \Phi_i \rho \left(\frac{A_s - A_i - A_e}{A_s} \right). \quad (2.1)$$

Nessa equação, 2.1, a quantidade em parênteses corresponde à porção do fluxo recebido pela superfície da esfera que não é consumida pelas aberturas das portas. Assumindo $f = (A_i + A_e)/A_s$, pode-se substituir o termo em parênteses

por $(1 - f)$. Para casos que há mais de duas portas na esfera, f é calculado a partir da soma das áreas de todas as portas.

Figura 2.3: Aberturas típicas de uma esfera de integração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.2 Multiplicador da esfera de integração

O multiplicador da esfera de integração é um parâmetro crucial destes dispositivos, e sua notação é escrita como:

$$M = \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)}. \quad (2.2)$$

Este fator é responsável pelo aumento da radiação devido às múltiplas reflexões internas na superfície da esfera. O multiplicador M é altamente dependente do coeficiente de refletância da superfície interna da esfera, ρ , e da proporção das aberturas da esfera, f .

O multiplicador da esfera pode ser descrito também em relação à refletância inicial, ρ_0 e refletância média, $\bar{\rho}$, de toda esfera de integração. Sendo assim, o fator M é reescrito como:

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \bar{\rho}} \quad (2.3)$$

2.2.3 Projeto da esfera de integração

O projeto de uma esfera de integração para qualquer aplicação envolve apenas alguns parâmetros. Entre eles pode-se apontar a escolha do diâmetro adequado, considerando a quantidade de portas presentes na esfera e as suas áreas, uma vez que tais valores influenciam diretamente na proporção f , onde,

$$f = \frac{(A_i + A_e)}{A_S}, \quad (2.4)$$

e A_i a área das portas de entrada, A_e a área das portas de saída e A_S a área total de toda superfície.

A primeira regra de projeto da esfera de integração afirma que a soma das áreas de todas as aberturas da esfera não devem consumir mais que 5% da área da superfície, isto é, $f_{max} = 0,05$. Para proporções de aberturas maiores que 5%, as vantagens oferecidas pela alta refletância do revestimento da esfera de integração começam a se perder. Estes dispositivos geralmente são projetados com base no diâmetro das portas e, em seguida, define-se o diâmetro total da esfera, alcançando uma boa proporção. Sendo assim, os passos para a concepção de uma esfera de integração são:

1. **Definir os diâmetros de aberturas das portas:** Uma esfera de integração tem, no mínimo, duas portas, uma para entrada da radiação incidente e outra para a saída. Os diâmetros das portas podem variar de acordo com a necessidade de cada projeto, sendo, geralmente, proporcionais à fonte de radiação e ao receptor utilizado.
2. **Calcular área total das portas:** A área de cada porta é calculada de acordo com seu formato que, geralmente, é circular. Para aberturas circulares a área é obtida de forma simples pela equação:

$$A_{porta} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2. \quad (2.5)$$

Logo, a área total das portas (A_{portas}) consiste na somas das parciais e equivale a $A_{portas} = A_i + A_e$.

3. **Definir o diâmetro total da esfera para $f_{max} = 0,05$:** Sendo $f_{max} = 0,05$, pela equação 2.4 tem-se:

$$A_S \geq \frac{A_{portas}}{0,05}, \quad (2.6)$$

portanto,

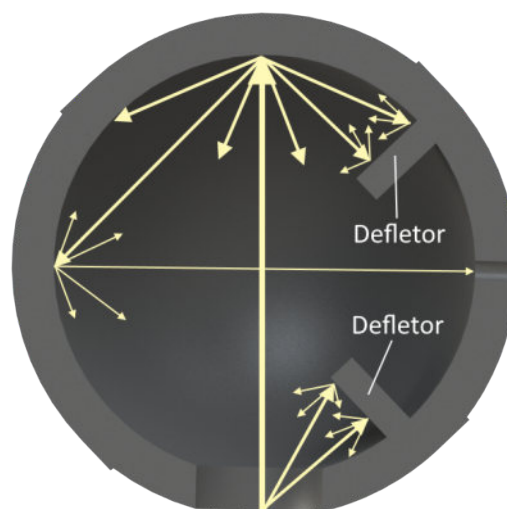
$$D_S \geq 2\sqrt{\frac{A_{portas}}{0,05\pi}}, \quad (2.7)$$

onde D_S é o diâmetro total da esfera de integração.

Outro aspecto importante no projeto de uma esfera é o coeficiente de reflexão que o revestimento interno da esfera possui. A maioria das esferas de integração comerciais possuem coeficiente na faixa, $0,95 < \rho < 0,99$, a fim de garantir um melhor desempenho no dispositivo.

4. **Defletores:** No uso da esfera de integração é importante que a radiação vista na saída não inclua uma porção direta da radiação gerada pelo fluxo incidente (LABSPHERE, 2013). Tal porção pode gerar uma resposta falsa na leitura final. Para evitar essa ocorrência é utilizado o uso de defletores, de modo a garantir que a radiação lida na saída passe por pelo menos duas reflexões no interior da esfera, um exemplo é mostrado na Figura 2.4. Os defletores são revestidos com o mesmo material da superfície interna da esfera de integração, garantindo o mesmo índice de reflexão. Também são considerados como uma extensão da esfera, e sua contribuição para área total da superfície interna pode ser fatorada em equação de radiação, entretanto, não é de fato significativa.

Figura 2.4: Defletores da esfera de integração.



Fonte: Elaborado pelo autor..

2.3 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos da espectroscopia e suas técnicas de amostragem, destacando-se as principais diferenças entre tais procedimentos. Ademais, discorreu-se acerca dos conceitos referentes à esfera de integração, demonstrando, de forma simplificada, o procedimento para sua construção.

No capítulo a seguir serão apresentadas as metodologias utilizadas para a construção do sistema proposto.

3 Metodologia

Neste capítulo serão descritos os procedimentos utilizados para a construção do protótipo deste trabalho, apresentando o projeto da esfera de integração e os circuitos eletrônicos utilizados nos experimentos.

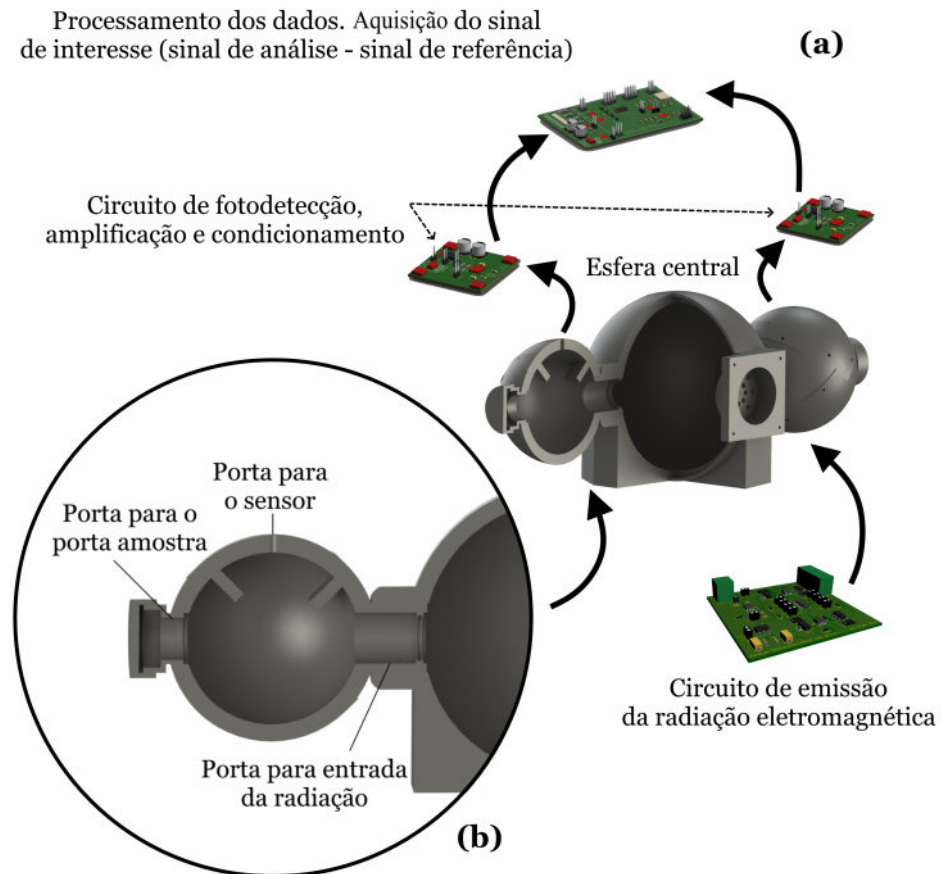
3.1 Descrição do Sistema Proposto

O sistema proposto por este trabalho baseia-se no uso de três esferas de integração para análise espectral por meio da refletância difusa. O diagrama desse sistema é apresentado na Figura 3.1(a). A esfera de integração maior tem por finalidade receber a fonte de radiação incidente que entra no sistema e integrar espacialmente seu fluxo. Segundo a teoria da esfera, a distribuição de luz após as múltiplas reflexões internas se torna homogênea, e também aprimorada devido a integração espacial. Deste modo, para uma abertura em qualquer local da superfície da esfera, seja a área da referida abertura constante, o fluxo de radiação é mesmo. Sendo assim, com dois orifícios de mesmas dimensões, é possível criar duas novas fontes de luz derivadas do interior da esfera, que apresentam mesma intensidade e comportamento, isto é, para qualquer variação sofrida na fonte primária, ambas as fontes derivadas da esfera sofrerão também. Cada uma destas duas novas fontes de luz são encaminhadas para as esferas menores, e se tornam, portanto, a radiação incidente que entra nessas esferas.

As esferas menores apresentam os mesmos tamanhos e possuem as mesmas características de construção. A primeira delas é destinada para a análise de uma determinada amostra (lado direito na Figura 3.1(a)), enquanto a segunda tem o intuito de gerar o *background* para corrigir e compensar as medida realizadas (lado esquerdo na Figura 3.1(a)). Uma vez que as influências internas e externas afetam todo o sistema, os sinais gerados em cada lado tendem a se comportarem de forma semelhante, possibilitando contrapeso. Cada esfera possui abertura para o posicionamento da amostra e do fotodetector. Nesta proposta, o circuito de fotodeteccção é pontual e construído com base em um fotodiodo. Considerando

que estes dispositivos geram sinais em escala muito pequena, é necessário um circuito complementar para amplificação e tratamento do sinal. Por fim, após o condicionamento dos sinais de análise e referência, ambos são correlacionados de modo diferencial, a fim de remover as interferências e identificar somente o sinal resultante.

Figura 3.1: Diagrama do sistema proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Projeto da Esfera de Integração

A elaboração do protótipo com três esferas de integração observou os procedimentos apresentados na subseção 2.2.3, ressaltando que as portas de entrada da radiação das esferas menores coincidem com as portas de saída da radiação da esfera maior. Além disso, as esferas menores possuem as mesmas dimensões e características, portanto, são apresentadas as informações de apenas uma delas.

A esfera menor possui três portas, uma para entrada radiação incidente, uma para o posicionamento de uma amostra e a terceira para o posicionamento do

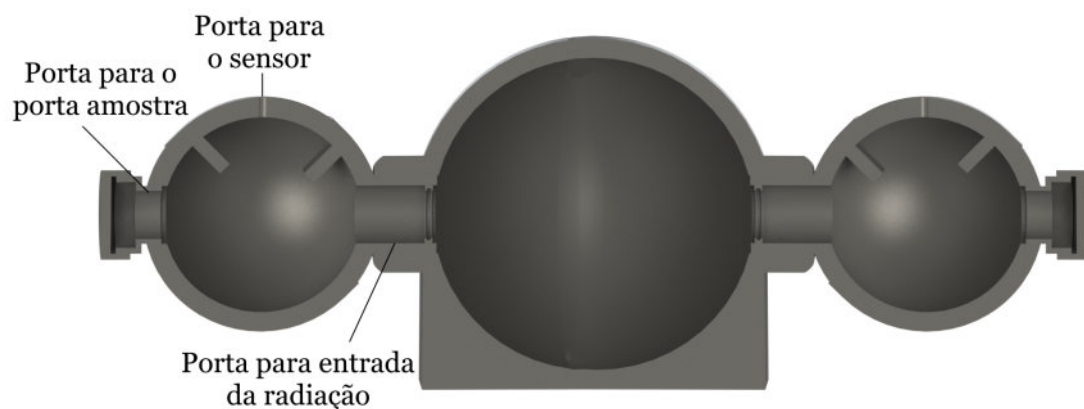
fotodetector.

A porta de entrada da radiação não deve ser muito pequena, para que o fluxo incidente não seja muito baixo, nem muito grande, para que a proporção de f_{max} seja respeitada. Assim o raio adotado foi de 15 mm. Quanto à segunda porta, optou-se também por um raio de 15 mm, a fim de possibilitar o posicionamento adequado do porta amostra, o qual, no caso, é constituído de quartzo. Por fim, a terceira porta possui o raio de 2,6 mm, vez que esta é a medida do fotodetector utilizado.

A relação das portas é vista na Figura 3.2. Nessas dimensões, a soma das áreas de todas as portas corresponde a 1435 mm². A partir deste valor, e assumindo a refletância do revestimento igual 0,9 ($\rho = 0,9$), o diâmetro total da esfera menor foi definido em 100 mm, de modo que a área total da superfície equivale a 32527 mm², e, portanto, a proporção f é aproximadamente 0,04. Na Tabela 3.1 são apresentados os dados principais da esfera de integração menor.

O mesmo procedimento se repetiu com a esfera maior. Nesta esfera, a radiação incidente é gerada a partir de LEDs infravermelho de 5 mm. Definiu-se o limite de 16 LEDs para a entrada, logo, há 16 pequenas portas com raio de 2,5 mm cada. Além delas, há mais duas portas de saída, as quais coincidem com a entrada da luz nas esferas inferiores e, portanto, possuem raio de 15 mm cada. Nesta esfera, a soma da área total de aberturas equivale a 1728 mm². Considerando a mesma refletância, $\rho = 0,9$, o diâmetro da esfera maior foi definido em 160 mm. Deste modo, a área total de superfície equivale a 80425 mm², e a proporção f para esta esfera é 0,02. Um resumo dos dados da esfera de integração maior é apresentado na Tabela 3.2.

Figura 3.2: Aberturas da esfera de integração menor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O posicionamento das esferas menores em relação à maior foi realizado conforme a imagem 3.2. Esta distribuição ocorreu a fim de deixar ambos os lados simétricos em relação a esfera maior, proporcionando condições similares para a detecção. Esta topologia também garante que a radiação especular incidente não entre em nenhuma das esferas menores.

Tabela 3.1: Características das esferas de integração menores.

| Esfera menor | | | |
|---|---------|---------|--------|
| | Entrada | Amostra | Sensor |
| Raio (mm) | 15 | 15 | 2,6 |
| Área (mm ²) | 707 | 707 | 21 |
| Área das portas (mm ²) | 1.435 | | |
| Raio da esfera (mm) | 50,00 | | |
| Área total da esfera (mm ²) | 31.416 | | |
| Área total das paredes (mm ²) | 29.981 | | |
| Fração das portas (f) | 0,04 | | |
| Refletância (ρ) | 0,90 | | |
| Multiplicador da esfera (M) | 6,37 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.2: Características da esfera de integração maior.

| Esfera maior | | | |
|---|---------|---------|---------|
| | Entrada | Saída 1 | Saída 2 |
| Raio (mm) | 2,5 | 15 | 15 |
| Área (mm ²) | 314 | 707 | 707 |
| Área das portas (mm ²) | 1.728 | | |
| Raio da esfera (mm) | 80,00 | | |
| Área total da esfera (mm ²) | 80.425 | | |
| Área total das paredes (mm ²) | 78.697 | | |
| Fração das portas (f) | 0,02 | | |
| Refletância (ρ) | 0,90 | | |
| Multiplicador da esfera (M) | 7,54 | | |

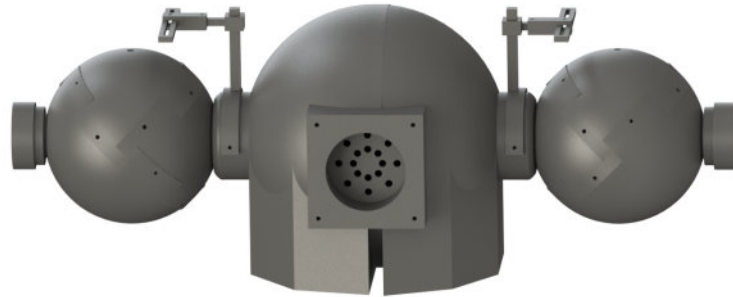
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Projeto no *software* CAD 3D

Definido o tamanho de todas as esferas, projetou-se o sistema em um *software* CAD 3D, a topologia final do protótipo com três esferas de integração é apresentada na Figura 3.3. Devido às limitações físicas da impressora em relação às dimensões, este protótipo foi dividido em uma série de peças menores encaixadas entre si. Todas as peças que constituem o invólucro das três esferas foram impressas com uma espessura de 10 mm, a fim de criar uma parede grossa o suficiente

para minimizar a radiação eletromagnética ambiente que possa atravessar pelas superfícies do protótipo. Na Figura 3.4 são apresentadas de forma mais exata as peças que estabelecem a esfera de integração menor.

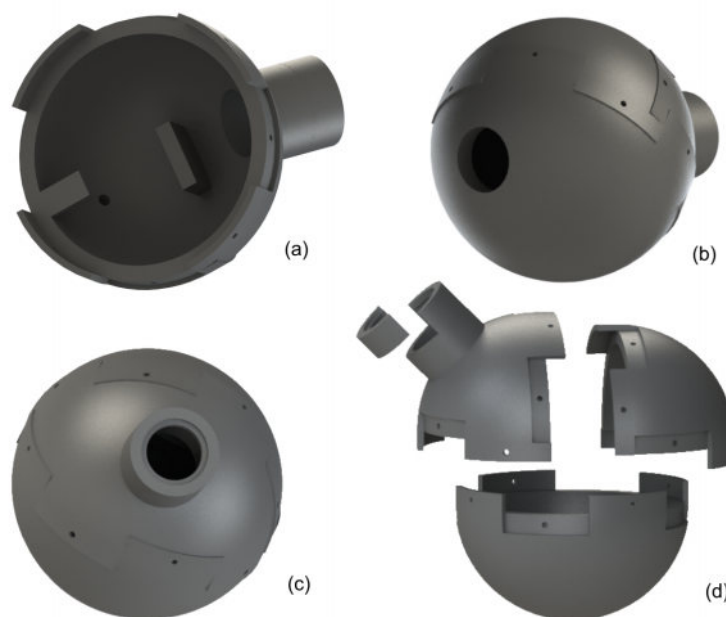
Figura 3.3: Topologia final das múltiplas esferas de integração para refletância difusa e correção do sinal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.4 (a) apresenta a esfera menor aberta, ilustrando os defletores internos e a abertura na qual será acoplado o fotodetector. Na Figura 3.4 (b) e (c) é demonstrada a face externo da esfera, onde é possível visualizar a porta para encaixe da amostra e porta para a entrada de luz respectivamente. Na Figura 3.4 (d) tem-se a vista explodida da esfera com todas as peças que a compõem.

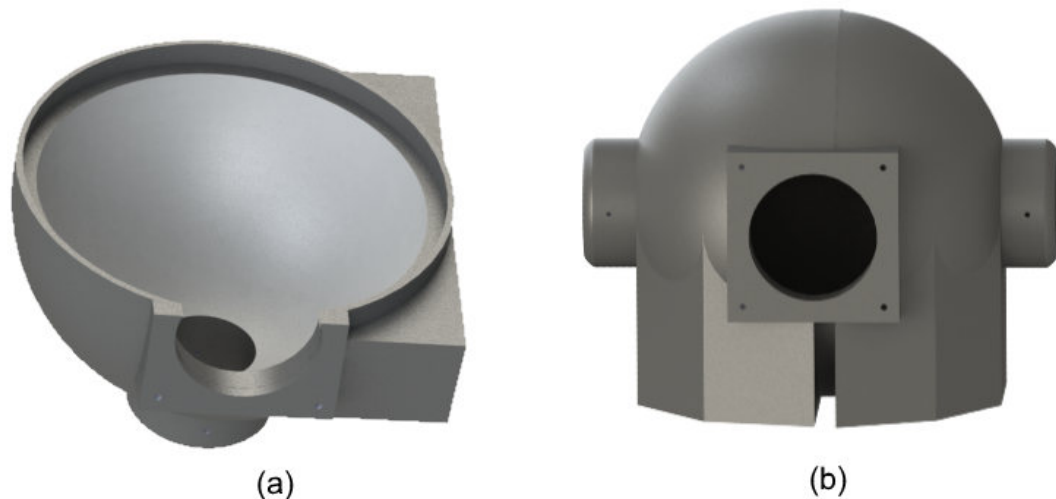
Figura 3.4: Esfera de integração menor: (a) defletores interno, (b) abertura da amostra, (c) abertura da entrada de luz e (d) vista explodida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A esfera de integração maior possui duas peças que diferenciam-se pelo encaixe. A Figura 3.5(a) mostra uma das metades projetada. Neste caso, não há a necessidade do uso de defletores, uma vez que a saída da luz não incidirá diretamente no fotodetector, e sim entrará em uma nova esfera de integração. Ademais, essas peças possuem uma espécie de base, a fim de sustentar o sistema de três esferas e/ou facilitar seu posicionamento em uma caixa ou compartimento. Ela pode ser visualizada na 3.5(b), onde se encontra a esfera de integração maior completa. Nota-se também que a abertura central, destinada a entrada da luz, é composta de uma grande porta, local onde será encaixado um suporte para acoplamento dos 16 LEDs, facilitando também a troca e/ou reparo da fonte de radiação incidente. O suporte para os LEDs é apresentado na Figura 3.6(a).

Figura 3.5: Esfera de integração maior: (a) semi esfera e (b) esfera completa..



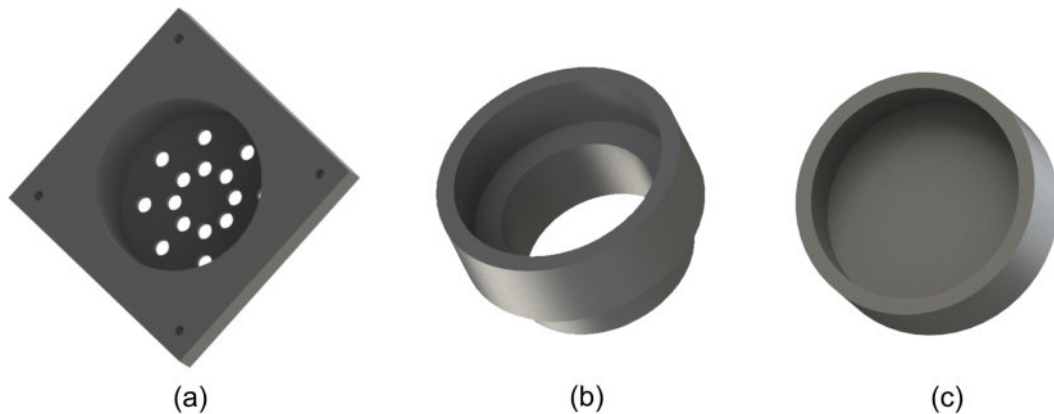
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.6(b) demonstra o suporte para o porta amostra. Esta peça foi projetada para encaixar-se na abertura destinada à amostra das esferas menores, e suas dimensões comportam um porta amostra de vidro de quartzo, o qual possui baixa capacidade de absorção do espectro, minimizando sua interferência na análise de determinada prova.

Por fim, na Figura 3.6(c) há uma tampa para o porta amostra. Essa peça é necessária porque o procedimento de medida exige um fundo negro, isto é, um material que tende a absorver toda a luz e possui refletância próxima a zero. Portanto, para assumir o papel de fundo negro, esta será pintada com tinta preta.

As principais peças que compõem o sistema são enumeradas na Figura 3.7. Dentre a formação final do protótipo de três esfera, pode-se citar:

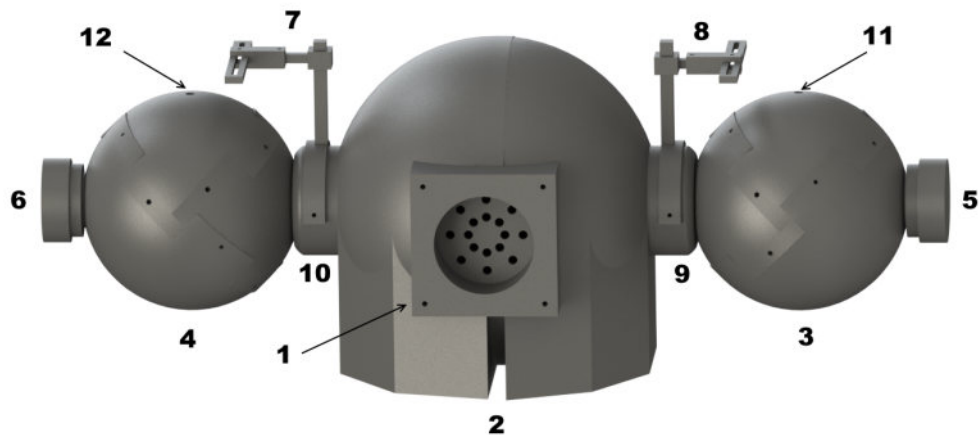
Figura 3.6: Acessórios do sistema: (a) suporte para LEDs infra vermelho, (b) suporte para o porta amostra e (c) tampa do porta amostra.



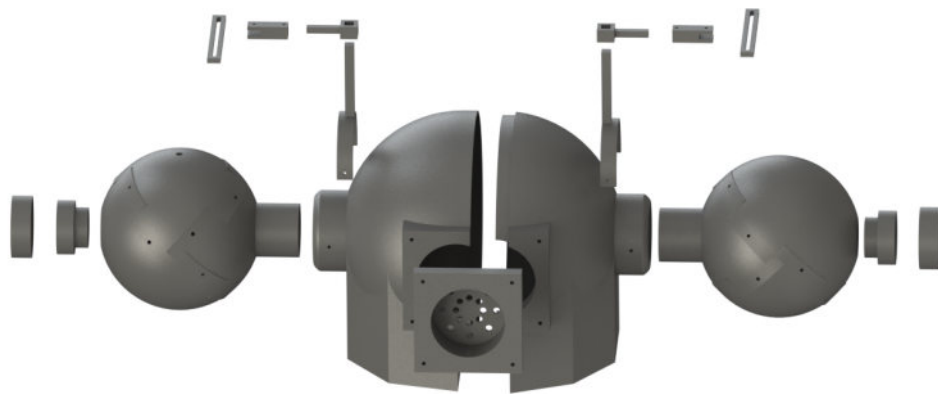
Fonte: Elaborado pelo autor.

1. Suporte para os LEDs infravermelhos;
2. Esfera de integração maior;
3. Esfera de integração menor para análise;
4. Esfera de integração menor de referência;
5. Porta amostra para análise;
6. Porta amostra para referência;
7. Suporte para a PCI do fotodetector de análise;
8. Suporte para a PCI do fotodetector de referência;
9. Acoplamento da esfera de análise;
10. Acoplamento da esfera de referência;
11. Entrada do fotodetector de análise;
12. Entrada do fotodetector de referência.

A Figura 3.8 apresenta, finalmente, a vista explodida do sinal, demonstrando claramente as peças que representam o sistema e seus posicionamentos.

Figura 3.7: Peças que compõem o protótipo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.8: Vista explodida das múltiplas esferas de integração.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Impressão e construção das esferas de integração

Para a impressão das peças projetadas foi utilizada a impressora 3D UP Plus 2 da *TierTime*, entretanto, devido a limitação física desta impressora, a esfera de integração maior foi terceirizada e impressa pelo Fab Lab Escola SESI de Taubaté-SP.

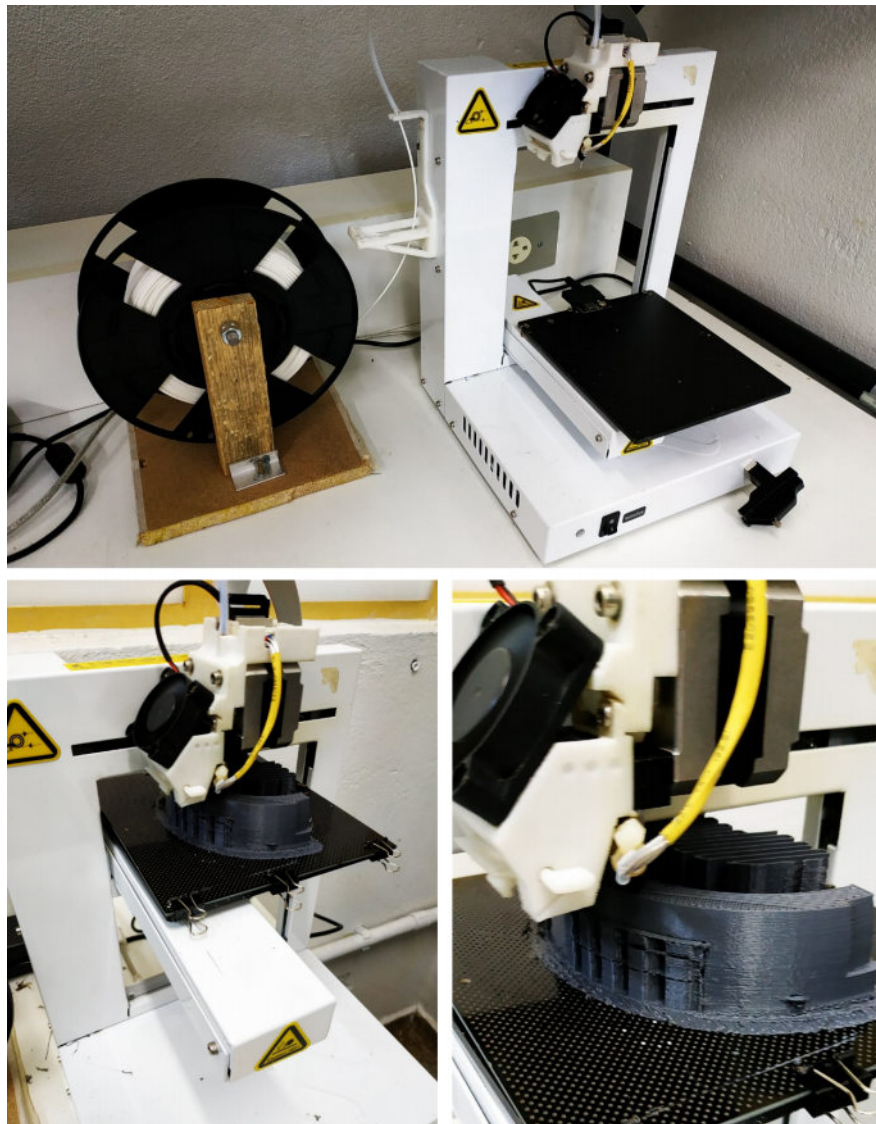
Como material, em toda impressão utilizaram-se filamentos de *ABS premium*, que possuem maior resistência em comparação com outros materiais tradicionais. Devido a alta dureza, é possível criar rosca neste material, facilitando o encaixe e fixação das peças no sistema.

Uma das desvantagens da impressão 3D é o longo tempo de produção. Para

o sistema proposto, algumas peças levaram mais de 20 horas para serem criadas. Outro ponto é o acabamento, que pode ser prejudicado/aprimorado de acordo com a resolução da impressora. Todavia, deve-se atentar às variações de temperatura no ambiente de impressão, visto que as mudanças desse aspecto podem comprometer a peça projetada.

A impressora 3D UP Plus 2 e o procedimento de impressão são visualizados na Figura 3.9. Ao final de toda produção realizou-se um acabamento nas peças com auxílio de lixas d'água, a fim de reduzir as ondulações na superfície interna e externa geradas pela impressora. A superfície interna não exige ser extremamente lisa uma vez que será utilizado a reflexão difusa.

Figura 3.9: Procedimento de impressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Pintura das esferas de integração

A esfera de integração possui uma superfície interna com alto índice de reflexão. Geralmente sua superfície é revestida com PTFE ou Sulfato de Bário ($BaSO_4$). O plástico ABS *premium*, utilizado na impressão, possui coeficiente de reflexão próximo de 0,4 ($\rho_{ABS} = 0,4$), isto é, um valor extramente baixo e inadequado para uma esfera de integração. Deste modo, baseado na patente US 6555602 B2 de Takahashi e Ikezawa (2003), foi criada uma tinta para revestir toda superfície interna e aumentar a refletância da esfera. Este procedimento é conhecido previamente por (DIAS et al., 2018).

Para criação da tinta foram utilizados quatro substâncias: água ultra pura, sulfato de bário P.A. (Vetec, Sigma Aldrich ®, Brasil), álcool etílico com concentração próxima a 100% (Qhemis ®, Brasil) e o polímero PVA com massa de 85-124 e pureza 99% hidrolisado (Sigma Aldrich ®, EUA). Estas substâncias são vistas na Figura 3.10.

Figura 3.10: Materiais utilizados na tinta de sulfato de bário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As proporções para a mistura foram definidas de modo experimental por Ana Lúcia de Souza Madureira Felício, mestre em química. O melhor resultado foi obtido através da utilização das seguintes concentrações: 45% de sulfato de bário, 27% de água ultra pura, 27% de álcool etílico e 1% de PVA. Os componentes foram

todos pesados em uma balança analítica de 0,0001 g.

3.3 Sistema Eletrônico

3.3.1 Circuito de controle e acionamento

O sistema proposto tem como objetivo analisar o espectro eletromagnético na faixa do infravermelho próximo. Deste modo, é necessário que todos os dispositivos ópticos do sistemas sejam adequados a esta faixa.

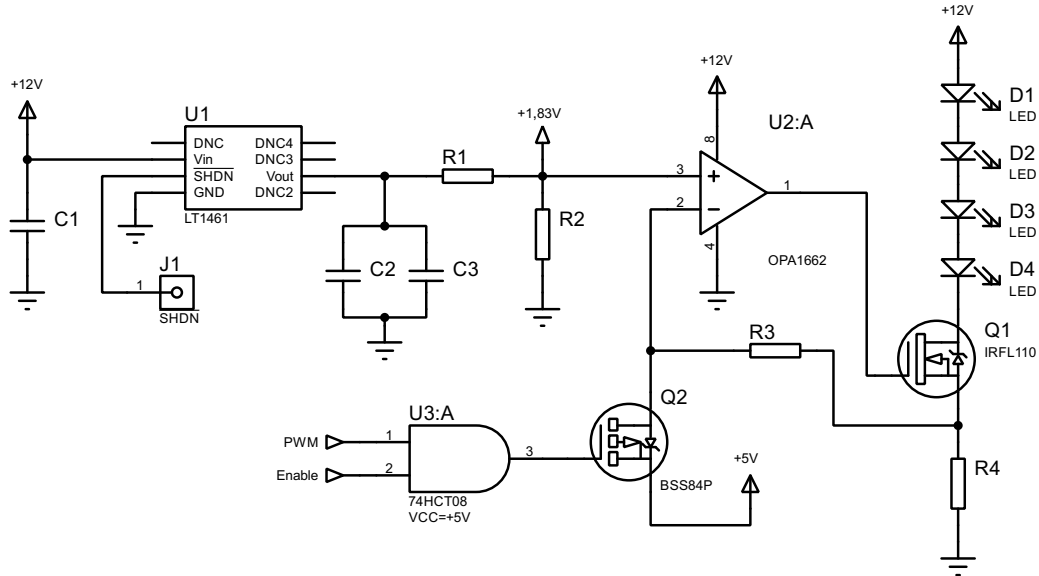
Existem várias fonte de luz que podem ser utilizadas para alimentar as esferas de integração, entretanto, a maioria das lâmpadas que atuam na faixa do infravermelho possuem um custo extremamente elevado. Outro fator, é que lâmpadas únicas geralmente possuem faixa larga de atuação, sendo assim, sua capacidade de uso acaba sendo desperdiçada uma vez que a proposta atual buscar trabalhar entre 800 e 2500 nm. Diante do exposto, optou-se pelo uso de LEDs infravermelhos, uma vez que possuem custo bastante reduzido em relação às lâmpadas que abrangem largas faixas do espectro, além de permitirem melhor seleção das regiões de atuação, por apresentarem largura de banda estreita.

Os LEDs que atuam no infravermelho próximo são semelhante aos LEDs convencionais (faixa do visível), porém com maior consumo de corrente. A corrente consumida por cada LED pode variar de acordo com o modelo, fabricante e faixa de atuação, mas a grande maioria trabalha em torno dos 100 mA de corrente contínua. A desvantagem do LED infravermelho é a baixa potência ao compará-los com as lâmpadas que operam no NIR. Sendo assim, para o mesmo comprimento de onda selecionado, utilizaram-se quatro LEDs para garantir maior potência luminosa. O protótipo deste trabalho é capaz de suportar 16 LEDs como fonte de luz na entrada, e, portanto, pode-se incorporar até quatro comprimentos de ondas no sistema, o suficiente para cobrir a maior parte do NIR, uma vez que estes componentes possuem banda de atuação ao redor do comprimento central.

Definida a fonte emissora de luz, tornaram-se necessários circuitos para controle e acionamento dos LEDs e uma fonte de corrente capaz de suprir suas operações. Entretanto, considerando que a detecção é realizada por um sensor pontual, os quatro comprimentos não podem ser acionados simultaneamente, do contrário os sinais referentes a cada faixa do espectro irão se sobrepor. Logo, a alternativa escolhida foi modular os LEDs com sinais PWMs, possibilitando a combinação de duas ou mais regiões espectrais.

O circuito proposto foi adaptado de Ribeiro et al. (2016), e o seu esquema elétrico é apresentado na Figura 3.11. Este circuito tem como finalidade principal permitir a realização dos testes de desempenho das esferas de integração, e, portanto, será apresentado de uma forma sucinta. Em conjunto com este circuito, utilizou-se também a placa de desenvolvimento STM32F4DISCOVERY Microelectronics (2013) para gerar os PWMs.

Figura 3.11: Circuito de acionamento dos LEDs infravermelhos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o esquema elétrico, $Q2$ é controlado pela porta AND $U3$. O sinal PWM é o pulso de acionamento que comanda a modulação do sinal da corrente nos LEDs, isto é, controla o valor de frequência da largura de pulso. O sinal $Enable$ é um controle para ligar/desligar a fonte de corrente.

Quando PWM e $Enable$ estão em nível lógico alto, $Q2$ não conduz, assim, o restante do circuito atua como fonte de corrente controlada por tensão. Nesta condição, a entrada não inversora de $U2$ é maior que a inversora e ocorre a realimentação negativa do amplificador. Dessa forma, a tensão da porta não inversora (+1,83 V) é espelhada sobre o resistor $R4$. Logo, a corrente que flui sobre os LEDs $D1$ a $D4$ equivale a:

$$I_D = \frac{1,83}{R4}. \quad (3.1)$$

A escolha de +1,83 V sucede uma vez que os LEDs serão modulados. O objetivo é possibilitar que estes dispositivos trabalhem com a corrente média

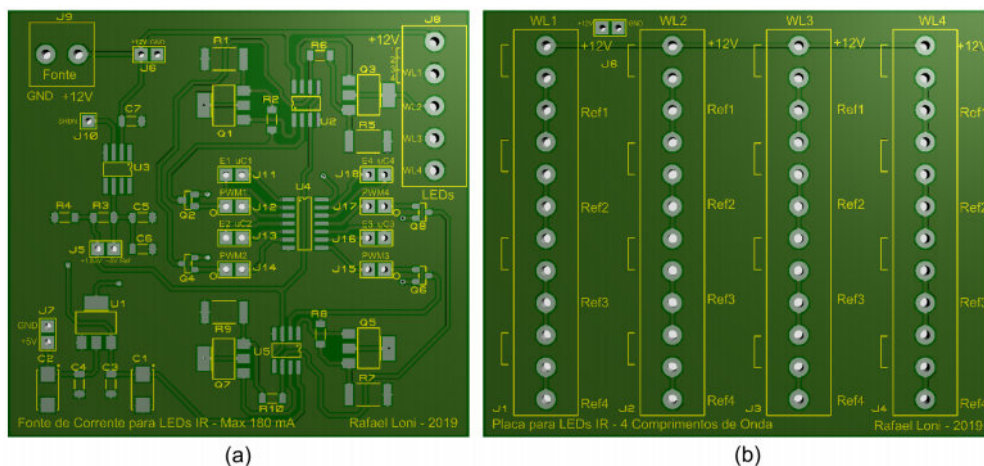
próxima do valor máximo permitido, 100 mA. Portanto, para uma modulação com ciclo ativo máximo de 50%, e assumindo $R4$ igual a 10Ω , a corrente média dos LEDs será 91,5 mA. A tensão de +1,83 V é gerada a partir de um divisor de tensão, com resistores de 1%, posicionado na saída de $U1$, o CI LT1461. Este componente corresponde a uma tensão de referência de alta precisão, 0,04% e deriva 3 ppm/°C, utilizado para minimizar variações na tensão sobre $R4$ e, conseqüentemente, na corrente dos LEDs.

Quando um dos sinais PWM ou $Enable$ está em nível lógico baixo, a porta AND emite sinal baixo, e, portanto, $Q2$ conduz. Neste caso, a tensão da porta inversora é maior que a da porta não inversora em $U2$, logo, a saída é um nível lógico baixo e $Q1$ também não conduz. Nesta condição, a corrente sobre os LEDs é zero.

Nota-se que os LEDs $D1$ a $D4$ estão em série, cada conjunto de quatro LEDs corresponde ao mesmo comprimento de onda. Essa topologia em série foi realizada para que a corrente sobre os LEDs fosse a mesma, de modo a minimizar ruídos e variações. Entretanto, deve-se se atentar a queda de tensão sobre os LEDs para não interferir na condução de $Q1$.

O esquema elétrico da Figura 3.11 foi elaborado para suportar quatro LEDs. Sabendo que o sistema comporta 16 LEDs, o circuito está repetido em mais três conjuntos. O protótipo do roteamento do circuito completo final é apresentado na Figura 3.12. Nesta proposta, optou-se por separar o circuito em duas placas, uma para todo controle e outra apenas para suportar os LEDs.

Figura 3.12: PCIs: (a) controle e fonte de corrente dos LEDs e (b) posicionamento dos LEDs.

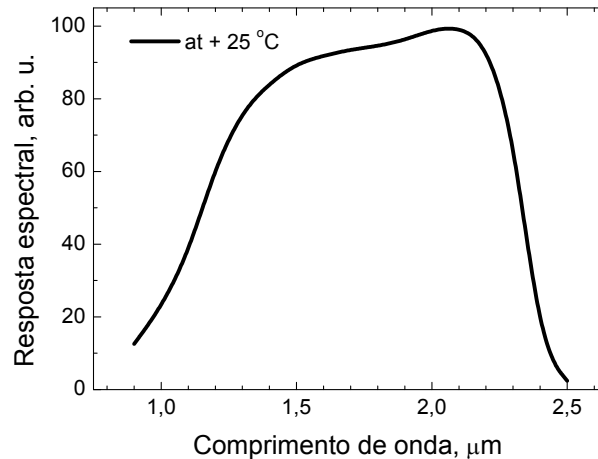


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Circuito de fotodetecção

Para o circuito de fotodetecção utilizou-se o fotodiodo PD24-03 da *Roithner Lasertechnik GmbH*, que possui atuação entre 1150 e 2400 nm. A curva característica de resposta deste componente é apresentada na Figura 3.13.

Figura 3.13: Resposta característica do fotodiodo PD24-03.



Fonte: Adaptador de Roithner Lasertechnik GmbH.

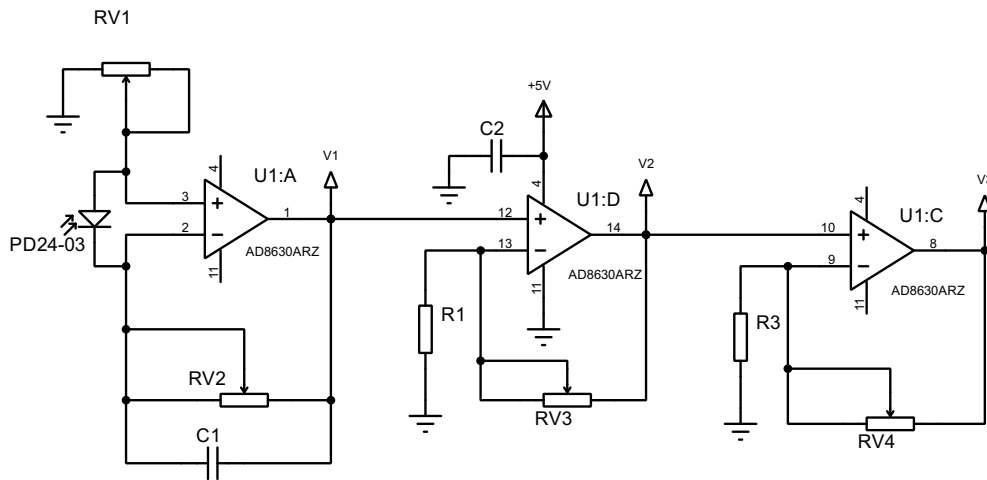
O circuito de fotodetecção segue as especificações do *datasheet* do AD8630ARZ (DEVICES, 2010). Trata-se de um componente de precisão, alimentação 5V *rail-to-rail*, com elevada rejeição a sinais de modo comum (130 dB), baixa tensão de *offset* (1 μV) e desvio 0,002 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

O esquema elétrico é visto na Figura 3.14. Nota-se a presença de três estágios, o primeiro no amplificador $U1 : A$, o segundo em $U1 : D$ e o terceiro $U1 : C$. As terminologias adotadas referem-se aos amplificadores interno do CI AD8630ARZ, e a ordem foi estabelecida de modo a facilitar o roteamento.

O primeiro estágio é uma topologia de transimpedância, destinado a converter a corrente gerada pelo fotodiodo em tensão, este circuito foi projetado com base em (JOHNSON, 2003). Neste estágio há a presença de dois potenciômetros para ajuste do ganho, $RV1$ e $RV2$, e o capacitor $C1$ pra estabilizar o sinal e diminuir níveis de ruído. Seja I_p a corrente gerada pelo fotodiodo, a saída deste circuito V_1 é dada pela relação:

$$V_1 = I_p(RV1 + RV2) \quad (3.2)$$

Os dois estágios seguintes são ganhos e seguem a topologia do amplificador

Figura 3.14: Circuito de condicionamento do fotodiodo PD24-03.

Fonte: Elaborado pelo autor.

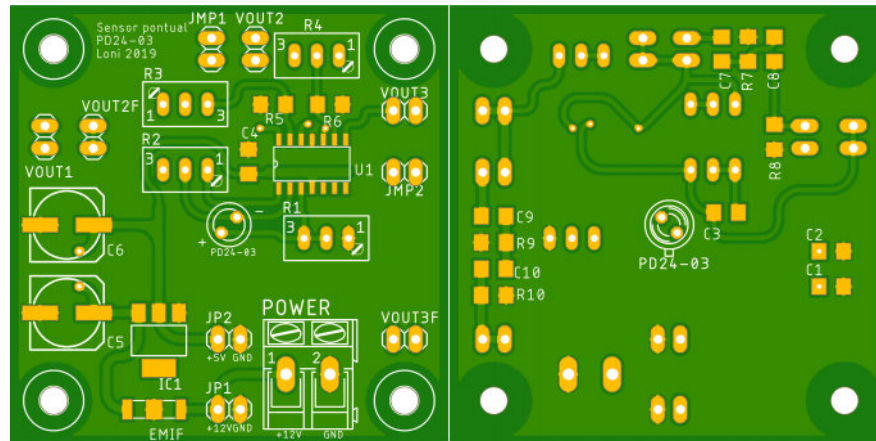
não inversor. Pelo equacionamento,

$$V_2 = \left(1 + \frac{RV3}{R1}\right) V_1, \quad (3.3)$$

$$V_3 = \left(1 + \frac{RV4}{R3}\right) V_2. \quad (3.4)$$

Os valores de resistências utilizados foram $RV1$ e $RV2$ iguais a $750 \text{ k}\Omega$, $RV3$ igual a $200 \text{ k}\Omega$, $RV4$ igual $300 \text{ k}\Omega$ e $R1$ e $R3$ iguais a $1 \text{ k}\Omega$. Portanto, o ganho do primeiro estágio é $1,5 \cdot 10^6$, o ganho do segundo e terceiro estágio são aproximadamente 300 e 200 respectivamente, e, por fim, o ganho total do circuito é aproximadamente $9 \cdot 10^{10}$. Reforçando a dificuldade de manter o sinal de saída estável.

A partir do circuito demonstrado anteriormente, desenvolveu-se uma placa de circuito impresso. A PCI do condicionamento da fotodetecção é ilustrada na Figura 3.15.

Figura 3.15: PCI de condicionamento do fotodiodo PD24-03.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias utilizadas na construção do sistema proposto, demonstrando o projeto da esfera de integração desde seu planejamento, impressão e pintura. Também foram identificados os circuitos eletrônicos utilizados para a validação do protótipo.

No capítulo a seguir são apresentados os procedimentos experimentais e seus resultados.

4 Discussões do sistema proposto

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais realizados e as discussões a respeito dos resultados alcançados.

A análise do sistema proposto está dividida em três partes: avaliação da esfera de integração, testes realizados e testes futuros. Vale ressaltar que os circuitos eletrônicos presentes neste trabalho estão sendo utilizados para criar as condições de provas, isto é, sua calibração e validação em termos eletroeletrônicos não serão apresentadas, discussões similares já foram levantadas em trabalhos passados Gentilin et al. (2016), Moreira et al. (2016), Dias et al. (2018), e podem ser retomadas de forma mais apropriada em um trabalho futuro.

A avaliação da esfera de integração foi realizada a partir do seu coeficiente de reflexão. Para realizar a medida deste valor utilizou-se um espectrofotômetro de bancada e um aparato de referência que possui índice de reflexão de, no mínimo, 99%. Deste modo, foi possível registrar através do equipamento a quantidade de fluxo luminoso refletido em determinada faixa espectro, e calcular seu índice de reflexão de forma proporcional.

Foram realizados alguns testes para avaliar as influências intrínsecas e extrínsecas que podem afetar o sistema. Para efeito de uma melhor prática, todos os testes ocorreram dentro do laboratório de instrumentação inteligente, uma vez que este é um ambiente fechado e controlado com auxílio de ar condicionado. Cada tomada de teste durou cerca de 1800 segundos (30 minutos), com o registro do sinal de saída a cada 5 segundos. Para captura do sinal de saída (tensão proporcional criada pelo circuito de transimpedância com o fotodiodo PD24-03), utilizou-se o aquisitor de dados de bancada, Agilent 34972A LXI Data Acquisition/Data Logger Switch Unit com o módulo 34902A 16 Channel Multiplexer. Os testes foram reproduzido para LEDs de 950 nm, 1200 nm, 1450 nm e 1550 nm.

Uma vez que o objetivo é avaliar o desempenho do sistema de múltiplas esferas, as grandezas analisadas foram variadas para observar a influência na

resposta. Também foram capturados os sinais em cada uma das esferas (de análise e de referência), deste modo foi possível examinar o comportamento em uma esfera isolada (esfera de análise), e também a diferença entre ambos os sinais, isto é, o sinal da esfera de análise subtraído do sinal da esfera de referência. A partir dos dados coletados foram plotadas curvas do comportamento em função do tempo e realizada suas discussões.

4.1 Montagem da esfera de integração

A construção do sistema iniciou a partir do encaixe das peças para a criar a esfera de integração. Na Figura 4.1 é apresentada a esfera de integração menor. O uso de lixa d'água antes da aplicação da tinta de sulfato de bário possibilitou uma suavização da superfície interna da esfera. Vale ressaltar que a superfície não precisa ser perfeitamente lisa, uma vez que a reflexão difusa reflete inúmeras vezes em direções aleatórias e, portanto, todo interior da esfera torna-se uma fonte de radiação homogênea.

Figura 4.1: Esfera de integração menor.



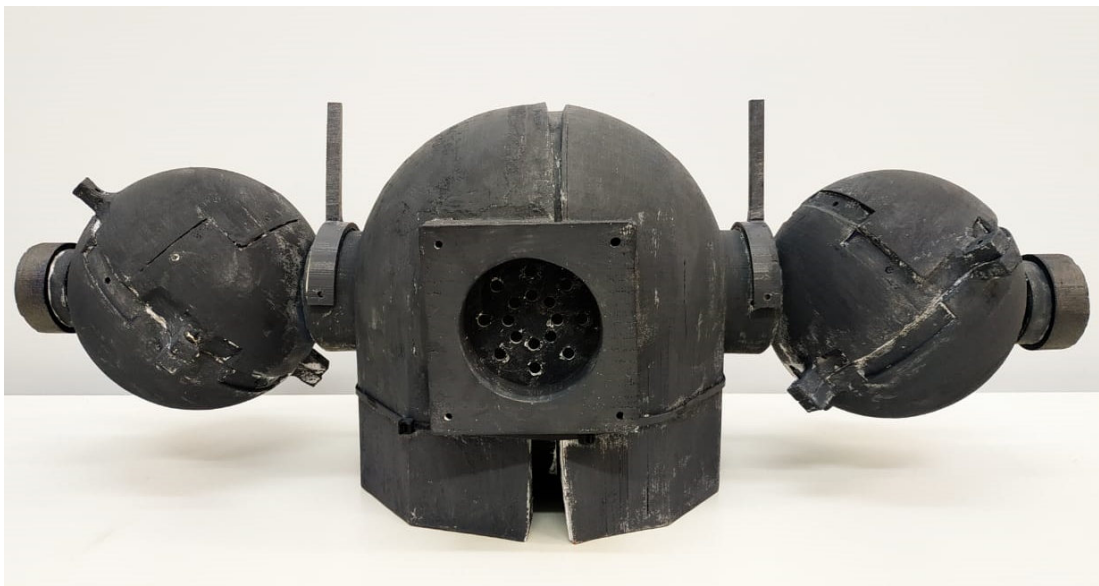
Fonte: Elaborado pelo autor.

No processo de produção da tinta, o uso do agitador magnético com aquecimento proporcionou uma mistura mais homogênea comparada com procedimento feito anteriormente, no qual o aquecimento foi realizado em banho termostático e agitação manual em todo o processo. A aplicação da tinta mostrou-se eficaz. Inicialmente, alguns pontos da superfície interna, com excesso de tinta, apresentaram craquelamento durante a secagem, prejudicando a reflexão. Entretanto, essas falhas puderam ser corrigidas aspergindo água ultra pura aquecida e moldando suavemente a superfície. A refletância da esfera foi validada utilizando-se um espectrômetro FT-IR/NIR. Ajustou-se o equipamento para apresentar o nível de energia que chega ao sensor, após a luz incidir na amostra. Utilizou-se um disco de referência cuja refletância é superior a 99%. Nas leituras de energia, este ma-

terial apresentou o valor de 2029. Na sequência, testou-se a esfera de integração, obtendo-se um valor de 1797, que representa 88,56% de refletância, comparado ao valor de referência.

Novamente, na esfera maior, todas as peças foram lixadas para melhor encaixe e devidamente pintadas com a tinta de sulfato de bário. A construção de todo sistema demonstrada na Figura 4.2. Apesar da superfície externa apresentar algumas irregularidades no formato e encaixe, a superfície interna, que consiste, de fato, na esfera de integração, possui o acabamento mais aprimorado, conforme mencionado, a fim de garantir um melhor desempenho em sua implementação.

Figura 4.2: Sistema completo.

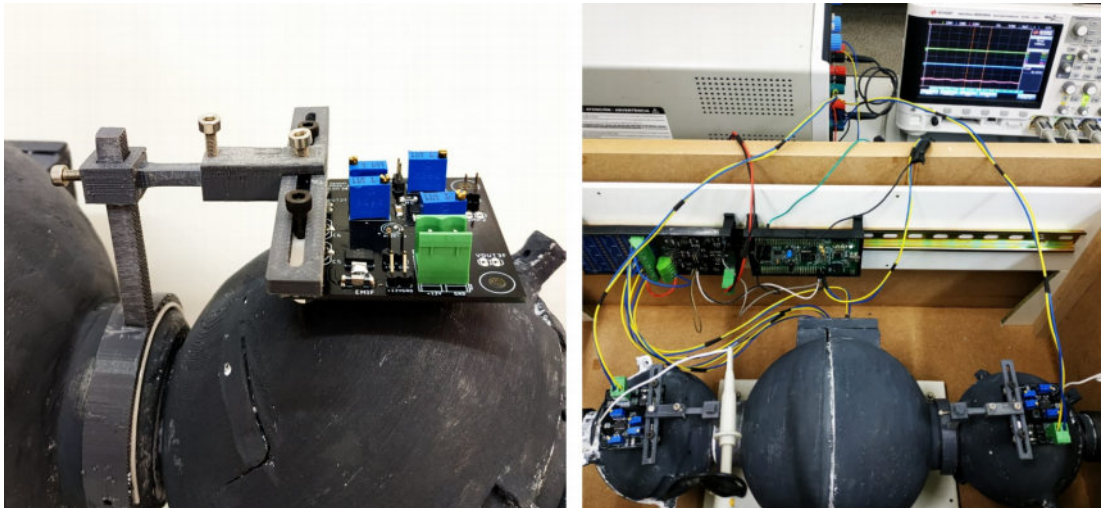


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Testes realizados

Para aquisição dos dados, encaixou-se a placa do fotodiodo PD24-03 no suporte presente na esfera, conforme a Figura 4.3. O suporte proporcionou boa fixação e estabilidade. Ademais, a sua capacidade de movimentação em três dimensões facilitou o posicionamento adequado do sensor em ambos os lados do sistema.

O circuito de acionamento e a placa STM32F4DISCOVERY foram fixados ao lado do protótipo, seguido do aquisitor de dados para captura dos sinais.

Figura 4.3: Suporte para placa de condicionamento do fotoreceptor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

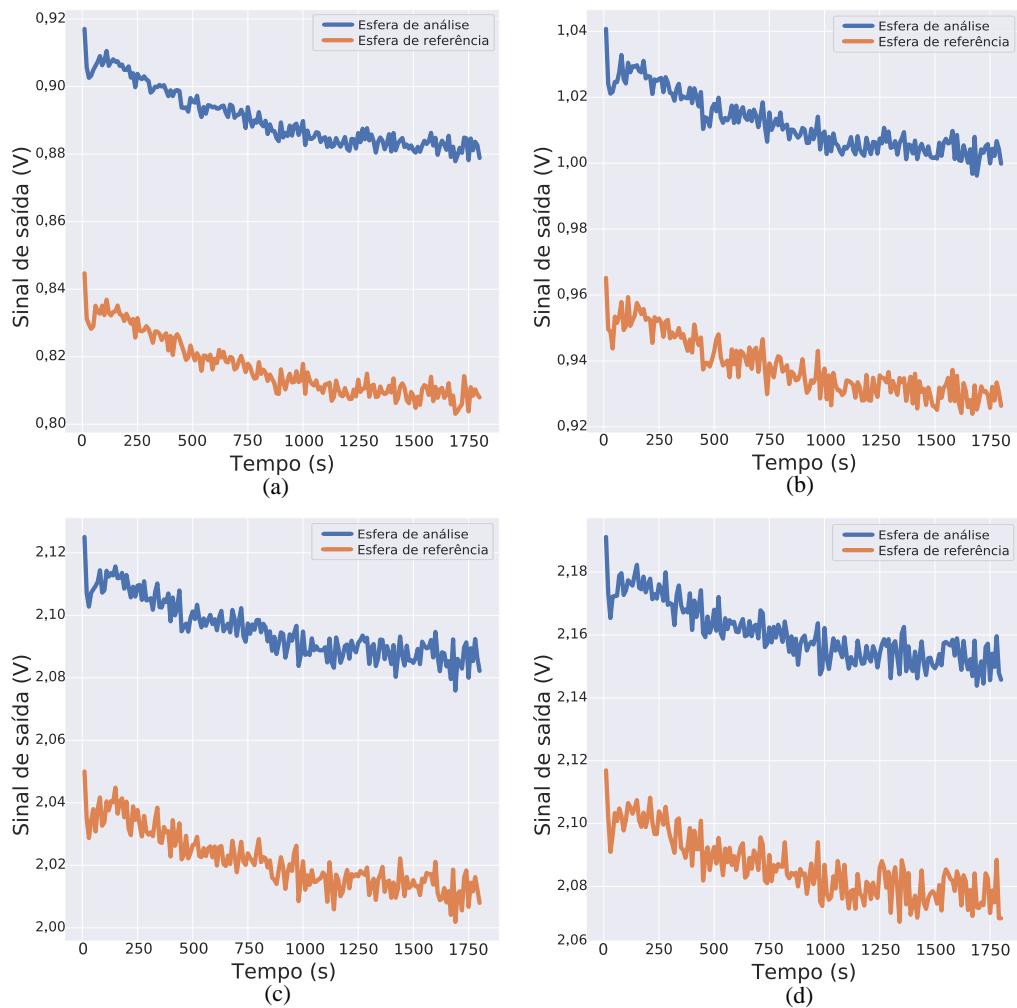
4.2.1 Teste de estabilização do sistema óptico

Finalizada a montagem, o primeiro teste realizado foi referente à estabilização da potência luminosa ao longo do tempo, isto é, acionar o equipamento e observar sua saída até os sinais lidos pelo fotodiodo estabilizarem. O resultado da coleta é visto na Figura 4.4, onde os gráficos de (a) à (d) correspondem respectivamente aos comprimentos de onda de 1550 nm, 1450 nm, 1200 nm e 970 nm. Em todos os casos, os sinais azuis correspondem à esfera de análise, enquanto os sinais laranjas indicam a esfera de referência.

A partir das curvas geradas, é possível observar a presença de um decaimento característico dos dispositivos optoeletrônicos. Considerando o instante inicial de energização do sistema e a estabilização após 30 minutos, há uma média de variação de 44,1 mV. Uma vez que utilizaram-se componentes distintos para criar as placas de aquisição com os sensores PD24-03, também é possível notar uma diferença nos sinais de ambas as esferas, entretanto, o comportamento é similar.

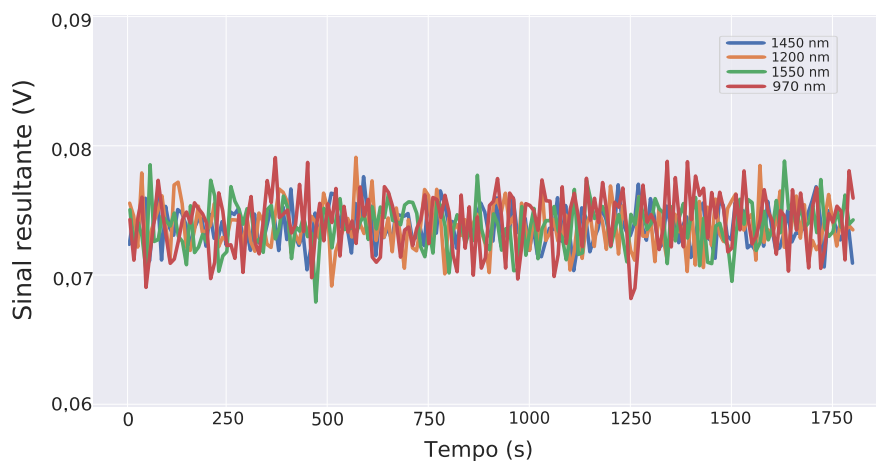
Para examinar o sinal resultante do sistema, foi realizada a subtração do sinal da esfera de análise com a referência. Nesse caso, a média da variação dos sinais de saída ao longo do tempo foi de 9,8 mV, o que representa uma redução de 77,78%. O resultado obtido encontra-se na Figura 4.5, onde o vermelho corresponde ao LED 970 nm, o laranja 1200 nm, o azul 1450 nm e o verde 1530 nm. Nota-se, neste caso, uma redução na variação do sinal resultante.

Figura 4.4: Estabilização do sinal de saída: (a) LED 1.550 nm, (b) LED 1.450 nm, (c) LED 1.200 nm e (d) LED 970 nm. Curva azul corresponde ao sinal da esfera de análise e a curva laranja ao sinal da esfera de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.5: Sinais resultantes no teste de estabilização: vermelho corresponde ao LED 970 nm, o laranja 1.200 nm, o azul 1.450 nm e o verde 1.530 nm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para uma melhor exploração, calculou-se a variação e o desvio padrão dos sinais de análise, referência e resultante para cada um dos comprimentos de onda apresentados. Estes dados estão exposto nas Tabelas 4.1 a 4.4. Em todos os casos, a partir dos dados apresentados, é possível notar uma redução na variação e desvio padrão do sinal resultante em comparação com os sinais de análise e referência, logo, um sistema de múltiplas esferas é capaz de reduzir influências referentes à estabilização do sistema óptico.

Tabela 4.1: Dados do teste de estabilização do LED 970 nm.

| 970 nm | S. de análise (V) | S. de referência (V) | S. resultante (V) |
|---------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Máximo | 2,1912 | 2,1169 | 0,0791 |
| Mínimo | 2,1439 | 2,0687 | 0,0681 |
| Variação | 0,0473 | 0,0482 | 0,0110 |
| Desvio padrão | 0,0092 | 0,0098 | 0,0022 |

Tabela 4.2: Dados do teste de estabilização do LED 1.200 nm.

| 1200 nm | S. de análise (V) | S. de referência (V) | S. resultante (V) |
|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Máximo | 2,1250 | 2,0500 | 0,0788 |
| Mínimo | 2,0759 | 2,0019 | 0,0679 |
| Variação | 0,0491 | 0,0481 | 0,0109 |
| Desvio padrão | 0,0091 | 0,0093 | 0,0018 |

Tabela 4.3: Dados do teste de estabilização do LED 1.450 nm.

| 1450 nm | S. de análise (V) | S. de referência (V) | S. resultante (V) |
|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Máximo | 1,0407 | 0,9652 | 0,0791 |
| Mínimo | 0,9962 | 0,9240 | 0,0691 |
| Variação | 0,0445 | 0,0412 | 0,0100 |
| Desvio padrão | 0,0087 | 0,0088 | 0,0018 |

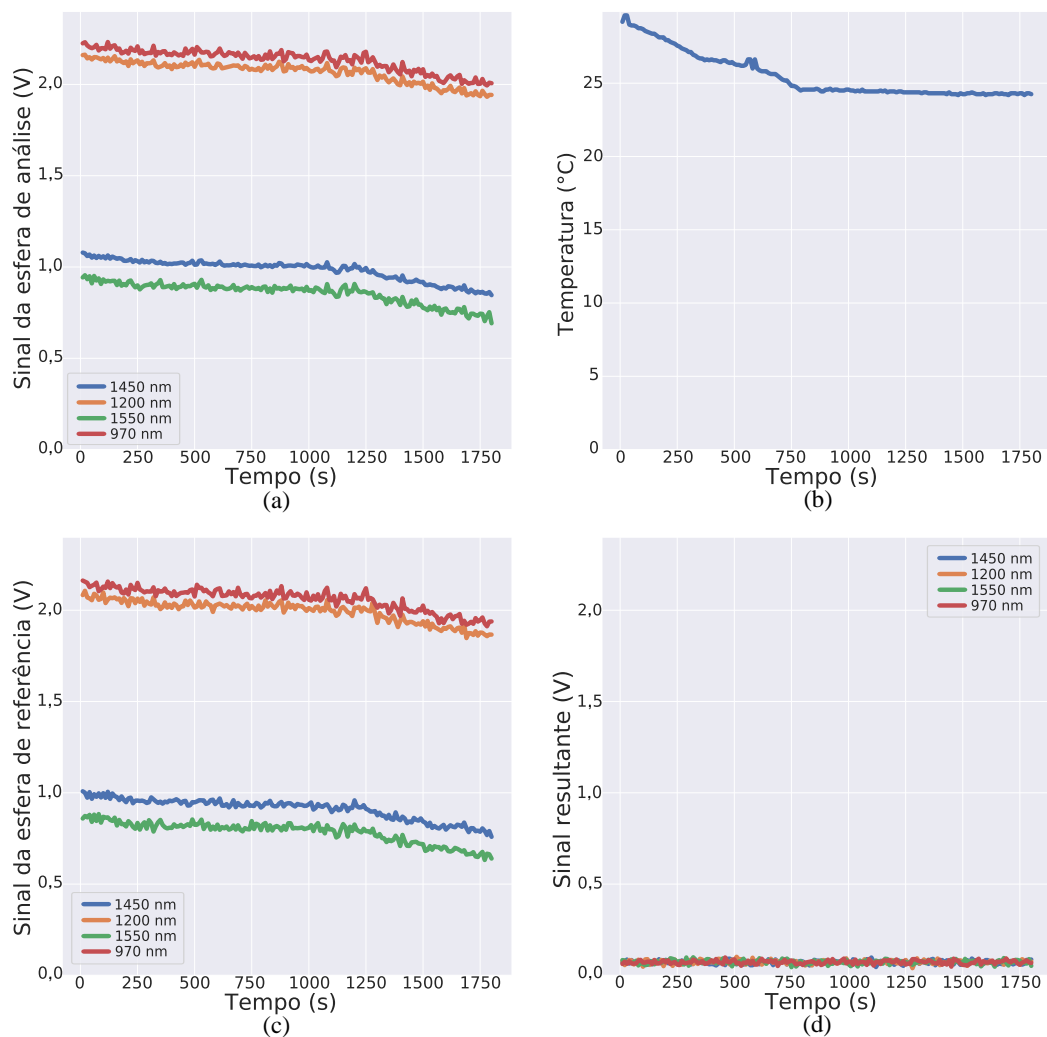
Tabela 4.4: Dados do teste de estabilização do LED 1.550 nm.

| 1550 nm | S. de análise (V) | S. de referência (V) | S. resultante (V) |
|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Máximo | 0,9170 | 0,8404 | 0,0776 |
| Mínimo | 0,8779 | 0,8049 | 0,0703 |
| Variação | 0,0391 | 0,0355 | 0,0073 |
| Desvio padrão | 0,0087 | 0,0086 | 0,0014 |

4.2.2 Variação da temperatura

No teste de variação de temperatura submeteu-se o sistema a uma transição de 29,84 °C a 24,39 °C, novamente realizado dentro do laboratório, e, neste caso, com o auxílio do ar condicionado para variar a temperatura. Destaca-se que a realização deste ensaio ocorreu somente após o período de estabilização do sistema optoeletrônico. Os resultados obtidos para os diferentes comprimentos de onda são apresentados na Figura 4.6, sendo em (a) os dados coletados da esfera de análise, (b) a temperatura variada ao longo do tempo, (c) os dados da esfera de referência e (d) os sinal resultantes para cada comprimento de onda.

Figura 4.6: (a) Sinais de saída da esfera de análise sob uma variação de temperatura, (b) Temperatura ao longo do tempo, (c) Sinais de saída da esfera de referência sob uma variação de temperatura e (d) Sinais resultantes sob uma variação de temperatura. Para todo o caso os comprimentos de onda são: vermelho 970 nm, laranja 1.200 nm, azul 1.450 nm e verde 1.550 nm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das curvas apresentadas, é possível observar nas Figuras 4.6(a) e

4.6(c) uma alteração nos sinais a medida que a temperatura decai. Para mudança de 5 °C, a média de variação dos sinais foi de 246,8 mV. Novamente, os sinais das esferas de análises e referência apresentam comportamento semelhante e, ao realizar a subtração da primeira em relação a segunda, para identificar a tensão resultante (Figura 4.6(d)), é possível notar mais uma vez a menor variação ao longo do tempo. Após compensação, a média de variação dos sinais de saída foi de 55,05 mV, o que representa uma redução de 77,69%. Dessa forma, é possível notar mais robustez no sistema e habilidade de trabalhar adequadamente com a variação de temperatura mesmo após a estabilização. As amplitudes e o desvio padrão para cada comprimento de onda dos sinais coletados são apresentados de forma mais detalhada nas Tabelas 4.5 a 4.8.

Tabela 4.5: Dados do teste de variação de temperatura do LED 970 nm.

| 970 nm | S. de análise (V) | S. de referência (V) | S. resultante (V) |
|---------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Máximo | 2,2325 | 2,1625 | 0,0984 |
| Mínimo | 1,9947 | 1,9120 | 0,0477 |
| Variação | 0,2378 | 0,2505 | 0,0507 |
| Desvio padrão | 0,0605 | 0,0616 | 0,0098 |

Tabela 4.6: Dados do teste de variação de temperatura do LED 1.200 nm.

| 1200 nm | S. de análise (V) | S. de referência (V) | S. resultante (V) |
|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Máximo | 2,1628 | 2,1067 | 0,1019 |
| Mínimo | 1,9323 | 1,8475 | 0,0394 |
| Variação | 0,2305 | 0,2592 | 0,0625 |
| Desvio padrão | 0,0590 | 0,0600 | 0,0104 |

Tabela 4.7: Dados do teste de variação de temperatura do LED 1.450 nm.

| 1450 nm | S. de análise (V) | S. de referência (V) | S. resultante (V) |
|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Máximo | 1,0791 | 1,0084 | 0,0980 |
| Mínimo | 0,8459 | 0,7588 | 0,0455 |
| Variação | 0,2322 | 0,2496 | 0,0525 |
| Desvio padrão | 0,0578 | 0,0585 | 0,0099 |

Tabela 4.8: Dados do teste de variação de temperatura do LED 1.550 nm.

| 1550 nm | S. de análise (V) | S. de referência (V) | S. resultante (V) |
|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Máximo | 0,9550 | 0,8837 | 0,0993 |
| Mínimo | 0,6919 | 0,6320 | 0,0448 |
| Variação | 0,2631 | 0,2519 | 0,0545 |
| Desvio padrão | 0,0587 | 0,0589 | 0,0111 |

4.3 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo apresentaram-se as metodologias experimentais realizadas e as discussões referentes aos resultados obtidos.

No capítulo a seguir serão apresentadas as conclusões do trabalho.

5 Conclusão

Foi proposto, através deste trabalho, um sistema optoeletrônico de varredura espectral para análise do infravermelho pela reflexão difusa utilizando múltiplas esferas de integração, a fim de minimizar influências intrínsecas e extrínsecas que ocorrem em protótipos deste seguimento. O equipamento foi estruturado em duas grandes etapas, conjunto óptico (partes mecânicas) e conjunto eletrônico (circuitos de controle, acionamento e leitura das respostas geradas).

Para validação do protótipo foram projetadas e construídas três esferas de integração. A concepção em *software* CAD seguido das impressões das peças utilizando impressora 3D foram suficientes para a estruturação da parte óptica. A tinta confeccionada em laboratório para pintar as superfícies internas das esferas de integração apresentou coeficiente de reflexão próximo a valores comerciais, cerca de 88,5%.

Ainda sobre o sistema óptico, como fonte de luz foram utilizados LEDs infravermelhos, uma vez que permitem melhor seleção da região espectral de atuação. Os LEDs foram empregados de forma estratégica para obter a leitura de quatro faixas distintas do NIR. Estes dispositivos mostraram-se capazes para emprego em protótipos com a finalidade de análise espectral. Para a leitura das respostas do sistema utilizou-se o fotodiodo PD24-03, que atua como um sensor pontual cobrindo a região do infravermelho próximo.

O sistema eletrônico para o controle e acionamento do protótipo apresentou um bom desempenho. O uso da placa STM32F4DISCOVERY facilitou a geração dos PWMs para modulação das fontes de corrente apresentadas. Com relação ao circuito de condicionamento do fotoreceptor, o uso do amplificador de precisão AD8630 permitiu uma resposta satisfatória, com níveis de tensões aceitáveis para análise do protótipo.

Sobre o procedimento experimental, idealmente seria necessária uma câmara climática para submeter o equipamento desenvolvido a testes. Entretanto, na ausência desse, utilizou-se o ambiente do Laboratório de Automação e Instru-

mentação Inteligente da Universidade Estadual de Londrina, controlado por ar condicionado. A alternativa possibilitou os testes de análise da estabilização da potência luminosa e análise da influência da temperatura, limitando-se a estes.

Com os resultados obtidos, é possível comprovar a hipótese de que o protótipo baseado em múltiplas esferas de integração é capaz de minimizar as influências que afetam os sinais lidos através do sistema. O uso de uma das esferas de integração como sinal de referência permitiu leitura diferencial, reduzindo significativamente as variações na resposta.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

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

- Testes adicionais para verificar se outras influências, como umidade e vibração, podem ser minimizadas pelo sistema.
- Testes incluindo amostras para analisar o desempenho do sistema comparado a trabalhos desenvolvidos anteriormente, utilizando uma única esfera de integração.

Referências

- ARTIME, C. E. C.; FUENTE, J. A. B. de la; GARCIA, M. A. P.; VEGA, R. M.; BLANCO, N. C. On-line estimation of fresh milk composition by means of vis-nir spectrometry and partial least squares method (pls). In: *IEEE. 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. [S.l.], 2008. p. 1471–1475.
- BAKA, N. A.; ABU-SIADA, A.; ISLAM, S.; EL-NAGGAR, M. A new technique to measure interfacial tension of transformer oil using uv-vis spectroscopy. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 1275–1282, 2015.
- CAPACCIONI, F.; SANCTIS, M. C. D.; FILACCHIONE, G.; PICCIONI, G.; AMMANNITO, E.; TOMMASI, L.; VELTRONI, I. F.; COSI, M.; DEBEL, S.; CALAMAI, L. et al. Vis-nir imaging spectroscopy of mercury’s surface: Simbiosys/vihi experiment onboard the bepicolombo mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 48, n. 11, p. 3932–3940, 2010.
- DEVICES, A. *AD8630 Zero Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifier*. [S.l.]: Datasheet, 2010.
- DIAS, L. da S.; JUNIOR, J. C. da S.; FELÍCIO, A. L. d. 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*, IEEE, n. 99, p. 1–8, 2018.
- ELLIS, D. I.; BROADHURST, D.; KELL, D. B.; ROWLAND, J. J.; GOODACRE, R. Rapid and quantitative detection of the microbial spoilage of meat by fourier transform infrared spectroscopy and machine learning. *Appl. Environ. Microbiol.*, Am Soc Microbiol, v. 68, n. 6, p. 2822–2828, 2002.
- FOSTER, N. S.; THOMPSON, S. E.; VALENTINE, N. B.; AMONETTE, J. E.; JOHNSON, T. J. Identification of sporulated and vegetative bacteria using statistical analysis of fourier transform mid-infrared transmission data. *Applied spectroscopy*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 58, n. 2, p. 203–211, 2004.
- FREITAS, G. P.; SANTANA, M. V.; SPACEK, A. D.; BILESSIMO, L. D.; JUNIOR, O. H. A.; PEREIRA, T. C. Propose of a low cost integrating sphere. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 2016.
- GENTILIN, F. A.; KOBO, B. T.; RIBEIRO, L. de S.; FRANÇA, J. A. de; FELÍCIO, A. L. de S.; FRANÇA, M. B. d. M.; FILHO, D. d. O. T. Development and testing of a hardware platform for measuring instruments based on near-infrared diffuse reflection. *Measurement*, Elsevier, v. 86, p. 14–25, 2016.

- JOHNSON, M. *Photodetection and measurement: maximizing performance in optical systems*. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2003.
- LABSPHERE. *Technical Guide: Integrating Sphere Theory and Applications*. [S.l.]: Labsphere North Sutton, NH, 2013.
- LAPORTE, M.-F.; PAQUIN, P. Near-infrared analysis of fat, protein, and casein in cow's milk. *Journal of agricultural and Food Chemistry*, ACS Publications, v. 47, n. 7, p. 2600–2605, 1999.
- LOH, J.; WANG, Z.; THOMSON, M. J. Measuring gas temperature in highly particle laden flow using terahertz spectroscopy. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, IEEE, v. 6, n. 4, p. 518–524, 2016.
- MICROELECTRONICS, S. Stm32f4discovery. *STM32F0 highperformance discovery board, User manual*, 2013.
- MOREIRA, M.; FRANCA, J. A. de; FILHO, D. de O. T.; BELOTI, V.; YAMADA, A. K.; FRANÇA, M. B. d. 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*, IEEE, v. 16, n. 10, p. 3653–3663, 2016.
- MORGANO, M. A.; FARIA, C. G.; FERRÃO, M. F.; BRAGAGNOLO, N.; FERREIRA, M. M. d. C. et al. Determinação de umidade em café cru usando espectroscopia nir e regressão multivariada. *Food Science and Technology (Campinas)*, Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2008.
- PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian chemical society*, SciELO Brasil, v. 14, n. 2, p. 198–219, 2003.
- PINHEIRO, P. P.; SANTOS, J. C. F. D.; FRANÇA, M. B. D. M. Development, testing, and validation of a prototype for qualification of substances based on near-infrared spectroscopy. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 25650–25659, 2019.
- RIBEIRO, L. de S.; GENTILIN, F. A.; FRANÇA, J. A. de; 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*, IEEE, v. 65, n. 7, p. 1698–1706, 2016.
- RODRIGUEZ-SAONA, L.; KHAMBATY, F.; FRY, F.; DUBOIS, J.; CALVEY, E. Detection and identification of bacteria in a juice matrix with fourier transform–near infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Journal of food protection*, International Association for Food Protection, v. 67, n. 11, p. 2555–2559, 2004.
- SANTANA, E. J.; GERONIMO, B. C.; MASTELINI, S. M.; CARVALHO, R. H.; BARBIN, D. F.; IDA, E. I.; JR, S. B. Predicting poultry meat characteristics using an enhanced multi-target regression method. *Biosystems Engineering*, Elsevier, v. 171, p. 193–204, 2018.
- SCHMILOVITCH, Z.; SHMULEVICH, I.; NOTEA, A.; MALTZ, E. Near infrared spectrometry of milk in its heterogeneous state. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 195–207, 2000.

- SHULEI, W.; XUEGUANG, Y.; YANGAN, Z. Non-invasive blood glucose measurement scheme based on near-infrared spectroscopy. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*. [S.l.], 2017. p. s1404.
- SMITH, B. C. Fundamentals of fourier transform infrared spectroscopy. 1996. *Florida: CRC Press LLC*, 1996.
- SUN, D.-W. *Infrared spectroscopy for food quality analysis and control*. [S.l.]: Academic Press, 2009.
- TAKAHASHI, T.; IKEZAWA, Y. *White standard paint*. [S.l.]: Google Patents, abr. 29 2003. US Patent 6,555,608.
- TSENKOVA, R.; ATANASSOVA, S.; TOYODA, K.; OZAKI, Y.; ITOH, K.; FEARN, T. Near-infrared spectroscopy for dairy management: measurement of unhomogenized milk composition. *Journal of dairy science*, Elsevier, v. 82, n. 11, p. 2344–2351, 1999.
- WANG, X.; XUE, L.; HE, X.; LIU, M. Vitamin c content estimation of chilies using vis/nir spectroscopy. In: IEEE. *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*. [S.l.], 2011. p. 1894–1897.
- WILSON, R. H. Spectroscopic techniques for food analysis. 1994.

Apêndice A - Artigo Submetido

Optoelectronic system for signal correction in diffuse reflectance spectroscopy with multiple integrating spheres

Rafael Loni Martins, Alex Lemes Guedes, Ana Lúcia de Souza Madureira Felício, and José Alexandre de França

This work presents an optoelectronic system, based on diffuse reflection, to correct a spectral signal of the near-infrared region. A set with multiple integration spheres is used to compensate the input signal and improve the readings performed. The first sphere separates the radiation in two parts, one beam is directed to a second sphere from where the signal related to the sample is obtained, and the other is directed to a third, that generates a reference signal used to compensate interferences. The analyses performed showed a 77% reduction on the influence of the temperature variation and the optoelectronics decay over time. In this way, intrinsic and extrinsic interferences of basics near-infrared spectroscopy prototypes are minimized, and their performance can be improved.

Index Terms—optoelectronic devices, NIR, infrared LEDs, photodetection.

I. INTRODUCTION

Spectroscopy is a search area of electronic instrumentation that presents itself as one of the most promising models in the identification and quantification of physical-chemical samples. Spectroscopy is the technique that analyzes the absorption of light from a given sample to obtain physico-chemical information, such as concentration and molecular composition. In this procedure, the incident radiation produces a selective response. This implies that some wavelengths are absorbed while others are rejected and still others are partially absorbed. This information can be obtained by analyzing the intensity reduction of the incident electromagnetic signal, used to estimate the concentration of these molecules. Therefore, through the absorption of incident radiation, it is possible to determine whether a sample is pure or if it contains a specific substance in its composition. Another characteristic of this technique is the ability to analyze the properties of a test in any physical state, with a non-destructive action, that is, without changing its attributes. Besides, the components present in nature, for the most part, can absorb energy from light radiation in a certain range of the electromagnetic spectrum. Thus, by defining a spectral region of interest and examining the absorption of light in that region, it is possible to determine the presence of a substance and quantify its concentration.

Low complexity systems for spectral analysis and prototypes based on spectroscopy for specific purpose were developed over the years, each with its peculiarities and different sampling methods, accordingly to the matter being analyzed. These devices are based on the same operating principles of the commercial equipment, however, they aims a singular application, such as food analysis [22] [25], ambient humidity variation [7], temperature analysis in gas particles [12], the

study of blood glucose [20], analysis of adulteration in raw milk [1] [5], and others. However, identifying and quantifying a sample through spectrometry is not a trivial process once several practical factors must be considered, among them: the amount of different constituents in a chemical compound (some have thousands of them), and the influence of external factors, such as temperature, humidity and ambient light, in the optoelectronic devices used in spectroscopy. Thus, the instrumentation of infrared receivers are complex [14] [19], and the systems are sensitive, so that a variation in the system output caused by some of these factors can be confused with a variation of the sample concentration.

The electrical signals obtained by the sensors used in spectroscopy usually have an extremely small scale, in the order of dozens of nanovolts or less. Thus, to achieve the best results for a developed prototype, intrinsic and extrinsic interferences cannot be ignored and should be minimized as much as possible. The temperature is one of the main extrinsic influences in less complex spectroscopy systems, once most of them are built using optoelectronic devices, such as LEDs (light-emitting diodes) and photodiodes, which have characteristics that change with temperature. Therefore, a change in the ambient temperature affects the behavior of these devices. This phenomenon can be observed in the works developed by Moreira et al. (2016) [13], Gentilin et al. (2016) [7], Ribeiro et al. (2016) [17], Dias et al. (2018) [5], who used NIR LEDs (near-infrared) as an emitter source and InGaAs sensor (indium, gallium, and arsenic) as a receiver. Moreira et al. (2016) [13] considered that the temperature was constant, so its influence was not analyzed. Gentilin et al. (2016) [7], Ribeiro et al. (2016) [17], Dias et al. (2018) [5] e Pinheiro, Santos e França (2019) [16] implemented a temperature control system using a Peltier module, making it constant in the system and decreasing the ambient temperature influence in the prototype response.

Related to relative humidity, the small particles of water vapor present in the environment can absorb part of the incident radiation of a spectroscopy system, changing its expected response. This phenomenon was observed by Gentilin et al. (2016) [7], who used this effect to estimate ambient relative humidity through spectroscopy. Humidity control is more complex than temperature control so most studies consider this factor constant or do not discuss its influence.

Intrinsic interferences are mainly related to alignment of optical components, but it may vary according to the sampling system and the used technique. Since the radiation consists of beams focused on a sample, passing through or being reflected by it, it is necessary to ensure an adequate

alignment for the system sampling type. There are different sampling techniques in spectroscopy, based on the reflection or transmission of the incident light, and each one has some advantages according to the type of sample and objective of analysis. Diffuse reflectance, for example, occurs when a radiation beam is reflected on the surface of a sample in random directions, involving both absorption and scattering. This happens on rough surfaces, which includes most foods. Its main disadvantage is the lower SNR (signal-to-noise ratio) compared to the transmittance technique (when the beams pass through the sample), however, it has less implementation complexity. Diffuse reflectance is suitable for solid and powder materials [15] [21] [22] [25]. The misalignment in any optical component can cause erroneous readings or make the system difficult to calibrate. One way to improve the response quality and minimize alignment complexity on diffuse reflectance-based systems is to use an optical device known as integrating sphere. The spheres are used to spatially integrate the luminous flux, ensuring a homogeneous dispersion, and increasing the incident radiation at any point on its surface. These devices have a meticulous construction according to their use purpose and are quite expensive, which leads to alternatives in their construction for use in prototypes and academic research. Its application has already been carried out in previous works [5] e [16].

The electromagnetic spectrum is extremely broad, so it is divided on several regions. Spectral analysis systems usually elect an application in a specific region rather than the entire spectrum. VIS (visible) spectroscopy, for example, has already been used to estimate vitamins [24], image analysis [3] and estimation of the interfacial tension of the transformer oil [2]. The NIR spectroscopy (near-infrared), another example, is recognized by applications in chemometric analyzes, and it has been used to analyze milk constituents, quality of poultry meat, and also to determine the amount of fat, lactose, and protein in non-homogenized raw milk [18] [1] [11] [23]. Each one of these regions may demand a radiation source. For example, halogen lamps can cover a large spectral zone, however, they can neither select a sub-range nor be modulated. If a thinner band is needed, the system can be equipped with narrow spectral bands filters that change position to perform a selection. In other cases, the systems can have an array sensor, allowing a scan in different spectrum bands. Alternatively, the radiation source can be created using one or combining several LEDs. Spectroscopic LEDs have spectral range tens of times narrower than halogen lamps, allowing a better selection and the use of a unique sensor as photoreceptor. However, LEDs demand a waiting time due their long stabilization curve and, as mentioned before, they also have dependence on temperature [8].

It is interesting to note that any system presents some wear over time, whether mechanical, electrical, or electronic. In this way, spectral analysis prototypes can present different responses to the same test as time passes. This phenomenon, usually, is not addressed in low complex systems aimed to specific applications. Commercial equipment solves this problem using a background, that is, a continuous reference signal intended to provide information for correcting the response.

In these cases, the background is usually made through a set of lenses, that also requires alignment, increasing the system complexity.

In general, the complication presented in low complex prototypes made for some specific application is the presence of several intrinsic and extrinsic interferences, such as alignment, temperature, humidity, vibration, components stabilization, and others, which constantly influences the response. The lack of a background reference signal also makes them difficult to calibrate and worsens the equipment performance.

Based on the previous discussion, this work presents a new proposal for a spectral scanning optoelectronic system for infrared analysis, using diffuse reflection and multiple integrating spheres. It extends the research developed by Dias et al. (2018) [5]. Once the integrating sphere ensures homogeneous light at different outputs, it is possible to create two analysis regions with equal characteristics. For that, it was designed a larger sphere with two smaller spheres coupled. Thus, both smaller spheres will suffer the same influences and, therefore, the first can be used to analyze a sample and the second to generate a background compensation signal. The prototype, based on the three spheres, was constructed with ABS plastic (acrylonitrile butadiene styrene) and coated with barium sulfate-based paint, which has a high reflection index. LEDs were used as source of light and InGaAs sensors (indium, gallium, arsenic) as receivers. As the prototype uses integrating spheres, the system alignment complexity was minimized, left only the design and construction of the spheres. A new technique was used to create a paint to cover their internal surfaces. The result was a 77% reduction in the variation of the system's output signal, corroborating the hypothesis of a more robust system.

II. INTEGRATING SPHERE

The integrating sphere is a device that spatially integrate the incident light flow [10]. The design of an integration sphere for any application involves only a few parameters. Among them, it is important to choose an appropriate diameter, considering the number of doors present in the sphere and their areas, since these values directly influence the proportion f , where,

$$f = \frac{(A_i + A_e)}{A_S}, \quad (1)$$

and A_i is the input door area, A_e is the output door area and A_S is the total surface area.

The main rule for design an integration sphere states that the sum of openings areas should not cover more than 5% of the total surface area, that is $f_{max} = 0.05$. For openings proportions greater than 5%, the advantages offered by the high reflectance of the integrating sphere decay. Another important aspect to design of an integrating sphere is the reflection coefficient of its internal lining. Most commercial integrating spheres have a coefficient in the range $0.95 < \rho < 0.99$, to ensure better performance on the device.

To design an integration sphere the following steps are provided.

A. Set the opening diameters

An integration sphere has at least two doors, one for incoming radiation and other for outgoing. The diameters of the doors can vary according to each project needs, but, in general, they are proportional to the radiation source and the used receiver.

The area of each door is calculated according to its shape. For circular openings, the area is obtained directly by the equation:

$$A_{openings} = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2. \quad (2)$$

Therefore, the total area of the doors ($A_{openings}$) is the sum of the partial ones and it is equal to $A_{openings} = A_i + A_e$.

B. Set minimum sphere diameter

Since $f_{max} = 0.05$, from equation (1) we get:

$$A_S \geq \frac{A_{openings}}{0.05},$$

thus,

$$D_S \geq 2\sqrt{\frac{A_{openings}}{0.05\pi}}, \quad (3)$$

where D_S is the total diameter of the integrating sphere.

C. Baffles use

When using a integrating sphere, the receiver should not see directly the incoming radiation generated by the system's light source, otherwise, it can cause a false response in the final analysis [10]. Baffles can be used to prevent this occurrence, ensuring that the outgoing radiation has been reflected at least two times within the sphere. An example is shown in Figure 1. The baffles and the internal surface of the integrating sphere are coated with the same reflective material.

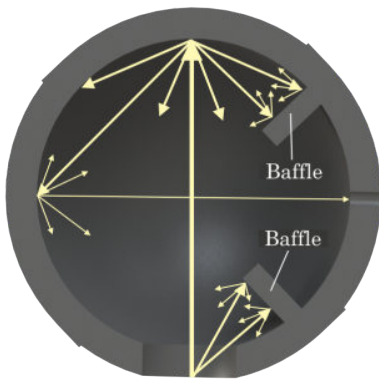


Fig. 1. Integrating sphere baffles.

III. PROPOSED METHODOLOGY

This work propose a system based on three integrating spheres for spectral analysis by diffuse reflectance, as shown in Figure 2(a). The middle sphere, bigger than the others, is intended to receive the incoming radiation generated by the LEDs, and also to spatially integrate its flow. The integrating spheres theory says that the distribution of light after multiple internal reflections becomes homogeneous and further improved due to spatial integration. Thus, for openings at any location on the sphere surface, if the area is equal, the radiation flow is the same. Therefore, using two orifices with same dimensions it is possible to create two sources of light derived from the sphere interior, which present same intensity and behavior, that is, any variation occurred in the primary source will also occur on both sources derived from the sphere. Each one of these two new light sources is directed to a smaller sphere, becoming its incoming radiation.

The external spheres, smaller than the one in the middle, have the same dimensions and the same construction characteristics. The first one was made for sample analysis (right side in Figure 2(a)), while the second was intended to generate the background to correct and compensate the measurements (left side in Figure 2(a)). Since internal and external influences affect the entire system, the signals generated on each side tend to behave similarly, allowing to cancel these effects and isolate only the measure. Each sphere has an opening for positioning the sample and the photodetector. In this proposal, the photodetector circuit is punctual and built based on a photodiode. Considering that these devices generate signals on a very small scale, a complementary circuit for signal treatment and amplification is needed. Finally, the background signal is subtracted from the sample's, so the interferences are removed, and the resulting signal reflects only the sample influence.

A. Designing the Integrating Spheres

Each one of the three integration spheres obeys the rules presented in section II. The radiation incoming ports of the smaller spheres correspond with the radiation outgoing ports of the larger sphere. They have three ports: one for incoming radiation, one for samples placement, and another for the photodetector. All dimensions and characteristics are the same.

The radiation incoming port should neither be too small so that the incident flow is not too low, nor too large, so that the f_{max} ratio be respected. Thus, the choose radius was 15 mm. This same door size allows to properly place the quartz cell used as sample holder, so that the second door also has a 15 mm radius. Finally, the third door has the same dimension as the photodetector used, that is, a 2.6 mm radius circular opening. The sum of all opening areas is equal to 1435 mm² and, assuming the coating reflectance equal to 0.9 ($\rho = 0.9$), the total diameter chosen was 100 mm, with a total surface area of 32527 mm². For this sphere, the f ratio is approximately 0.04. These data are shown in the Table I.

In the biggest sphere case, the incoming radiation is generated by 5 mm infrared LEDs. Until 16 LEDs were defined as maximum limit, so, there are 16 small circular openings

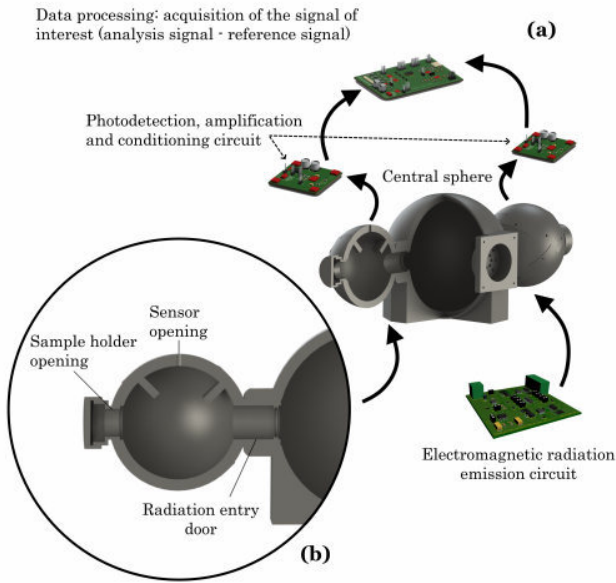


Fig. 2. (a) Proposed system diagram and (b) the geometry of the openings in the integrating spheres.

with 2.5 mm radius each. Beside these, there are two more radiation outgoing doors, which coincide with the incoming doors of the smaller spheres and, therefore, have a radius of 15 mm each. The sum of the opening total area is equal to 1728 mm², and, considering the same reflectance ($\rho = 0.9$), the diameter of the largest sphere was defined as 160 mm. Thus, the total surface area is equal to 80425 mm², and the f ratio is 0.02. A summary of these data is shown in Table II.

TABLE I
PARAMETERS OF THE SMALLER INTEGRATING SPHERES.

| | Input | Output 1 | Output 2 |
|---------------------------------------|-------|----------|----------|
| Radius (mm) | 15 | 15 | 2.6 |
| Area (mm ²) | 707 | 707 | 21 |
| Openings area, (mm ²) | 14348 | | |
| Sphere radius (mm) | 50 | | |
| Total sphere area (mm ²) | 31416 | | |
| Total surface area (mm ²) | 29981 | | |
| Openings ratio, f | 0.04 | | |
| Reflectance, ρ | 0.9 | | |

TABLE II
PARAMETERS OF THE LARGER INTEGRATING SPHERES.

| | Input | Output 1 | Output 2 |
|---------------------------------------|------------------|----------|----------|
| Radius (mm) | 2.5 ¹ | 15 | 15 |
| Area (mm ²) | 314 ² | 707 | 707 |
| Openings area (mm ²) | 1728 | | |
| Sphere radius (mm) | 80 | | |
| Total sphere area (mm ²) | 80425 | | |
| Total surface area (mm ²) | 78697 | | |
| Openings ratio, f | 0.02 | | |
| Reflectance, ρ | 0.9 | | |

¹One LED radius.

²Total area of 16 LEDs.

With the spheres dimensions defined, the system, shown in

Figure 3, was designed using a 3D CAD software and its parts were printed on a 3D printer. In the final composition can be mentioned:

- 1) Support for the infrared LEDs;
- 2) Biggest integrating sphere;
- 3) Integrating sphere for analysis;
- 4) Integrating sphere for reference;
- 5) Sample holder for analysis;
- 6) Sample holder for reference;
- 7) Support for the analysis photodetector;
- 8) Support for the reference photodetector;
- 9) Coupling of the analysis sphere;
- 10) Coupling of the reference sphere;
- 11) Opening for the analysis photodetector;
- 12) Opening for the reference photodetector.

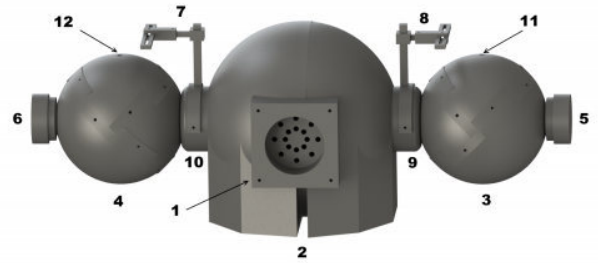


Fig. 3. Final system of three integrating spheres.

B. Integrating sphere painting

An integration sphere has a high reflection index on his internal surface, and, for this, it is usually coated with PTFE or Barium Sulfate ($BaSO_4$). The premium ABS plastic used to print has a low reflection coefficient, so an ink was created to coat the entire internal surface and increase its reflectance.

Four substances were used to create the ink: ultra-pure water, barium sulfate PA (Vetec, Sigma Aldrich ®, Brazil), ethyl alcohol with a concentration close to 100% (Qhemis ®, Brazil) and the PVA polymer with 85-124 mass and purity 99% hydrolyzed (Sigma Aldrich ®, USA).

The mixture proportions were defined empirically and the the best result was achieved for the following concentrations: 45% barium sulfate, 27% ultra-pure water, 27% ethyl alcohol, and 1% PVA. All the components were weighed on an analytical balance with uncertainty equal to 0.0001 g.

C. Optoelectronic circuit

The circuits used to validate the prototype, that is, the current source for the LEDs, the trans-impedance circuit, and the PD24-03 photodiodes instrumentation, were presented by Dias et al. (2018) [5]. Once the circuits have been validated, their reuse is a relevant alternative for performing the tests on this proposed optical system.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

The integration sphere evaluation was realized based on its reflection coefficient. To measure this value, a bench spectrophotometer and a reference apparatus that has a reflection index of at least 99% were used. In this way, it was possible to register using the equipment the amount of luminous flux reflected in a specific spectrum band and calculate its proportional reflection index.

For a best practice, all tests took place within the Automation and Intelligent Instrumentation Laboratory of the State University of Londrina, since it is a closed and temperature controlled environment. Each test took about 1800 seconds (30 minutes) to be completed, with the output signal being recorded every 5 seconds. To capture the output signal (proportional voltage generated by the trans-impedance circuit with the PD24-03 photodiode), it was used the benchtop data acquisition system Agilent 34972A LXI Data Acquisition / Data Logger Switch Unit with the 34902A 16 Channel Multiplexer module. The tests were reproduced for LEDs of 950 nm, 1200 nm, 1450 nm, and 1550 nm. These values were chosen considering the band around the central frequency, so these four LEDs cover from 880 to 1750 nm of the near-infrared region.

Since the goal is to evaluate the performance of the multi-sphere system, the analyzed quantities were manipulated to observe its influence on the output signal, captured on each one of the spheres (analysis and reference). Therefore, it was possible to examine the behavior of an isolated sphere (analysis sphere), and also the difference between both signals (analysis sphere signal subtracted from the reference sphere signal). Ahead are provided the data collected over time, showing the system behavior, and the discussions.

A. Optical system construction and internal painting validation

Each sphere was drawn in two parts using a 3D CAD software, as Figure 4 shows, and then printed using a 3D printer. It is important to mention that the internal surface of the spheres does not need to be perfectly smooth, since the diffuse reflection reflects numerous times in random directions and, therefore, the entire interior of the sphere becomes a source of homogeneous radiation. Even so, water sandpaper was used to decrease roughness on the area before applying the barium sulfate ink.



Fig. 4. Construction and painting of the smaller integrating sphere.

At least two process were tried to elaborate the ink. First the mixture was heated using a thermostatic bath and it was manually agitated throughout the process. The result, however,

was not a homogeneous mixture, so it was tried a heating magnetic stirrer. When the ink assumed a proper form, it was directly applied on the sphere. Initially, during the drying process, some spots appeared on the inner surface and then cracked due excess of paint, impairing reflection. This was corrected spraying heated ultra-pure water and gently shaping the surface.

The spheres reflectance was validated using a FT-IR/NIR spectrometer. It was adjusted to emit infrared light on a reference sample and perform a reading, that returned a value of 2029. After that, the integrating sphere was used and the measure obtained was 1797, which represents 88.56% reflectance efficiency compared to the reference value. The sample used was a disk whose reflectance is greater than 99%.

The entire system is shown in Figure 5. Although the outer surfaces have some irregularities in shape and fit, the interior, which are the integrating spheres, have improved finishing.

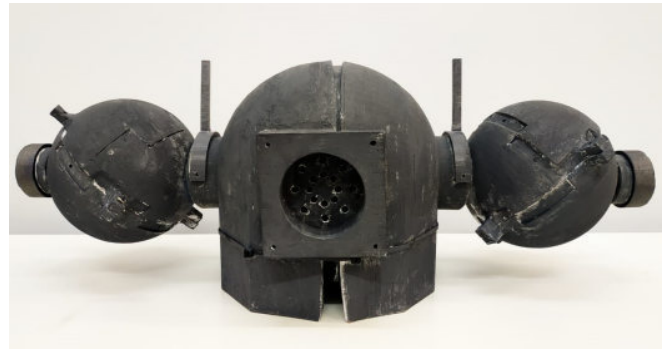


Fig. 5. Final system construction with multiple integrating spheres.

B. Optical system stabilization analysis

After the assembly was completed, the first analysis performed was about the light power stabilization over time, that is, the equipment was activated and its outputs were observed until stabilize the signals read by the photodiodes. The result is shown in Figure 6, where the graphs (a) to (d) correspond, respectively, to the wavelengths of 1550 nm, 1450 nm, 1200 nm, and 970 nm. In all cases, the blue line corresponds to the analysis sphere, while the orange indicates the reference sphere.

The curves show an intensity decay on the light measured by the photodiodes over time. There is an average variation of 44.1 mV. between the system energizing moment and its stabilization after 30 minutes. This behavior, caused by the LEDs, is characteristic of optoelectronic devices due changings in their junction temperature. One way to solve this problem is to wait the temperature stabilize, however, new changings in the temperature would result in changes in the sensor reading as well. Even though the photodetectors used in data acquisition have the same identification, they have natural variations between them, so the behavior is similar but not equal.

The result of the system is calculated by subtracting the reference from the analysis signal at each measure. In this case, the average variation of the output signals over time was

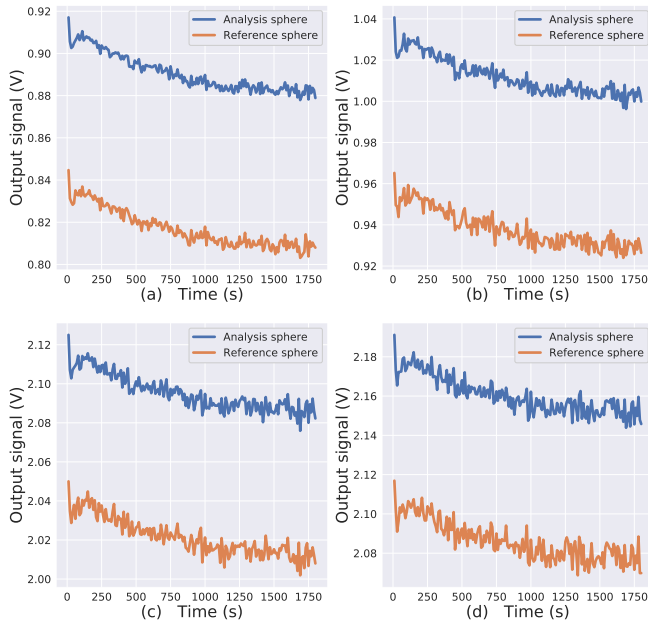


Fig. 6. Stabilization of the prototype output signal: (a) LED 1550 nm, (b) LED 1450 nm, (c) LED 1200 nm, and (d) LED 970 nm.

9.8 mV, representing a 77.78% reduction. The result obtained is shown in Figure 7, where the red line corresponds to the 970 nm LED, the orange 1200 nm, the blue 1450 nm, and the green 1530 nm. It is evident that the decay nature of the signal was removed, making the system more immune to this intrinsic LEDs problem.

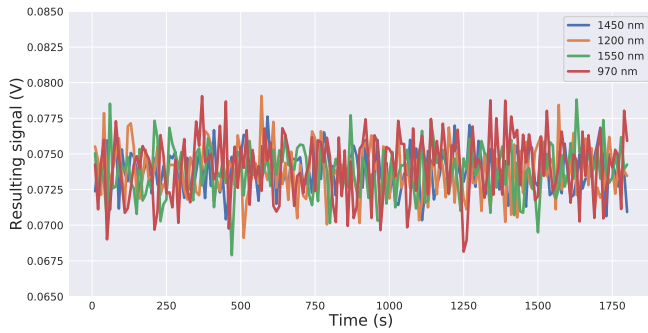


Fig. 7. Signals resulting from the stabilization test: red corresponds to LED 970 nm, orange 1200 nm, blue 1450 nm, and green 1530 nm.

The Tables III to VI show the variation and standard deviation of the analysis, reference, and resultant signals for each one of the presented wavelengths. In all cases the variation and the standard deviation of the resulting signal compared to the analysis and reference signals were reduced, therefore, a system using multiple integrating spheres can reduce influences related to the optical system stabilization.

C. Temperature variation analysis

To evaluate the temperature influence on the system, it was analyzed under a transition from 29.84 °C to 24.39 °C. After the stabilization period of the optoelectronic system, the

TABLE III
970 NM STABILIZATION TEST DATA.

| 970 nm | Analysis s. (V) | Reference s. (V) | Resulting s. (V) |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Max | 2.1912 | 2.1169 | 0.0791 |
| Min | 2.1439 | 2.0687 | 0.0681 |
| ΔV | 0.0473 | 0.0482 | 0.0110 |
| Std (σ) | 0.0092 | 0.0098 | 0.0022 |

TABLE IV
1200 NM STABILIZATION TEST DATA.

| 1200 nm | Analysis s. (V) | Reference s. (V) | Resulting s. (V) |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Max | 2.1250 | 2.0500 | 0.0788 |
| Min | 2.0759 | 2.0019 | 0.0679 |
| ΔV | 0.0491 | 0.0481 | 0.0109 |
| Std (σ) | 0.0091 | 0.0093 | 0.0018 |

temperature controller of the ambient air was setup to lower it while the electric signals and the ambient temperature were measured. The Figure 8 shows the results obtained by the different wavelengths, with (a) the data collected from the analysis sphere, (b) the ambient temperature over time, (c) the data from the reference sphere, and (d) the resulting signals for each wavelength.

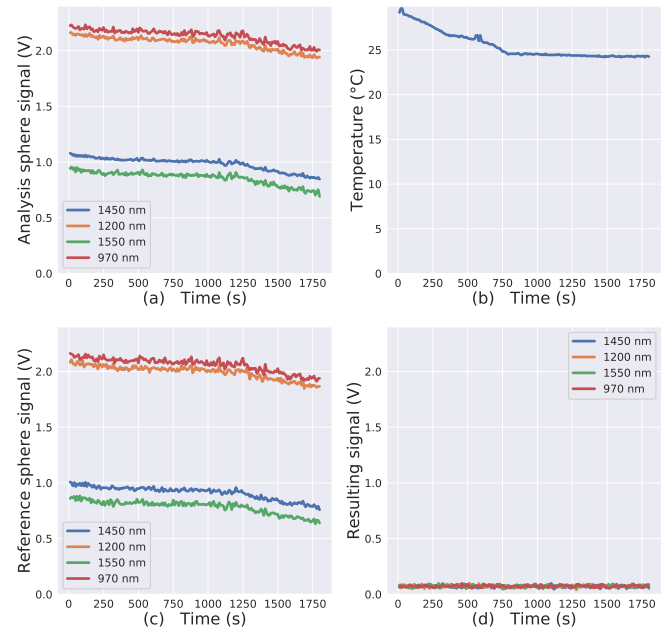


Fig. 8. (a) Output signals of the analysis sphere, (b) Temperature over time, (c) Output signals of the reference sphere, and (d) Resulting signals.

It is possible to observe in Figures 8(a) and 8(c) the electric signals changing as the temperature decreases: 246.8 mV for a 5 °C variation. Again the signals of the analysis and reference

TABLE V
1450 NM STABILIZATION TEST DATA.

| 1450 nm | Analysis s. (V) | Reference s. (V) | Resulting s. (V) |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Max | 1.0407 | 0.9652 | 0.0791 |
| Min | 0.9962 | 0.9240 | 0.0691 |
| ΔV | 0.0445 | 0.0412 | 0.0100 |
| Std (σ) | 0.0087 | 0.0088 | 0.0018 |

TABLE VI
1550 NM STABILIZATION TEST DATA.

| 1550 nm | Analysis s. (V) | Reference s. (V) | Resulting s. (V) |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Max | 0.9170 | 0.8404 | 0.0776 |
| Min | 0.8779 | 0.8049 | 0.0703 |
| ΔV | 0.0391 | 0.0355 | 0.0073 |
| Std (σ) | 0.0087 | 0.0086 | 0.0014 |

spheres show similar behavior and, when subtracting the first from the second, (Figure 8(d)), becomes evident the data improvement. After compensation, the average variation of the output signal was 55.05 mV, representing a 77.69% reduction. In this way, it is possible to notice great robustness on the system and the ability to work properly with temperature variations even after stabilization. The amplitudes and standard deviation for each wavelength are presented with more detail in Tables VII to X.

TABLE VII
970 NM TEMPERATURE VARIATION TEST DATA.

| 970 nm | Analysis s. (V) | Reference s. (V) | Resulting s. (V) |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Max | 2.2325 | 2.1625 | 0.0984 |
| Min | 1.9947 | 1.9120 | 0.0477 |
| ΔV | 0.2378 | 0.2505 | 0.0507 |
| Std (σ) | 0.0605 | 0.0616 | 0.0098 |

TABLE VIII
1200 NM TEMPERATURE VARIATION TEST DATA.

| 1200 nm | Analysis s. (V) | Reference s. (V) | Resulting s. (V) |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Max | 2.1628 | 2.1067 | 0.1019 |
| Min | 1.9323 | 1.8475 | 0.0394 |
| ΔV | 0.2305 | 0.2592 | 0.0625 |
| Std (σ) | 0.0590 | 0.0600 | 0.0104 |

TABLE IX
1450 NM TEMPERATURE VARIATION TEST DATA.

| 1450 nm | Analysis s. (V) | Reference s. (V) | Resulting s. (V) |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Max | 1.0791 | 1.0084 | 0.0980 |
| Min | 0.8459 | 0.7588 | 0.0455 |
| ΔV | 0.2322 | 0.2496 | 0.0525 |
| Std (σ) | 0.0578 | 0.0585 | 0.0099 |

TABLE X
1550 NM TEMPERATURE VARIATION TEST DATA.

| 1550 nm | Analysis s. (V) | Reference s. (V) | Resulting s. (V) |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Max | 0.9550 | 0.8837 | 0.0993 |
| Min | 0.6919 | 0.6320 | 0.0448 |
| ΔV | 0.2631 | 0.2519 | 0.0545 |
| Std (σ) | 0.0587 | 0.0589 | 0.0111 |

In addition to the temperature variation, another study that could be performed is to analyze the proposed system under humidity variation. In order to effectively validate this, however, a climatic chamber would be necessary, but, due its absence, this test was not presented in the present work. The analysis under humidity variation would be a second proof that the prototype can overcome the extrinsic interference present in spectroscopy equipment. Although it was impossible to

perform this experiment, from the analysis of the response curves on the temperature test, where the similar behavior of the reference and analysis spheres responses allowed a differential reading and eliminated the temperature influence, it is highly probable that this characteristic repeats.

V. CONCLUSION

This work proposes an optoelectronic spectral scanning system for infrared spectral analysis based on diffuse reflection using multiple integration spheres. The main goal is to minimize intrinsic and extrinsic influences that occur in prototypes of this segment. The equipment was structured in two major stages: optical set (mechanical parts) and electronic set (control circuits, activation, and responses readings).

To validate the prototype, three integration spheres were designed using a CAD software and built using a 3D printer. An ink made to increase the internal surface reflection coefficient of the spheres was created in the laboratory and achieved a reflection coefficient close to commercial values, about 88.5

Infrared LEDs were used as the light source, since they allow better selection of the operation spectral region. The LEDs were used strategically to obtain the reading of four different wavelengths of the NIR region. To read the system responses were used two PD24-03 photodiodes: one to measure the intensity of the radiation that had contact with the sample and another to measure the background radiation. The photodiodes act as a point sensor covering the near-infrared region.

The experimental procedures were performed at the Automation and Intelligent Instrumentation Laboratory of the State University of Londrina. The controlled ambient temperature made it possible to test the luminous power stabilization and analyze the influence of the temperature on the system.

With the results obtained, it was proved the hypothesis that the prototype based on multiple integration spheres can minimize the influences that affect the signals of the system. The use of a reference signal allowed differential reading, significantly reducing variations in the response.

REFERENCES

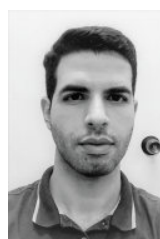
- [1] ARTIME, C. E. C.; FUENTE, J. A. B. de la; GARCIA, M. A. P.; VEGA, R. M.; BLANCO, N. C. On-line estimation of fresh milk composition by means of VIS-NIR spectrometry and partial least squares method (pls). In: IEEE. 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. [S.l.], 2008. p. 1471–1475.
- [2] BAKA, N. A.; ABU-SIADA, A.; ISLAM, S.; EL-NAGGAR, M. A new technique to measure interfacial tension of transformer oil using uv-vis spectroscopy. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE, v. 22, n. 2, p. 1275–1282, 2015.
- [3] CAPACCIONI, F.; SANCTIS, M. C. D.; FILACCHIONE, G.; PICCIONI, G.; AMMANNITO, E.; TOMMASI, L.; VELTRONI, I. F.; COSI, M.; DEBEI, S.; CALAMAI, L. et al. Vis-nir imaging spectroscopy of mercury's surface: Simbiosys/vihi experiment onboard the bepicolombo mission. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IEEE, v. 48, n. 11, p. 3932–3940, 2010.
- [4] DEVICES, A. AD8630 Zero Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifier. [S.l.]: Datasheet, 2010.
- [5] DIAS, L. da S.; JUNIOR, J. C. da S.; FELÍCIO, A. L. d. 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, IEEE, n. 99, p. 1–8, 2018.

- [6] FREITAS, G. P.; SANTANA, M. V.; SPACEK, A. D.; BILESSIMO, L. D.; JUNIOR, O. H. A.; PEREIRA, T. C. Propose of a low cost integrating sphere. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2016.
- [7] GENTILIN, F. A.; KOBO, B. T.; RIBEIRO, L. de S.; FRANÇA, J. A. de; FELÍCIO, A. L. de S.; FRANÇA, M. B. d. M.; FILHO, D. d. O. T. Development and testing of a hardware platform for measuring instruments based on near-infrared diffuse reflection. *Measurement*, Elsevier, v. 86, p. 14–25, 2016.
- [8] JOHNSON, M. Photodetection and measurement: maximizing performance in optical systems. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2003.
- [9] KELSON, D. D. Optimal techniques in two-dimensional spectroscopy: Background subtraction for the 21st century. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, IOP Publishing, v. 115, n. 808, p. 688, 2003.
- [10] LABSPHERE. Technical Guide: Integrating Sphere Theory and Applications. [S.l.]: Labsphere North Sutton, NH, 2013.
- [11] LAPORTE, M.-F.; PAQUIN, P. Near-infrared analysis of fat, protein, and casein in cow's milk. *Journal of agricultural and Food Chemistry*, ACS Publications, v. 47, n. 7, p. 2600–2605, 1999.
- [12] LOH, J.; WANG, Z.; THOMSON, M. J. Measuring gas temperature in highly particle laden flow using terahertz spectroscopy. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, IEEE, v. 6, n. 4, p. 518–524, 2016.
- [13] MOREIRA, M.; FRANÇA, J. A. de; FILHO, D. de O. T.; BELOTI, V.; YAMADA, A. K.; FRANÇA, M. B. d. 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*, IEEE, v. 16, n. 10, p. 3653–3663, 2016.
- [14] MORGANO, M. A.; FARIA, C. G.; FERRAO, M. F.; BRAGAGNOLO, N.; FERREIRA, M. M. d. C. et al. Determinação de umidade em café cru usando espectroscopia NIR e regressão multivariada. *Food Science and Technology (Campinas)*, Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2008.
- [15] PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian chemical society*, SciELO Brasil, v. 14, n. 2, p. 198–219, 2003.
- [16] PINHEIRO, P. P.; SANTOS, J. C. F. D.; FRANC, A, M. B. D. M. Development, testing, and validation of a prototype for qualification of substances based on near-infrared spectroscopy. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 25650–25659, 2019.
- [17] RIBEIRO, L. de S.; GENTILIN, F. A.; FRANÇA, J. A. de; 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*, IEEE, v. 65, n. 7, p. 1698–1706, 2016.
- [18] SANTANA, Everton J; GERONIMO, Bruna C; MASTELINI, Saulo M; CARVAKHO, Rafael H; BARBIN, Douglas F; IDA, Elza I; BARBON Jr, Sylvio. Predicting poultry meat characteristics using an enhanced multi-target regression method. *Biosystems Engineering*, V. 171, P. 193-201, 2018.
- [19] SCHMILOVITCH, Z.; SHMULEVICH, I.; NOTEA, A.; MALTZ, E. Near infrared spectrometry of milk in its heterogeneous state. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 195–207, 2000.
- [20] SHULEI, W.; XUEGUANG, Y.; YANGAN, Z. Non-invasive blood glucose measurement scheme based on near-infrared spectroscopy. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. [S.l.], 2017. p. s1404.
- [21] SMITH, B. C. Fundamentals of fourier transform infrared spectroscopy. 1996. Florida: CRC Press LLC, 1996.
- [22] SUN, D.-W. Infrared spectroscopy for food quality analysis and control. [S.l.]: Academic Press, 2009.
- [23] TSENKOVA, R.; ATANASSOVA, S.; TOYODA, K.; OZAKI, Y.; ITOH, K.; FEARN, T. Near-infrared spectroscopy for dairy management: measurement of unhomogenized milk composition. *Journal of dairy science*, Elsevier, v. 82, n. 11, p. 2344–2351, 1999.
- [24] WANG, X.; XUE, L.; HE, X.; LIU, M. Vitamin c content estimation of chillies using vis/nir spectroscopy. In: IEEE. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering. [S.l.], 2011. p. 1894–1897.
- [25] WILSON, R. H. Spectroscopic techniques for food analysis. 1994



Rafael Loni Martins received the B.S. degree in electrical engineering from the State University of Londrina, Londrina, Brazil, in 2018, where he is currently pursuing the M.S. degree.

His current research interests include near infrared spectroscopy and electronic instrumentation.



Alex Lemes Guedes received the B.S. and M.S. degree in electrical engineering from the State University of Londrina, Londrina, Brazil, in 2010 and 2013, respectively, where he is currently pursuing the D.S. degree.

He is currently a Professor and researcher in the Laboratory of Automation and Development, at Federal University of Technology – Paraná State, Medianeira, Brazil. His current research interests includes ultrasonic anemometer, industrial automation, near infrared spectroscopy and electronic instrumen-

tation.



Ana Lúcia de Souza Madureira Felício received the B.S. and M.S. degrees in chemistry from the State University of Londrina, Londrina, Brazil, in 2008 and 2011, respectively.

Her current research interests include near infrared spectroscopy.



José Alexandre de França received the bachelor's and master's degrees in electrical engineering from the Federal University of Campina Grande, Campina Grande, Brazil, in 1995 and 1997, respectively, and the Ph.D. degree in electrical engineering from the Federal University of Santa Catarina, Santa Catarina, Brazil, in 2005.

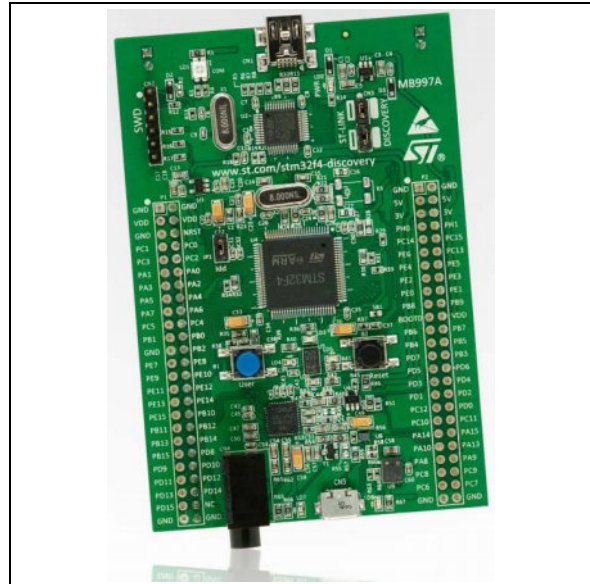
He is currently a Professor and the Leader with the Laboratory of Automation and Intelligent Instrumentation, State University of Londrina, Londrina, Brazil. His current research interests include

ultrasonic anemometers, soil moisture sensors, near infrared spectroscopy, electronic instrumentation, precision agriculture, and calibration of cameras and computer vision.

Anexo A - Datasheet
STM32F4DISCOVERY

Features

- STM32F407VGT6 microcontroller featuring 32-bit ARM® Cortex®-M4 with FPU core, 1-Mbyte Flash memory, 192-Kbyte RAM in an LQFP100 package
- On-board ST-LINK/V2 on STM32F4DISCOVERY (old reference) or ST-LINK/V2-A on STM32F407G-DISC1 (new order code)
- USB ST-LINK with re-enumeration capability and three different interfaces:
 - Debug port
 - Virtual Com port (with new order code only)
 - Mass storage (with new order code only)
- Board power supply: through USB bus or from an external 5 V supply voltage
- External application power supply: 3 V and 5 V
- LIS302DL or LIS3DSH ST MEMS 3-axis accelerometer
- MP45DT02 ST-MEMS audio sensor omni-directional digital microphone
- CS43L22 audio DAC with integrated class D speaker driver
- Eight LEDs:
 - LD1 (red/green) for USB communication
 - LD2 (red) for 3.3 V power on
 - Four user LEDs, LD3 (orange), LD4 (green), LD5 (red) and LD6 (blue)
 - 2 USB OTG LEDs LD7 (green) VBUS and LD8 (red) over-current
- Two push-buttons (user and reset)
- USB OTG FS with micro-AB connector
- Extension header for all LQFP100 I/Os for quick connection to prototyping board and easy probing
- Comprehensive free software including a variety of examples, part of STM32CubeF4 package or STSW-STM32068 to use legacy standard libraries.



1. Picture is not contractual.

Description

The STM32F4DISCOVERY kit leverages the capabilities of the STM32F407 high performance microcontrollers, to allow users to easily develop applications featuring audio.

It includes an ST-LINK embedded debug tool, one ST-MEMS digital accelerometer, a digital microphone, one audio DAC with integrated class D speaker driver, LEDs, push-buttons and an USB OTG micro-AB connector.

To expand the functionality of the STM32F4DISCOVERY kit with ethernet connectivity, LCD display and more, visit the www.st.com/stm32f4dis-expansion webpage.

With the latest board enhancement, the new order code STM32F407G-DISC1 has replaced the old reference STM32F4DISCOVERY.

**Anexo B - *Datasheet* do amplificador
OPA1662**



SoundPlus™ Low-Power, Low Noise and Distortion, Bipolar-Input AUDIO OPERATIONAL AMPLIFIERS

Check for Samples: [OPA1662](#), [OPA1664](#)

FEATURES

- **Low Noise:** 3.3 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz
- **Low Distortion:** 0.00006% at 1 kHz
- **Low Quiescent Current:**
1.5 mA per Channel
- **Slew Rate:** 17 V/ μs
- **Wide Gain Bandwidth:** 22 MHz (G = +1)
- **Unity Gain Stable**
- **Rail-to-Rail Output**
- **Wide Supply Range:**
 ± 1.5 V to ± 18 V, or +3 V to +36 V
- **Dual and Quad Versions Available**
- **Small Package Sizes:**
Dual: SO-8 and MSOP-8
Quad: SO-14 and TSSOP-14

APPLICATIONS

- **USB and Firewire Audio Systems**
- **Analog and Digital Mixers**
- **Portable Recording Systems**
- **Audio Effects Processors**
- **High-End A/V Receivers**
- **High-End DVD and Blu-Ray™ Players**
- **HIGH-End Car Audio**

DESCRIPTION

The OPA1662 (dual) and OPA1664 (quad) series of bipolar-input operational amplifiers achieve a low 3.3 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ noise density with an ultralow distortion of 0.00006% at 1 kHz. The OPA1662 and OPA1664 series of op amps offer rail-to-rail output swing to within 600 mV with 2-k Ω load, which increases headroom and maximizes dynamic range. These devices also have a high output drive capability of ± 30 mA.

These devices operate over a very wide supply range of ± 1.5 V to ± 18 V, or +3 V to +36 V, on only 1.5 mA of supply current per channel. The OPA1662 and OPA1664 op amps are unity-gain stable and provide excellent dynamic behavior over a wide range of load conditions.

These devices also feature completely independent circuitry for lowest crosstalk and freedom from interactions between channels, even when overdriven or overloaded.

The OPA1662 and OPA1664 are specified from -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

SoundPlus is a trademark of Texas Instruments Incorporated.

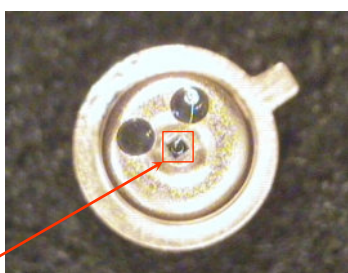
Blu-Ray is a trademark of Blu-Ray Disc Association.

All other trademarks are the property of their respective owners.

**Anexo C - *Datasheet* do fotodiodo
PD24-03**

Features

- High reliability
- Superior linearity
- Easy-to-use detector/amplifier modules are also available



Photodiode CHIP

Description

Photodiode **PD24-03** is a model of [photodetector](#) for detection of radiation at room temperature in the Middle Infrared (Mid-IR) spectral range from 1150 to 2400 nm.

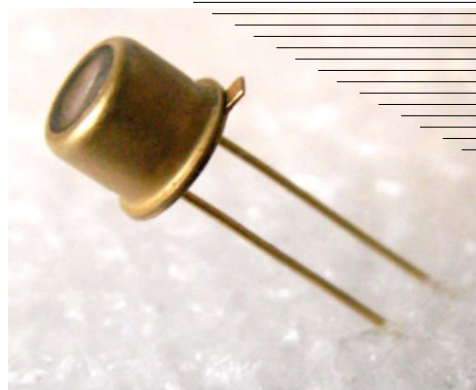
Photodiode chip is disposed inside the standard 5.5 mm TO-18 package.

Diameter of the photosensitive area of **PD24-03** is 300 μm . High speed of response makes it possible for detection of modulated radiation of laser diodes (LDs) and light-emitting diodes (LEDs).

Related products: **PD24-03** can be used in optical pair with our [LED11...LED23](#) and [LD200...LD230](#).

General characteristics

| Package | Parameter | Symbol | Value | Unit |
|---------|------------------------------|------------------|--------------|------|
| TO-18 | Sensitive area diameter | d | 0.3 | mm |
| | Weight | m | 0.26 | g |
| | Operating temperature | T _{opr} | - 200...+ 60 | °C |
| | Window material | | glass | |
| | Soldering temperature | T _s | + 230 | °C |
| | Storage temperature | T _{stg} | - 55...+ 70 | °C |
| | Maximum reverse bias voltage | V | - 2.0 | V |
| | Size | | D | 5.5 |
| | | H | 17.7 | |



Applications

- Environment measurements
- Infrared spectrophotometry
- Laser detection
- Analytical instruments

Accessories (optional)

- [Amplifier AM-07M](#)

Anexo D - *Datasheet* da tensão de referência LT1461

Micropower Precision Low Dropout Series Voltage Reference Family

FEATURES

- Trimmed to High Accuracy: 0.04% Max
- Low Drift: 3ppm/°C Max
- Low Supply Current: 50µA Max
- High Output Current: 50mA Min
- Low Dropout Voltage: 300mV Max
- Excellent Thermal Regulation
- Power Shutdown
- Thermal Limiting
- All Parts Guaranteed Functional from -40°C to 125°C
- Voltage Options: 2.5V, 3V, 3.3V, 4.096V and 5V
- AEC-Q100 Qualified for Automotive Applications

APPLICATIONS

- A/D and D/A Converters
- Precision Regulators
- Handheld Instruments
- Power Supplies

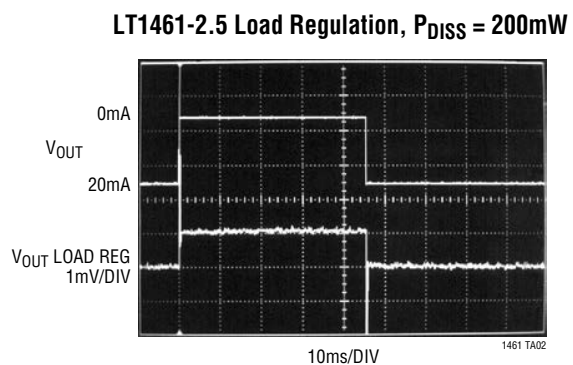
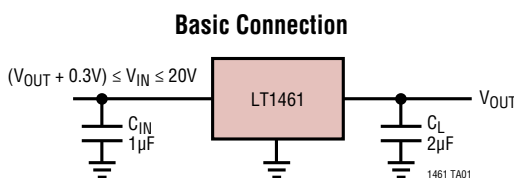
DESCRIPTION

The LT[®]1461 is a family of low dropout micropower band-gap references that combine very high accuracy and low drift with low supply current and high output drive. These series references use advanced curvature compensation techniques to obtain low temperature coefficient and trimmed precision thin-film resistors to achieve high output accuracy. The LT1461 family draws only 35µA of supply current, making them ideal for low power and portable applications, however their high 50mA output drive makes them suitable for higher power requirements, such as precision regulators.

In low power applications, a dropout voltage of less than 300mV ensures maximum battery life while maintaining full reference performance. Line regulation is nearly immeasurable, while the exceedingly good load and thermal regulation will not add significantly to system error budgets. The shutdown feature can be used to switch full load currents and can be used for system power down. Thermal shutdown protects the part from overload conditions. The LT1461 is available in 2.5V, 3V, 3.3V 4.096V and 5V options.

All registered trademarks and trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION



**Anexo E - *Datasheet* do amplificador
AD8630**

FEATURES

- Lowest auto-zero amplifier noise
- Low offset voltage: 1 μV
- Input offset drift: 0.002 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Rail-to-rail input and output swing
- 5 V single-supply operation
- High gain, CMRR, and PSRR: 130 dB
- Very low input bias current: 100 pA maximum
- Low supply current: 1.0 mA
- Overload recovery time: 50 μs
- No external components required
- Qualified for automotive applications

APPLICATIONS

- Automotive sensors
- Pressure and position sensors
- Strain gage amplifiers
- Medical instrumentation
- Thermocouple amplifiers
- Precision current sensing
- Photodiode amplifiers

GENERAL DESCRIPTION

This amplifier has ultralow offset, drift, and bias current. The [AD8628/AD8629/AD8630](#) are wide bandwidth auto-zero amplifiers featuring rail-to-rail input and output swing and low noise. Operation is fully specified from 2.7 V to 5 V single supply ($\pm 1.35\text{ V}$ to $\pm 2.5\text{ V}$ dual supply).

The [AD8628/AD8629/AD8630](#) provide benefits previously found only in expensive auto-zeroing or chopper-stabilized amplifiers. Using Analog Devices, Inc., topology, these zero-drift amplifiers combine low cost with high accuracy and low noise. No external capacitor is required. In addition, the [AD8628/AD8629/AD8630](#) greatly reduce the digital switching noise found in most chopper-stabilized amplifiers.

With an offset voltage of only 1 μV , drift of less than 0.005 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, and noise of only 0.5 μV p-p (0 Hz to 10 Hz), the [AD8628/AD8629/AD8630](#) are suited for applications where error sources cannot be tolerated. Position and pressure sensors, medical equipment, and strain gage amplifiers benefit greatly from nearly zero drift over their operating temperature range. Many systems can take advantage of the rail-to-rail input and output swings provided by the [AD8628/AD8629/AD8630](#) to reduce input biasing complexity and maximize SNR.

Rev. K

[Document Feedback](#)

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

PIN CONFIGURATIONS

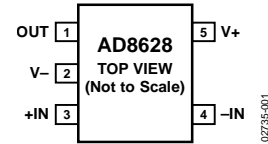


Figure 1. 5-Lead TSOT (UJ-5) and 5-Lead SOT-23 (RJ-5)

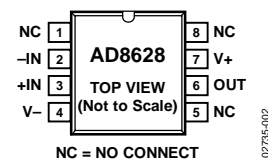


Figure 2. 8-Lead SOIC_N (R-8)

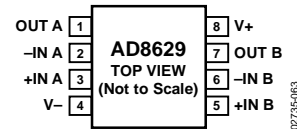


Figure 3. 8-Lead SOIC_N (R-8) and 8-Lead MSOP (RM-8)

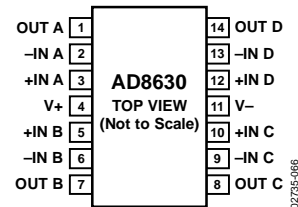


Figure 4. 14-Lead SOIC_N (R-14) and 14-Lead TSSOP (RU-14)

The [AD8628/AD8629/AD8630](#) are specified for the extended industrial temperature range (-40°C to $+125^\circ\text{C}$). The [AD8628](#) is available in tiny 5-lead TSOT, 5-lead SOT-23, and 8-lead narrow SOIC plastic packages. The [AD8629](#) is available in the standard 8-lead narrow SOIC and MSOP plastic packages. The [AD8630](#) quad amplifier is available in 14-lead narrow SOIC and 14-lead TSSOP plastic packages. See the Ordering Guide for automotive grades.