



**UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO**



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Eletrônica e Sistemas



Graduação em Engenharia Eletrônica

Brianne Paola Mochel Moreira

**Projeto de Sistema de Monitoramento de
Densidade de Eletrólito de Baterias de
Chumbo-Ácido Baseado em Fibras Ópticas
Heteronúcleo**

Recife

2024

Brianne Paola Mochel Moreira

**Projeto de Sistema de Monitoramento de
Densidade de Eletrólito de Baterias de
Chumbo-Ácido Baseado em Fibras Ópticas
Heteronúcleo**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a): Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, Ph.D.

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Moreira, Brianne Paola Mochel.

Projeto de Sistema de Monitoramento de Densidade de Eletrólito de Baterias de Chumbo-Ácido Baseado em Fibras Ópticas Heteronúcleo / Brianne Paola Mochel Moreira. - Recife, 2024.

92 p. : il., tab.

Orientador(a): Joaquim Ferreira Martins Filho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Eletrônica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. sensores. 2. fibra óptica heteronúcleo. 3. densidade de eletrólito. 4. sistema de armazenamento de energia de bateria. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Brianne Paola Mochel Moreira

Projeto de Sistema de Monitoramento de Densidade de Eletrólito de Baterias de Chumbo-Ácido Baseado em Fibras Ópticas Heteronúcleo

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica e Sistemas, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 21/03/2024

Banca Examinadora

Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Leonardo Didier Coelho, Ph.D.
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Saulo Oliveira Dornellas Luiz, D.Sc.
Universidade Federal de Pernambuco

*A sequência ordenada de
capítulos parece sempre disfarçar
os rumos muitas vezes
inesperados e sinuosos de uma
pesquisa. Fatigante também é a
posição daqueles que convivem
com as oscilações de um trabalho
assim. A todos eles, dedico este
trabalho.*

Agradecimentos

Conceitualmente, esta página - que aparece no início - seria a última e, talvez, a mais difícil de ser escrita. Colocar um ponto final no trabalho, para além de prática gramatical ou de indicar o término de uma fase, revela o início de outra.

Um trabalho de conclusão de curso dificilmente irá codificar toda a vivência de uma graduação. Isto porque essa vivência vai muito além dos conhecimentos adquiridos, é também sobre consolidação de valores e experiências. Devo admitir que, foi na graduação, que eu compreendi - de fato - o que é ser filha. Dispensar qualquer tentativa de aqui descrever o apoio recebido pela minha mãe, Angela Mochel, pois certamente falhariam em representá-lo. Me atenho a agradecer por todas as formas de amor expressadas das mais diferentes maneiras e dizer o quanto admiro sua força envolta por uma delicadeza sem igual. E por falar em força, como não mencionar minha avó, Ercilia Mochel, que, além de exemplo de caráter, também exerceu seu cuidado, embalado por boas risadas e música.

Agradeço imensamente ao Prof. Joaquim M. Ferreira, pela orientação, por dividir seu conhecimento e por ser tão solícito, estando sempre disposto à escuta e discussão sobre cada passo desse trabalho. Esse posicionamento fez toda a diferença.

Ao Dr. Walter Margulis, pelos ensinamentos transmitidos através de um astral singular e pela disponibilização das fibras sem núcleo utilizadas neste trabalho.

Ao Prof. Anderson S. L. Gomes, pela orientação e colaboração nas atividades de divulgação científica exercidas através da SPIE, foram extremamente enriquecedoras e importantes para mim.

A João Paulo Fernandes Barbosa, pela oportunidade de trabalhar no ITEM, por habilitar muitos aprendizados e pelo apoio e incentivo a este trabalho.

Aos meus colegas do Programa Digital - ITEM, pelo incentivo e por tornarem o dia a dia mais leve.

Aos funcionários do ITEM envolvidos no projeto “Sensores à fibra óptica para o monitoramento de baterias de chumbo-ácido aplicadas em sistemas de armazena-

mento de energia”, pelas amostras de eletrólito fornecidas e pela disponibilidade em prestar eventuais esclarecimentos.

A Hebio Oliveira pelo suporte inicial e Thales Castro pelo suporte final.

Aos meus valiosos amigos - Amanda Câmara, Gabriel Carlini, Gil Aciolly, Hugo Belfort, João Vítor Sgotti, Leonardo Peregrino, Pedro Ishimaru etc - pelas trocas sinceras e afetuosas.

Por fim, sou muito grata pelo crescimento que tive ao longo desse trabalho (o processo é imperfeito e limitado, porém genuíno).

*"[...] essa planta frágil da
curiosidade científica necessita,
além de estímulo, especialmente de
liberdade; sem ela, fenece e morre."*

Albert Einstein

*"Seja regular e ordenado em sua
vida para ser violento e original em
seu trabalho."*

Gustave Flaubert

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Eletrônica e Sistemas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica(Eng.)

Projeto de Sistema de Monitoramento de Densidade de Eletrólito de Baterias de Chumbo-Ácido Baseado em Fibras Ópticas Heteronúcleo

Brianne Paola Mochel Moreira

Dois dispositivos heteronúcleo, nas configurações MSM (*Multimode-Single mode-Multimode*) e MNM (*Multimode-No core fiber-Multimode*), são investigados como transdutores para detectar densidade de eletrólito na faixa de $1100 \text{ g/L} < \rho < 1290 \text{ g/L}$ (com índices de refração $1.3545 < n < 1.3840$) utilizando-se uma fonte de luz centrada em $\lambda = 1550 \text{ nm}$ e fotodetector. Para os comprimentos de trecho heteronúcleo estudados, o dispositivo MNM apresentou uma sensibilidade absoluta 446% superior ao dispositivo MSM, além de maior estabilidade. O sensoramento da densidade de eletrólito, além de permitir um gerenciamento eficaz do fenômeno da estratificação em uma bateria chumbo-ácido, possui grande potencial de viabilizar o cálculo do SoC (*State of Charge*) e análises que possibilitem a identificação precoce de falhas e otimização de estratégias de gerenciamento da bateria. Adicionalmente, o trabalho também aborda uma arquitetura de sistema de monitoramento de densidade de eletrólito que pode ser integrada a um BESS (*Battery Energy Storage System*).

Palavras-chave: sensores; fibra óptica heteronúcleo; densidade de eletrólito; sistema de armazenamento de energia de bateria.

Abstract of Course Conclusion Work, presented to Departament of Eletronic and Systems, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Electronic Engineering(Eng.)

Electrolyte Density Monitoring System Based on Hetero-core Optical Fibers in Lead-Acid Batteries Project

Brianne Paola Mochel Moreira

A MSM (Multimode-Single mode-Multimode) and a MNM (Multimode-No core fiber-Multimode) hetero-core devices are investigated as transducers for sensing electrolyte density at a range of $1100 \text{ g/L} < \rho < 1290 \text{ g/L}$ (refractive indexes varying $1.3545 < n < 1.3840$) using a light source centered at $\lambda = 1550 \text{ nm}$ and a photo-detector. For the hetero-core lengths studied, the MNM device showed an absolute sensitivity 446% higher than the MSM device and better stability. The electrolyte density sensing, beyond allows an effective management of the stratification in lead-acid batteries, also has a great potential to enable SoC (State of Charge) estimation and further analyses which can permit early identification of faults and optimization of battery management strategies. Additionally, the work also propose an electrolyte density monitoring system architecture for lead-acid batteries which can be integrated into a BESS (Battery Energy Storage System).

Keywords: sensors; hetero-core optical fiber; electrolyte density; battery energy storage system.

Lista de Figuras

2.1	Esquemático de Bateria Chumbo-Ácido	30
2.2	Influência da Concentração do Eletrólito na Bateria Chumbo-Ácido .	31
2.3	Esquemático de Dispositivo Heteronúcleo SMS	33
2.4	Esquemático de Dispositivo Heteronúcleo MSM	33
2.5	Esquemático de Dispositivo Heteronúcleo MNM	33
3.1	Metodologia geral do trabalho	41
3.2	Fluxo do <i>V Model</i>	43
3.3	Espectros de Transmissão para Dispositivos Heteronúcleo $L=30$ cm .	46
3.4	Delineamento de Pesquisa	48
3.5	Sintonização do Dispositivo Heteronúcleo	49
4.1	Arquitetura do Sistema	53
4.2	Caracterização de Amostras de Eletrólito	56
4.3	Índice de Refração do Eletrólito	57
4.4	Espectro de Transmissão Dispositivo Heteronúcleo MSM	58
4.5	Espectro de Transmissão Dispositivo Heteronúcleo MSM com Varia- ção de Densidade de Eletrólito	58
4.6	Potência Óptica em 1550nm para Dispositivo Heteronúcleo MSM com Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)	59
4.7	Potência Óptica para Dispositivo Heteronúcleo MSM com Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetector)	59
4.8	Espectro de Transmissão Dispositivo Heteronúcleo MNM	60

4.9	Espectro de Transmissão Dispositivo Heteronúcleo MNM com Variação de Densidade de Eletrólito	61
4.10	Potência Óptica em 1550nm para Dispositivo Heteronúcleo MNM com Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)	61
4.11	Potência Óptica para Dispositivo Heteronúcleo MSM com Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetector)	62
B.1	Fluxo da Caracterização de Eletrólito	77
C.1	Indicação do <i>v-groove</i> no clivador	79
C.2	Posicionamento das fibras no <i>splicer</i>	80
C.3	Posicionamento da Fibra na Clivagem da Segunda Extremidade da Fibra NCF	81
C.4	Posicionamento da Fibra na Clivagem da Segunda Extremidade da Fibra Heteronúcleo	82
D.1	Fluxo do Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)	84
D.2	Montagem experimental do Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)	86
E.1	Fluxo do Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetector)	89
E.2	Montagem experimental do Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetector)	91

Lista de Tabelas

1.1	Principais soluções desenvolvidas para medição de densidade de eletrólito	23
4.1	Parâmetros obtidos para dispositivos heteronúcleo	62
4.2	Comprimentos de onda da potência mínima	63

Lista de Abreviaturas

BESS	 <i>Battery Energy Storage System</i>
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ITEMM	Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura
MMF	 <i>Multimode Fiber</i>
NCF	 <i>No Core Fiber</i>
OSA	 <i>Optical Spectrum Analyzer</i>
OSI	 <i>Open Systems Interconnection</i>
PS	Parte Sensora
SMF	 <i>Single Mode Fiber</i>
SoC	 <i>State of Charge</i>
SoH	 <i>State of Health</i>

Lista de Símbolos

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Campo elétrico	E	V/m
Campo magnético	H	T
Coefficiente de determinação	R^2	
Comprimento de onda	λ	nm
Comprimento do trecho heteronúcleo	L	mm
Constante de propagação	β	rad/m
Desvio padrão	σ	dBm
Densidade do eletrólito	ρ	g/L
Frequência angular	ω	rad/s
Índice de refração	n	
Número de onda angular	k	rad/m
Perda de inserção	PI	dB
Permeabilidade magnética no vácuo	μ_0	A/m
Permissividade elétrica no vácuo	ϵ_0	F/m
Potência óptica	P_o	dBm
Relação Sinal Ruído	SNR	dB
Sensibilidade	S	dBm/(g/L)
Temperatura	T	°C
Tensão	v	V
Velocidade da luz no vácuo	c	m/s

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Problematização	19
1.1.1	Estratificação	20
1.1.2	Problema	22
1.1.3	Contexto	26
1.1.4	Propósito e Relevância	27
1.2	Visão e Escopo	28
1.2.1	Visão	28
1.2.2	Escopo	28
1.3	Objetivo Geral	28
1.3.1	Objetivos Específicos	28
2	Fundamentação Teórica	29
2.1	Eletrólito Ácido Sulfúrico	29
2.2	Fibras Heteronúcleo	32
2.2.1	Exemplos	37
3	Métodos	40
3.1	Sistema Proposto	42
3.2	O Sensor	44
3.2.1	Definição da Configuração e dos Parâmetros do Transdutor . .	44
3.2.2	Caracterização das Amostras de Eletrólito	46
3.2.3	Delineamento de Pesquisa	47

	16
3.2.4	Caracterização Experimental do Sensor 47
3.2.5	Análise dos Resultados 49
4	Resultados 51
4.1	Sistema Proposto 51
4.1.1	Arquitetura do Sistema 52
4.2	O Sensor 56
4.2.1	Caracterização das Amostras de Eletrólito 56
4.2.2	Dispositivo Heteronúcleo MSM 57
4.2.3	Dispositivo Heteronúcleo MNM 60
4.2.4	Análise 62
4.2.5	Proposta de Calibração do Sensor 64
5	Considerações Finais 65
5.1	Conclusão 65
5.2	Dificuldades Encontradas 65
5.3	Contribuições do Trabalho 66
5.4	Trabalhos Futuros 66
Referências	68
Apêndices	73
A	Especificação de Requisitos 74
A.1	Descrição Geral 74
A.1.1	Ambiente de Operação 74
A.1.2	Restrições de Design e Implementação 74
A.2	Principais <i>Features</i> 75
A.3	Requisitos de Interface Externa 75
B	Caracterização das Amostras de Eletrólito 76
B.1	Materiais 76

B.2	Método	77
C	Fabricação do Dispositivo Heteronúcleo	78
C.1	Materiais	78
C.2	Método	79
D	Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)	83
D.1	Materiais	83
D.2	Método	84
D.3	Montagem Experimental	86
E	Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetector)	87
E.1	Materiais	87
E.2	Método	89
E.3	Montagem Experimental	91

Capítulo 1

Introdução

GRANDES desafios são enfrentados pela comunidade dedicada a pesquisas em baterias. A busca por tecnologias de armazenamento de energia de larga escala e economicamente viáveis com maior densidade de energia, mais sustentáveis, seguras e confiáveis é justificada pela ampla gama de aplicações das baterias recarregáveis (Amici et al., 2022), especialmente pelo papel que desempenham no armazenamento de energia originada de fontes renováveis. Apesar de mais limpa e segura, a geração de energia oriunda de fontes renováveis depende fortemente das condições climáticas, o que resulta em um fornecimento irregular de energia. Desta forma, sistemas de armazenamento possuem grande potencial de viabilizar o fornecimento de energia proveniente de tais fontes. Dentro destes sistemas¹, baterias - formas de armazenamento de energia eletroquímica - destacam-se por, geralmente, apresentar mais eficiência, relativa facilidade em sua instalação e compacticidade (Raijmakers, 2018; Oliveira, 2022a).

Na abordagem do desenvolvimento das futuras tecnologias, destacam-se 3 áreas de pesquisa: **descoberta e otimização de materiais** que compõem baterias, interfaces e células; **integração de funcionalidades inteligentes** e a **incorporação de conceitos de economia circular e sustentabilidade** através de considerações sobre manufatura e reciclagem (Amici et al., 2022).

¹Outras formas de armazenamento de energia podem ser de energia térmica, energia cinética, energia potencial, energia termoquímica e energia química.

A integração de funcionalidades inteligentes, através de sensoriamento e funcionalidades de auto recuperação, busca lidar com o processo degenerativo ao qual as baterias estão submetidas, especialmente se operam em condições de uso ou ambientais extremas, além de aumentar segurança, confiabilidade e ciclo de vida útil das baterias. Frutos dos desenvolvimento de tais funcionalidades seriam baterias com tempo de vida útil previsível e estado de saúde (do inglês, *State of Health* (SoH)), estado de carga (do inglês, *State of Charge* (SoC)), segurança e histórico de uso bem documentados. Em particular, o sensoriamento inteligente de baterias em operação, através do monitoramento de parâmetros chave em tempo real e sem afetar seu funcionamento, pode vir a habilitar o diagnóstico precoce de falhas e reações que aceleram o envelhecimento das baterias (Amici et al., 2022), contribuindo para a minimização do impacto ambiental do uso de tais baterias, a qual depende diretamente da maximização da qualidade, confiabilidade, longevidade e segurança das mesmas (Huang et al., 2022). Além disso, o conhecimento de dados - mecânicos, térmicos e químicos - das baterias, a longo prazo, pode vir a habilitar novas estratégias de uso pelos seus dispositivos juntamente com o estabelecimento de margens de segurança confiáveis para operação das mesmas (Huang et al., 2022).

1.1 Problematização

A escolha do tipo de bateria a ser utilizada em determinado sistema depende diretamente da aplicação. Tendo em vista as principais vantagens das baterias de chumbo-ácido (Linden e Reddy, 1995):

- baixo custo - possibilidade de manufatura local ou global em diferentes escalas;
- disponíveis em grande quantidade e com uma variedade de tamanhos e *designs*;
- bom desempenho de descarga e térmico;
- eletricamente eficientes;
- alta tensão de célula;

- fácil indicação de SoC;
- possibilidade de boa retenção de carga para aplicações de carga intermitente;
- fácil reciclabilidade dos componentes das células.

E suas principais desvantagens (Linden e Reddy, 1995):

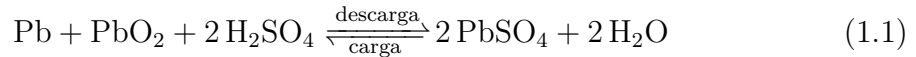
- baixo número de ciclos durante vida útil;(geralmente 50-500 ciclos)
- densidade de energia limitada;
- possibilidade de polarização irreversível dos eletrodos quando armazenadas por longo tempo em condições de descarga;
- dificuldade de fabricação em tamanhos muito pequenos;
- possibilidade de risco de explosão, devido à evolução de hidrogênio, em alguns *designs*, exigindo a instalação de corta-chamas;
- possibilidade de apresentar riscos à saúde devido a presença de certas substâncias em alguns *designs*;
- possibilidade de avalanches térmicas em baterias ou equipamentos de carregamento mal projetados.

Entende-se que baterias de chumbo-ácido apresentam grande competitividade em aplicações estáticas, destacando-se por fatores como segurança, custo e reciclabilidade.

1.1.1 Estratificação

A estratificação é entendida como o desenvolvimento de um gradiente vertical da densidade do ácido sulfúrico presente no eletrólito de uma bateria chumbo-ácido (Pavlov, 2011). Sendo a densidade dependente da pressão e da geometria, composição e porosidade dos eletrodos, a estratificação também é fortemente influenciada pela distribuição de densidade de corrente nos eletrodos (Alavyoon et al., 1991), a

qual também sofre influência da temperatura (Ebner et al., 2013). Desta forma, a movimentação do eletrólito durante os processos de carga e descarga é determinada pela forma como tais processos são realizados e pelo tipo de eletrodo² (Alavyoon et al., 1991). É conhecido que a estratificação surge durante o processo de descarga e se intensifica durante o processo de carga (Pavlov, 2011). As reações de carga e descarga dos eletrodos são sintetizadas na equação (1.1) (Linden e Reddy, 1995):



Resumidamente, durante o processo de descarga, ácido sulfúrico é consumido e água é produzida, de forma que o ácido diluído próximo a superfície dos eletrodos eleva-se enquanto o ácido mais concentrado deposita-se no fundo devido à ação da gravidade. No processo de carga, o ácido sulfúrico produzido próximo à superfície dos eletrodos também deposita-se no fundo na bateria (Alavyoon et al., 1991; Pavlov, 2011). Nota-se que a estratificação não é uma variação progressiva ao longo do eixo vertical da bateria, sendo um fenômeno caracterizado pelo aumento localizado de concentração de eletrólito no fundo da bateria. (Apăteanu et al., 1993).

Sendo o eletrólito um material ativo, a estratificação afeta diretamente a capacidade da célula, podendo limitar a aceitação de carga, descarga e vida útil da bateria através da distribuição heterogênea vertical de corrente (Linden e Reddy, 1995; Takamatsu et al., 2020). A estratificação também pode causar diferentes processos de sulfatação e passivação a depender das condições de operação (Guo et al., 2006). Apesar da tendência de desaparecimento da estratificação nos últimos ciclos de vida da baterias³, a queda no desempenho pode continuar até o fim da vida útil da célula (Apăteanu et al., 1993).

Dada a criticidade deste fenômeno, várias iniciativas de minimizá-lo foram realizadas, a exemplo da circulação ou agitação de eletrólito, tecnologia gel e através da presença de aditivos no eletrólito (Guo et al., 2006). O método mais consoli-

²Sabe-se que a taxa de produção de ácido sulfúrico do eletrodo positivo é superior à taxa do eletrodo negativo (Alavyoon et al., 1991).

³Devido a gaseificação extra decorrente da redução da capacidade da bateria.

dato consiste em deliberadamente provocar a formação de gases através de uma sobrecarga. Esta técnica, entretanto, se aplicada de forma descontrolada, pode intensificar a estratificação ou diminuir a vida útil da bateria.

A compreensão da evolução da estratificação durante a operação das baterias torna-se relevante para alcançar a otimização da operação e do projeto das baterias de chumbo-ácido (Takamatsu et al., 2020).

1.1.2 Problema

O problema a ser abordado neste trabalho consiste em monitorar o processo de estratificação durante cargas e descargas através da **medição da densidade de eletrólito em 3 níveis distintos de uma bateria chumbo-ácido** de forma automática para identificação do momento adequado de aplicação de alguma técnica de minimização da estratificação, como uma sobrecarga, durante a operação da bateria.

Dada a relevância da estratificação para o funcionamento das baterias chumbo-ácido⁴, diversos estudos experimentais envolvendo a medição da densidade de eletrólito nestas baterias foram conduzidos ao longo dos anos. Além de medições diretas - através de hidrômetros ou densímetros -, muitos estudos do processo de estratificação, por exemplo, aplicam técnicas ópticas interferométricas - como o uso do interferômetro Mach-Zender e interferometria holográfica - e imagens de raios X por contraste de fase (Alavyoon et al., 1991 ; Takamatsu et al., 2020) devido à proporcionalidade entre a concentração do eletrólito e seu índice de refração (Alavyoon et al., 1991). Também há sensores que funcionam como microcélulas de chumbo-ácido, sendo fabricados como eletrodos (Guo, 2005) ou como fios isolados (Schulte et al., 2013) e baseiam-se na leitura do potencial - o qual depende da concentração de ácido sulfúrico.

⁴Para alguns autores, o ponto de interesse da medição da densidade do eletrólito concentra-se na estimativa do SoC, uma vez que a capacidade residual da bateria limita a sua disponibilização de energia. Para cálculo do SoC, existem métodos que utilizam determinadas propriedades elétricas como indicadoras - juntamente com abordagens estatísticas e que ainda não consideram o gradiente de temperatura interno da bateria (Huang et al., 2022) - e há métodos que utilizam a concentração de eletrólito, sendo estes últimos mais confiáveis (Guo, 2005).

Para baterias em geral, o crescimento pelo interesse em métodos de monitoramento de diversos parâmetros baseados em fibras ópticas é justificado pelas capacidades de detectarem múltiplos parâmetros, apresentarem alta velocidade, sensibilidade e robustez para operar em ambientes hostis, não interferirem na operação das baterias (Han et al., 2021) ou sofrerem interferência eletromagnética e apresentarem fácil integração à bateria (Oliveira, 2022a). Geralmente, os principais métodos de medição por fibras ópticas baseiam-se em interferometria, onda evanescente, fotoluminescência, espalhamento ou grade de Bragg (Han et al., 2021).

A Tabela 1.1 apresenta algumas vantagens e desvantagens das principais soluções encontradas na literatura e utilizadas em aplicações reais para baterias de chumbo-ácido.

Tabela 1.1: Principais soluções desenvolvidas para medição de densidade de eletrólito

Sensor	Vantagens	Desvantagens
Hidrômetro e picnômetro	Baixo custo	Maior susceptibilidade a erros de leitura, impossibilidade de medições automáticas, exige manuseio durante medição, o intervalo de medição depende do tamanho do instrumento, impossibilidade de medir diferentes níveis simultaneamente.

Densímetro digital	Alta resolução, acurácia e robustez, bom intervalo de leitura de densidade.	Alto custo (valores dos modelos portáteis podem variar entre R\$ 15.000 a R\$ 33.000) ⁵ , dificuldades ou impossibilidade de medições automáticas, exige manuseio durante medição (caso portátil), dificuldades ou impossibilidade de se utilizar fora de um laboratório ou indústria (caso bancada), impossibilidade de medir diferente níveis simultaneamente.
Sensor micro-célula (Guo, 2005)	Média complexidade de fabricação, permite automação das medições, permite medições durante operação da bateria.	Necessidade de recarga dos eletrodos, dificuldade ou impossibilidade de medir diferente níveis simultaneamente, medição do potencial misto.

⁵Preços de densímetros digitais consultados em janeiro de 2024 no [site oficial](#) da Anton Paar®.

Sensor micro-célula (Schulte et al., 2013)	Baixa complexidade de fabricação, possibilidade de medir diferentes níveis simultaneamente, permite automação das medições, permite medições durante operação da bateria.	Necessidade de recarga dos eletrodos - em que o sensor não pode ser utilizado -, desconsideração do potencial misto - causado pela autodescarga do sensor-formado no cálculo da densidade, recorrência de uma sobretensão após a recarga - a qual deve cair antes da medição ser realizada ⁶ , pequena queda de tensão devido a autodescarga do sensor implica em erros na medição.
Sensor de fibra óptica interferométrico <i>U-shaped</i> (Cao-Paz et al., 2010)	Baixo custo, média complexidade de fabricação, permite automação das medições, permite medições durante operação da bateria, boa acurácia.	Necessita de peças mecânicas desenvolvidas sob medida, impossibilidade ou dificuldades de medições em níveis inferiores da bateria (necessidade de adaptações mecânicas), consideravelmente sensível a variações de temperatura (necessidade de correções via <i>hardware</i> ou <i>software</i>).
Sensor de fibra óptica refratométrico (Patil et al., 2014)	Permite automação das medições, boa sensibilidade, permite medições durante operação da bateria.	Alta complexidade de fabricação, dificuldade ou impossibilidade de medir diferentes níveis simultaneamente, cálculos envolvem significativas suposições.

⁶O tempo de decaimento depende do sensor e da densidade de eletrólito.

Sensor de raio X por contraste de fase (Takamatsu et al., 2020)	Permite automação das medições, permite medições durante operação da bateria, alta resolução espacial e temporal, medições cobrem toda a extensão da bateria.	Alta complexidade de montagem, necessidade de componentes ópticos especiais, dificuldades ou impossibilidade de se utilizar fora de um laboratório, restrições de uso dependem do projeto da bateria.
---	---	---

Fonte: A autora

1.1.3 Contexto

Este trabalho está incluso no projeto “Sensores à fibra óptica para o monitoramento de baterias de chumbo-ácido aplicadas em sistemas de armazenamento de energia”, promovido pelo Grupo de Fotônica - DES - UFPE com o apoio do Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM). O projeto busca investigar sensores à fibra óptica para monitoramento contínuo de parâmetros internos de baterias de chumbo-ácido em operação, possibilitando o fornecimento de informações relevantes para o gerenciamento das baterias. Uma das vertentes do projeto consiste em monitorar o parâmetro da densidade do eletrólito de baterias de chumbo ácido para tratar o fenômeno da estratificação.

As baterias em questão compõem um *Battery Energy Storage System* (BESS) - sistema que armazena energia eletroquimicamente⁷ para posterior utilização desta energia quando demandado -, uma tecnologia considerada muito promissora em aplicações de sistema de potência devido à sua rápida resposta, flexibilidade de operação, redução no preço por KWh e recentes avanços das tecnologias de baterias (Datta et al., 2021).

⁷Podem ser baterias de chumbo-ácido ou lítio. No contexto deste projeto, o sistema é composto por baterias de chumbo-ácido.

BESSs podem atuar na geração de energia - através da suavização da potência em sistemas fotovoltaicos ou eólicos -, transmissão e distribuição de energia - através do controle de tensão do barramento conectado - ou no cliente final - com funcionalidades como arbitragem⁸, corte de demanda⁹, *backup* e controle do fator de potência. No ITEM, o método de medição de densidade de eletrólito atualmente utilizado no BESS fundamenta-se no uso de densímetro digital portátil, para o qual são considerados fatores muito limitantes a necessidade de medições manuais e a impossibilidade de integrar este equipamento ao sistema de gerenciamento das baterias. Ao analisar a Tabela 1.1, nota-se a necessidade de um sensor que reúna as principais vantagens - permitir automação das medições durante a operação da bateria, acurácia e baixa complexidade de fabricação - e elimine as desvantagens dos métodos em questão.

1.1.4 Propósito e Relevância

O propósito do sistema projetado neste trabalho concentra-se na disponibilização de medidas confiáveis e automáticas da densidade de eletrólito em diferentes níveis de uma bateria chumbo-ácido durante sua operação para aplicações em sistemas de armazenamento de energia. Além disso, este sistema apresenta grande potencial de viabilizar:

- Medição de nível de eletrólito;
- Estimativas de SoC;
- Estudos da estratificação para melhor compreensão da ocorrência deste fenômeno na aplicação;
- Identificação precoce de falhas;
- Análise do comportamento das baterias através da união dos dados de densidade do eletrólito com outros parâmetros que habitualmente são medidos, como tensão, corrente e temperatura.

⁸Garantindo que no horário de ponta a rede elétrica não forneça energia à carga.

⁹Garantindo que o cliente não consuma da rede elétrica mais do que o estabelecido.

1.2 Visão e Escopo

1.2.1 Visão

Para sistemas armazenadores de energia baseados em bateria de chumbo-ácido, o sistema de medição de densidade de eletrólito é um sistema projetado para fornecer medidas precisas e confiáveis da densidade do eletrólito de baterias chumbo-ácido em níveis diferentes da bateria e em tempo real. Ao contrário das soluções já desenvolvidas ou da solução atualmente utilizada, trata-se de um **dispositivo de baixo custo, simples fabricação e que permite o monitoramento contínuo e em operação do eletrólito.**

1.2.2 Escopo

Este trabalho limita-se à fabricação e caracterização do elemento sensor (transdutor) e ao projeto de arquitetura de um sistema de medição de eletrólito em 3 níveis da bateria, de forma que o projeto dos módulos, construção do protótipo, implementação e testes de ciclagem (carregamento e descarregamento) estão fora do escopo. Os requisitos do projeto estão detalhados no Apêndice Especificação de Requisitos.

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de medição de densidade de eletrólito que possa ser integrado ao BESS.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Fabricar e caracterizar um sensor à fibra óptica de densidade de eletrólito;
- Elaborar uma arquitetura do sistema de medição.

Capítulo 2

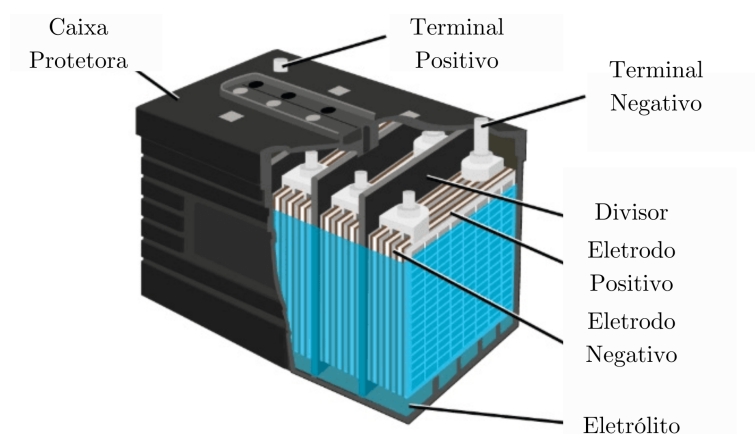
Fundamentação Teórica

2.1 Eletrólito Ácido Sulfúrico

Uma célula, ilustrada na Figura 2.1, é composta por 3 partes principais (Linden e Reddy, 1995):

- ânodo ou eletrodo negativo ou placa negativa: material ativo que fornece elétrons para um circuito externo. É oxidado (perde elétrons) durante a reação eletroquímica;
- cátodo ou eletrodo positivo ou placa positiva: material ativo que recebe elétrons de um circuito externo. É reduzido (recebe elétrons) durante a reação eletroquímica;
- eletrólito: responsável pela transferência de carga através de íons entre o cátodo e o ânodo. Não deve reagir com os demais componentes, geralmente sendo uma solução aquosa.

A bateria de chumbo-ácido é um delicado sistema eletroquímico no qual ocorre uma competição entre as reações de geração de corrente e decomposição de água. Impurezas exercem uma forte influência sobre esta competição por acelerar a decomposição de água - impactando diretamente o desempenho da bateria - e por isso, o eletrólito utilizado deve apresentar um grau de pureza definido (Pavlov, 2011).

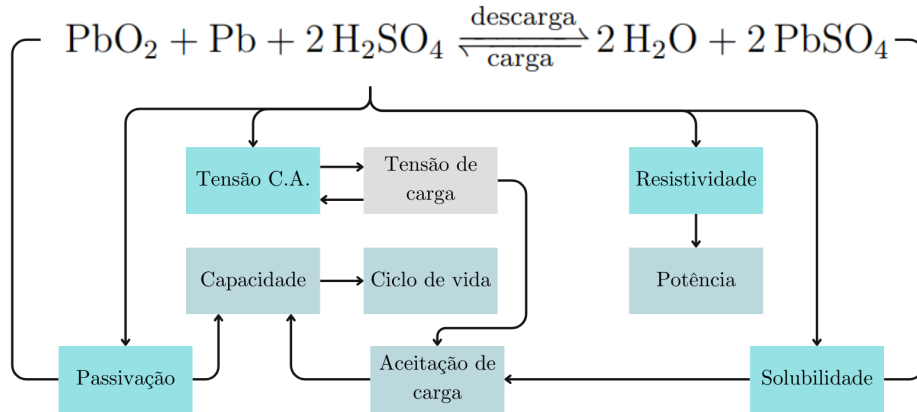
Figura 2.1: Esquemático de Bateria Chumbo-Ácido

Fonte: Adaptada de techatronic.com

Neste trabalho, o eletrólito em questão é composto por uma solução aquosa de H_2SO_4 . Neste contexto, a concentração do eletrólito refere-se à razão entre a densidade da solução de ácido sulfúrico para uma dada temperatura e a densidade da água em uma temperatura referência (Pavlov, 2011).

O ácido sulfúrico, ao ser misturado com água, sofre dissociações, resultando na liberação de íons que estão diretamente envolvidos nos processos eletroquímicos (Pavlov, 2011). Sendo assim, a concentração de eletrólito - e, por sua vez, a densidade - possui significativa influência sobre o desempenho de uma bateria chumbo-ácido, uma vez que limita as quantidades de íons disponíveis. Existem 4 principais parâmetros de influência, esquematizados na Figura 2.2:

Figura 2.2: Influência da Concentração do Eletrólito na Bateria Chumbo-Ácido. Tensão CA refere-se à tensão de circuito aberto.



Fonte: Adaptada de (Pavlov, 2011)

A condutividade do eletrólito depende principalmente dos íons H^+ , os quais possuem maior mobilidade (Pavlov, 2011). Sendo assim, a concentração de eletrólito determina a concentração de íons H^+ , afetando diretamente a **resistividade** da bateria e, conseqüentemente, a entrega de energia (uma alta resistividade implica em perdas de energia por calor).

A força eletromotriz (do inglês, *Electromotive Force* (EMF)) de uma bateria é afetada pela concentração de ácido sulfúrico H_2SO_4 e está intimamente relacionada com o estado de carga. Sob certas condições, a **tensão de circuito aberto** tende a se igualar à EMF. Além disso, durante a carga da bateria, a tensão de carga deve ser superior à EMF de uma bateria completamente carregada. Caso contrário, a bateria é carregada parcialmente e uma parcela significativa de $PbSO_4$ não participa das reações, se recristaliza e ocorre sulfatação. Ou seja, a concentração de eletrólito deve manter-se abaixo de um certo valor para que a bateria possa carregar completamente (Pavlov, 2011).

A concentração de H_2SO_4 influencia diretamente a concentração de íons HSO_4^- , o que determina a formação de partículas βPbO_2 ¹, as quais estão vinculadas à ativi-

¹A estrutura de dióxido de chumbo é composta por estruturas cristalinas ortorrômbica αPbO_2 e/ou tetragonal βPbO_2 em equilíbrio com zonas hidratadas $PbO(OH)_2xH_2O$

dade eletroquímica da célula e seu ciclo de vida. Em outras palavras, a concentração de eletrólito relaciona-se com processos de **passivação do PbO_2** , podendo resultar em perda de capacidade (Pavlov et al., 2004).

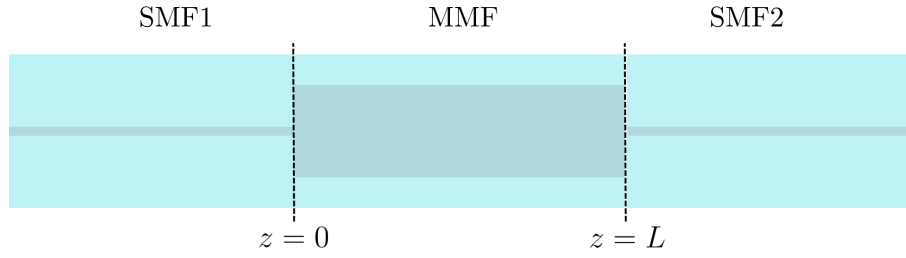
Por fim, a concentração de H_2SO_4 também está envolvida com a **solubilidade dos cristais de $PbSO_4$** , o que por sua vez afeta a concentração de íons Pb^{+2} envolvidos na formação da estrutura e atividade eletroquímica do PbO_2 , implicando em possíveis processos de sulfatação (Pavlov, 2011).

2.2 Fibras Heteronúcleo

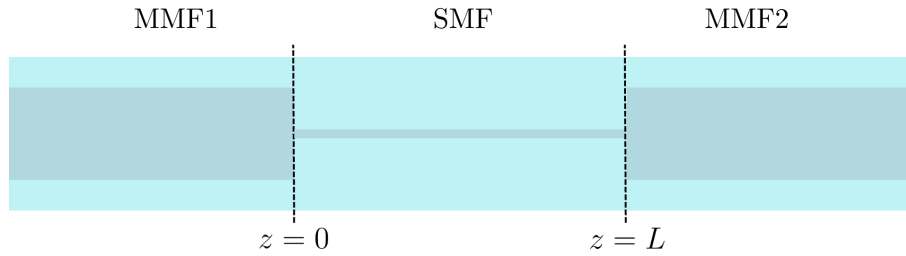
Dispositivos heteronúcleo são estruturas formadas por dois segmentos de um tipo de fibra óptica intercalados por um outro tipo de fibra óptica. Por exemplo, podem ser formados dispositivos SMS (*Single mode-Multimode-Single Mode*), MSM (*Multimode-Single mode-Multimode*), MNM (*Multimode-No core fiber-Multimode*) - conforme ilustrados nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 respectivamente -, entre outros.

O fenômeno da interferência multimodal em uma estrutura heteronúcleo fundamenta o sensoramento através das mesmas. Em um interferômetro multimodal, para um dado comprimento de onda, a luz incidente é decomposta em modos de propagação normais, onde cada modo possui sua constante de propagação β , propagando-se de forma independente. Mesmo que não troquem energia entre si², por possuírem diferentes velocidades de propagação, resultam em diferentes padrões de interferência ao longo do comprimento do interferômetro. Neste contexto, o interferômetro refere-se ao trecho de fibra óptica inserido e o sensoramento se dá através da influência do índice de refração externo (meio monitorado) na constante de propagação de cada modo.

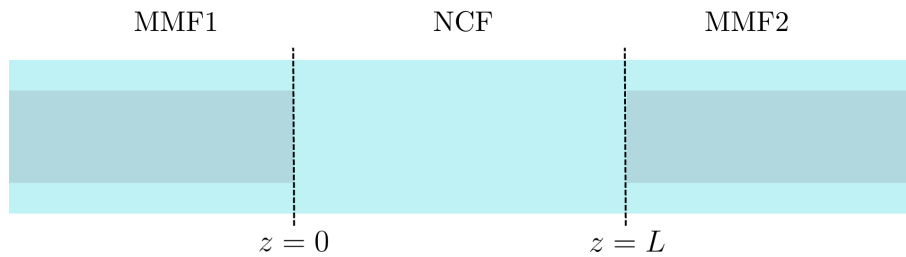
²Existem alguns casos em que há troca de energia entre os modos.

Figura 2.3: Esquemático de Dispositivo Heteronúcleo SMS

Fonte: A autora

Figura 2.4: Esquemático de Dispositivo Heteronúcleo MSM

Fonte: A autora

Figura 2.5: Esquemático de Dispositivo Heteronúcleo MNM

Fonte: A autora

Neste trabalho, são investigadas as configurações MSM e MNM. Nos dispositivos MSM, os modos guiados pela fibra multimodo propagam-se pelo *cladding* da fibra monomodo (com exceção do modo guiado pelo núcleo da fibra monomodo), onde sofrem interferência multimodal e, na interface $z = L$, recombina-se com o modo

guiado pelo núcleo, gerando um padrão de interferência (Oliveira, 2022a). No caso dos dispositivos MNM, a fibra sem núcleo funciona como um guia de ondas cujo *cladding* é o meio externo (desde que o índice de refração da fibra seja superior ao do meio externo), de forma que os modos guiados sofrem interferência, influenciados pelo meio externo e, após percorrer determinada distância L , geram um padrão de interferência (Oliveira, 2022b). Em ambos os casos, é notável a dependência da resposta do dispositivo em relação ao comprimento do trecho inserido, uma vez que, para cada seção deste trecho, haverá um padrão de interferência distinto devido às diferenças de velocidade com que os modos propagam-se.

Para fibras do tipo índice degrau, tem-se:

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & \text{se } 0 < r < a \text{ (núcleo)} \\ n_2, & \text{se } r > a \text{ (cladding)} \end{cases} \quad (2.1)$$

Para determinar os modos guiados em um guia de onda cilíndrico, a aproximação de modos fracamente guiados (ou aproximação de onda escalar) pode ser utilizada desde que (Ghatak e Thyagarajan, 1998):

$$\Delta n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \ll 1 \quad (2.2)$$

Em que $n_1 \approx n_2$ é o caso da maioria das fibras ópticas. Nesta aproximação³, os modos são considerados quase transversais e linearmente polarizados, formando dois conjuntos de modos cujas constantes de propagação em $\hat{x}$ e $\hat{y}$ são consideradas iguais. O campo elétrico transversal (E_x ou E_y) satisfaz a equação (Ghatak e Thyagarajan, 1998):

$$\nabla^2 \Psi = \epsilon_0 \mu_0 n^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

Para n^2 dependendo apenas das coordenadas transversais (r, ϕ) e não variando no

³É o caso de campos com variações transversais lentas, que interagem com dispositivos que possuem dimensões muito superiores ao comprimento de onda λ , geralmente são campos elétricos e magnéticos transversais (TEM), perpendiculares entre si e cujas polarizações situam-se no plano perpendicular ao sentido de propagação, de forma que a polarização não muda rapidamente durante a propagação em um meio isotrópico em distâncias moderadas (Chang, 2015).

sentido do eixo z , expressa-se o campo transversal como:

$$\Psi(r, \phi, z, t) = \psi(r, \phi)e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (2.4)$$

Inserindo a equação (2.4) na equação (2.3) e utilizando-se do método de separação das variáveis $\psi(r, \phi) = R(r)\Phi(\phi)$, obtém-se:

$$\frac{r^2}{R} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{R} \frac{dR}{dr} \right) + r^2 [n^2(r)k_0^2 - \beta^2] = -\frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} = +l^2 \quad (2.5)$$

Em que $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$ e l é um número inteiro ($l = 0, 1, 2, \dots$), por satisfazer $\Phi(\phi + 2\pi) = \Phi(\phi)$, uma vez que a dependência de $\Phi(\phi)$ possui uma forma $\cos(\phi l)$ e $\sin(\phi l)$. Utilizando a parte radial:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + \{[n^2(r)k_0^2 - \beta^2]r^2 - l^2\}R = 0 \quad (2.6)$$

O campo transversal completo é dado por:

$$\Psi(r, \phi, z, t) = R(r)e^{i(\omega t - \beta z)} \begin{Bmatrix} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

Inserindo a equação (2.1) na equação (2.6):

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + \left(U^2 \frac{r^2}{a^2} - l^2 \right) R = 0 \quad 0 < r < a \quad (2.8a)$$

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} - \left(W^2 \frac{r^2}{a^2} + l^2 \right) R = 0 \quad r > a \quad (2.8b)$$

Em que:

$$U = a\sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (2.9a)$$

$$W = a\sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (2.9b)$$

$$V^2 = U^2 + W^2 = a^2 k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (2.9c)$$

U , W e V são a constante de propagação transversal normalizada dentro do núcleo, constante de propagação transversal normalizada no *cladding* e o parâmetro de guia de onda normalizado, respectivamente (Ghatak e Thyagarajan, 1998; Mohammed et al., 2004). O parâmetro V também é conhecido como frequência normalizada. A equação (2.6), para este caso, possui dois tipos de soluções:

- $n_1^2 k_0^2 > \beta^2 > n_2^2 k_0^2$ ⁴: são os modos guiados, em que para cada valor de l existem m modos guiados ($m = 0, 1, 2, \dots$) identificados como modos $LP_{l,m}$ ⁵ onde l e m referem-se às componentes azimutais e radiais, respectivamente;
- $\beta^2 < k_0^2 n_2^2$: são os modos de radiação. Estes modos sofrem refração (em vez de reflexão interna total) e, quando excitados, escapam, do núcleo.

Uma distribuição de campo aleatória pode ser representada como um somatório de modos guiados e uma integral de modos de radiação (Ghatak e Thyagarajan, 1998):

$$\psi(r, \phi, z) = \sum_{l,m} \psi_{l,m}(r, \phi) e^{-i\beta_{l,m}z} + \int c(\beta) \psi_\beta(r, \phi) e^{-i\beta z} d\beta \quad (2.10)$$

Onde $c(\beta)$ está associado à excitação dos modos de radiação, sendo $|c(\beta)|^2 d\beta$ proporcional à potência carregada pelos modos de radiação com β variando entre β e $\beta + d\beta$.

Das equações (2.8a) e (2.8b), obtém-se a dependência transversal de um modo:

$$\psi(r, \phi) = \begin{cases} \frac{A}{J_l(U)} J_l\left(\frac{Ur}{a}\right) \begin{Bmatrix} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{Bmatrix}, & \text{se } 0 < r < a \\ \frac{A}{K_l(W)} K_l\left(\frac{Wr}{a}\right) \begin{Bmatrix} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{Bmatrix}, & \text{se } r > a \end{cases} \quad (2.11)$$

Em que $J(x)$ e $K(x)$ são as funções de Bessel e Bessel modificada, respectivamente.

⁴Condições obtidas aplicando-se condição de contorno em $r = a$ e assumindo que a energia é confinada no núcleo e decai no *cladding*.

⁵LP designa-se como *Linearly Polarized*.

Assumindo continuidade para $\partial\psi/\partial r$ na interface $r = a$ têm-se:

$$\frac{U J'_l(U)}{J_l(U)} = \frac{W K'_l(W)}{K_l(U)} \implies \frac{U J_{l+1}(U)}{J_l(U)} = \frac{W K_{l+1}(W)}{K_l(U)} \quad (2.12)$$

Alternativamente (Ghatak e Thyagarajan, 1998; Mohammed et al., 2004):

$$\psi_{l,m}(r, \phi) = \begin{cases} c_{l,m} J_l\left(\frac{u_{l,m}r}{a}\right) \begin{Bmatrix} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{Bmatrix}, & \text{se } 0 < r < a \\ d_{l,m} K_l\left(\frac{w_{l,m}r}{a}\right) \begin{Bmatrix} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{Bmatrix}, & \text{se } r > a \end{cases} \quad (2.13)$$

Em que U é escrito como $u_{l,m}$ e W como $w_{l,m}$. $c_{l,m}$ é o coeficiente de excitação de cada modo no núcleo, onde $|c_{l,m}|^2$ é proporcional à potência carregada pelo modo $LP_{l,m}$. Analogamente, $d_{l,m}$ é o coeficiente de excitação de cada modo no *cladding*. De acordo com as equações (2.11) e (2.13), $d_{l,m} = (J_l(u_{l,m})/K_l(w_{l,m}))c_{l,m}$. Para calcular o coeficientes de excitação de cada modo, i.e. a fração de potência confinada ao núcleo, utiliza-se a eficiência de acoplamento de potência $\eta_{l,m}$, em que $c_{l,m} = \sqrt{\eta_{l,m}}$ (Mohammed et al., 2004):

$$\eta_{l,m} = \frac{|\int_0^\infty E_i E_{l,m} dr|^2}{\int_0^\infty |E_i|^2 r dr \int_0^\infty |E_{l,m}|^2 r dr} \quad (2.14)$$

Onde E_i refere-se ao campo incidente na fibra e $E_{l,m}$ a distribuição do campo referente ao $LP_{l,m}$ modo guiado, ambos calculados em $z = 0$.

2.2.1 Exemplos

Para um campo incidente com feixe gaussiano:

$$E_i(r) = e^{-(r/\bar{w})^2} e^{-i\beta_0 z} \hat{x} \quad (2.15)$$

Onde β_0 é a constante de propagação longitudinal e $\bar{w}$ é o parâmetro de largura do

feixe gaussiano, a qual pode ser aproximada por (para fibras com índice de refração degrau) (Marcuse, 1977):

$$\bar{w} = \frac{a}{\sqrt{\ln 2}} \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \right) \quad (2.16)$$

O fato do campo incidente não possuir componentes azimutais implica em desconsiderar os coeficientes de excitação para $l \neq 0$. Desta forma, baseando-se nas equações (2.10) e (2.13) e desprezando os modos de radiação, o campo incidente, em $z = 0$, pode ser escrito como (Mohammed et al., 2004):

$$E_i(r, 0) = \begin{cases} \sum_{m=1}^M c_{0,m} J_0\left(\frac{u_{0,m}r}{a}\right) \hat{x}, & \text{se } 0 < r < a \\ \sum_{m=1}^M d_{0,m} K_0\left(\frac{w_{0,m}r}{a}\right) \hat{x}, & \text{se } r > a \end{cases} \quad (2.17)$$

Utilizando a equação (2.14) e desprezando a parcela de $E_i(r, 0)$ para $r > a$ no numerador:

$$\eta_{0,m} = \frac{2\left(\frac{\bar{w}}{a}\right)^2 e^{-(\bar{w}/a)^2(u_{0,m}^2/2)}}{J_0^2(u_{0,m}) + J_1^2(u_{0,m}) + \left(\frac{J_0(u_{0,m})}{K_0(w_{0,m})}\right)^2 (K_1^2(w_{0,m}) - K_0^2(w_{0,m}))} \quad (2.18)$$

A transmitância no trecho de $z = 0$ a $z = L$ é dada por (Oliveira, 2022b):

$$T(\lambda) = 10 \log_{10} \left| \sum_m \eta_{0,m} e^{-i\beta_{0,m}L} \right|^2 \quad (2.19)$$

Utilizando uma fibra NCF, é possível calcular o parâmetro de guia de onda normalizado V como:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} b \sqrt{n_{NCF}^2 - n_{meio}^2} \quad (2.20)$$

Onde b é o raio da fibra sem núcleo, n_{NCF} é o seu índice de refração e n_{meio} é o meio externo que envolve a fibra. Para calcular-se $u_{0,m}$ utiliza-se a expressão (Oliveira, 2022b):

$$u_{0,m} \approx \mu_{0,m} \left[1 - \frac{n_{NCF}^2 + n_{meio}^2}{2n_{NCF}^2 V} + \frac{1}{8} \left(\frac{n_{NCF}^2 + n_{meio}^2}{2n_{NCF}^2 V} \right)^2 \right] \quad (2.21)$$

Onde $\mu_{0,m}$ é a raiz de ordem m da função $J_0(u_{0,m})$. Por fim,

$$\beta_{0,m} = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - u_{0,m}^2} \quad (2.22)$$

Capítulo 3

Métodos

A metodologia do presente trabalho é baseada nos princípios do *Design Science Research* devido à sua orientação para resolução de problemas específicos a fim de obter uma solução satisfatória para um problema e gerar conhecimentos que possam ser utilizados por outros pesquisadores (Dresch et al., 2015). Especificamente, inspira-se na metodologia proposta por (Nunamaker Jr et al., 1990) pela integração dos processos da pesquisa tradicional e do desenvolvimento de sistemas. A aplicação de tais conceitos, considerando-se o escopo do trabalho, resulta na metodologia ilustrada na Figura 3.1.

A **construção do *framework* conceitual do trabalho** é concebida pelas seguintes etapas:

- **Identificação do propósito e relevância:** formalização de uma questão ligada a um problema de pesquisa relevante e significativo, conforme descrita no Capítulo 1.
- **Revisão da literatura:** aquisição de conhecimento sobre os diversos temas conectados ao problema com o objetivo de auxiliar o desenvolvimento da solução.
- **Análise das soluções propostas existentes:** busca pela compreensão das suas limitações tendo em vista a aplicação.

Figura 3.1: Metodologia geral do trabalho

Fonte: A autora

- **Entendimento do ambiente de operação:** extração de informações relevantes sobre a aplicação que devem ser consideradas no desenvolvimento da solução.
- **Elaboração de requisitos:** construção de uma compreensão geral das propriedades do sistema a ser desenvolvido (documentados resumidamente no Apêndice A).

Uma vez compreendidos o ambiente de operação e elaborados os requisitos, desenvolveu-se uma **arquitetura do sistema** proposto, conforme detalhado na Seção 3.1. Na **análise e projeto do transdutor**, descrita na Seção 3.2, concentram-se as atividades de investigação científica do elemento sensor¹ de densidade de eletrólito, confirmando a viabilidade de se utilizar um transdutor² juntamente com uma fonte de luz discreta³ e um fotodetector para formar um sensor.

3.1 Sistema Proposto

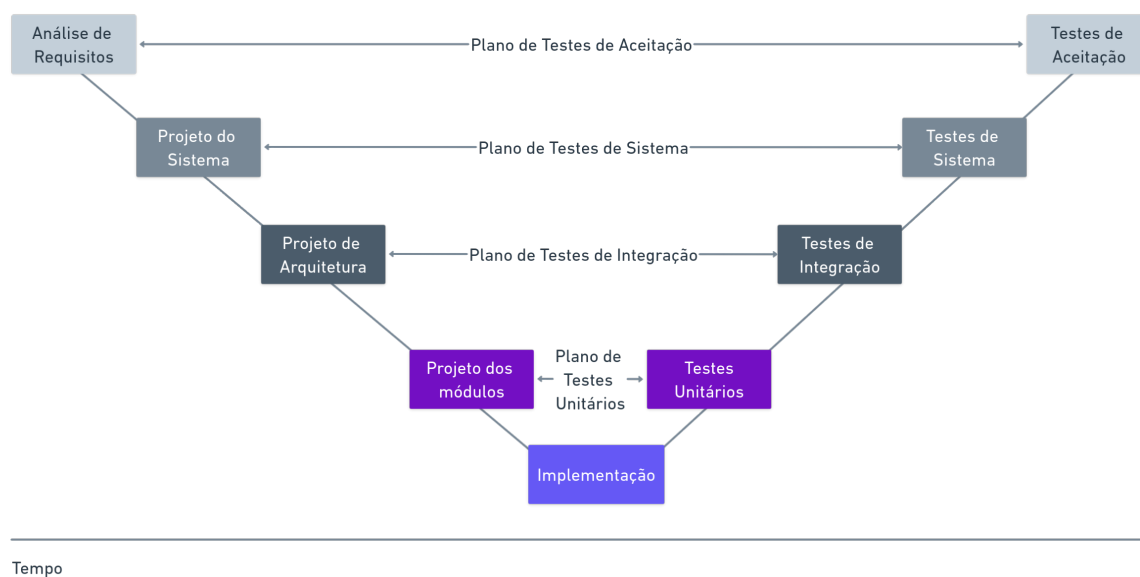
O desenvolvimento da arquitetura do sistema foca nos componentes do sistema, suas funcionalidades e relações estruturais e dinâmicas entre os componentes, assim habilitando um *roadmap* para o processo de construção do sistema (Nunamaker Jr et al., 1990). Na etapa de construção conceitual do *framework*, após estabelecer o propósito da pesquisa e conhecer o ambiente de operação do sistema, estabelecem-se os requisitos do projeto e seus objetivos. Para esta aplicação, optou-se por focar em um sistema que seja integrado ao sistema atual do BESS em detrimento de um sistema isolado visando a facilitação do gerenciamento das baterias e da coleta de dados dos sistema⁴, resultando no conjunto de requisitos especificados.

¹Neste texto, entende-se como sensor o conjunto emissor (laser) + transdutor (fibra heteronúcleo) + detetor (fotodetector).

²Entende-se como conversor da propriedade de amplitude da luz mediante a variação do índice de refração do mensurando (eletrólito).

³Luz espectralmente restrita a um determinado comprimento de onda.

⁴No sentido de se utilizar os dados de densidade juntamente com outros parâmetros do BESS para possíveis análises.

Figura 3.2: Fluxo do *V Model*

Fonte: A autora

Na etapa de desenvolvimento da arquitetura do sistema, deve-se identificar (Nunamaker Jr et al., 1990):

- restrições impostas pelo ambiente;
- objetivos do desenvolvimento;
- funcionalidades do sistema para alcançar os objetivos;
- premissas do projeto sobre o domínio tecnológico e ambiente de operação.

Este trabalho sugere o uso do *V Model*⁵ - ilustrado na Figura 3.2 - para desenvolvimento do sistema pela sua adequação a projetos de pequeno/médio porte, por possuir requisitos bem definidos e fixos, e pelo seu foco em validação e verificação⁶. O escopo deste trabalho limita-se às etapas de análise de requisitos, projeto do sistema e projeto da arquitetura.

O projeto do sistema envolve - através da compreensão dos requisitos e de como os usuários utilizarão o sistema - a especificação dos módulos e suas capacidades. Trata-

⁵Modelo de desenvolvimento de sistemas geralmente utilizado em projetos de *software* mas também aplicável a projetos envolvendo *hardware*.

⁶Neste contexto, validação refere-se ao processo de avaliação de satisfação dos requisitos enquanto que a verificação, realizada após a construção do sistema, refere-se ao processo de confirmar que o sistema satisfaz os requisitos propostos através de testes.

se de enfatizar as principais *features* do sistema e obter uma visão mais detalhada dos módulos. O projeto da arquitetura, por sua vez, concentra-se em ter uma visão geral da estrutura do sistema e como os módulos interagem entre si visando que o sistema seja dimensionado eficazmente, gerenciável e operacional.

3.2 O Sensor

3.2.1 Definição da Configuração e dos Parâmetros do Transdutor

A estrutura de fibra heteronúcleo foi selecionada devido à sua simplicidade de fabricação e baixo custo. Dentre as possibilidades de configurações, descartou-se a configuração SMS uma vez que, apesar de sua aplicação em vários trabalhos, procedimentos mais complexos - como remoção química da casca da fibra multimodo ou afunilamento da mesma - são necessários tendo em vista à obtenção de uma sensibilidade mais satisfatória (Oliveira, 2022a). Neste trabalho, são fabricados e testados dispositivos sensores nas configurações MSM e MNM. Conforme explicitado na Seção 2.2, o comprimento da parte sensora (PS)⁷ é um fator determinante na transmitância do dispositivo, estando intimamente associado à **sintonização do dispositivo**. Neste contexto, sintonização refere-se a obtenção de uma resposta espectral cuja curva característica esteja situada em torno de um comprimento de onda desejado, seja na descida ou na subida da curva. O termo **curva característica** refere-se à perda ou ganho de potência óptica que ocorre em uma região limitada do espectro em relação ao restante do espectro (considerando uma luz incidente de fonte banda larga).

A proposta deste trabalho concentra-se em desenvolver um transdutor que possa compor um sensor juntamente com uma fonte de luz discreta e fotodetector devido à inviabilidade de utilizar-se um analisador de espectro óptico (do inglês, *Optical*

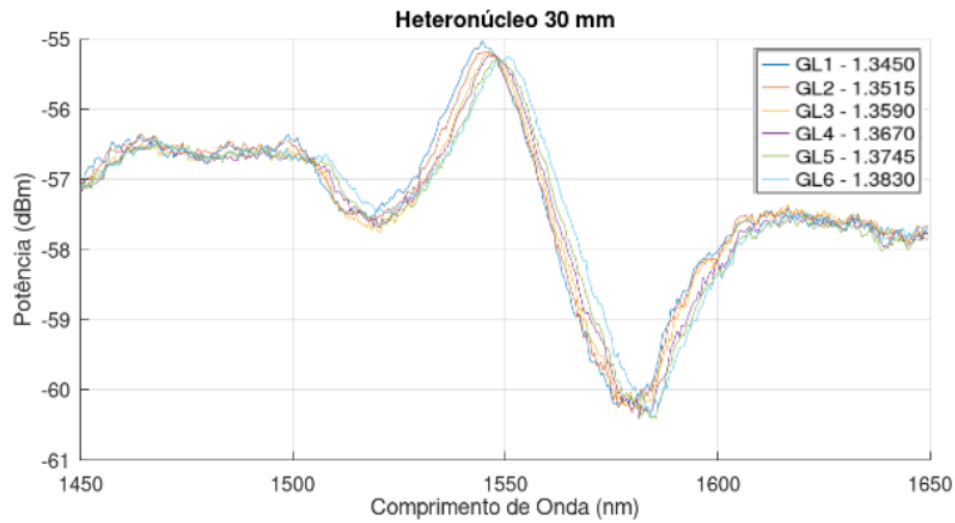
⁷Refere-se ao segmento de fibra central o qual intercala os segmentos de fibra multimodo. No caso MSM, trata-se da fibra monomodo e, no caso MNM, trata-se da fibra sem núcleo.

Spectrum Analyzer (OSA)) na aplicação. Desta forma, foi escolhido o comprimento de onda $\lambda = 1550$ nm devido à maior disponibilidade de fibras e equipamentos apropriados para este comprimento de onda, o qual é amplamente utilizado em aplicações de telecomunicações.

Os comprimentos das partes sensoras foram definidos a partir dos resultados - dos quais alguns estão apresentados na Figura 3.3 - de (Oliveira, 2022a) para a configuração MSM e (Oliveira, 2022b) para a configuração MNM. Seus resultados experimentais são obtidos através de um aparato experimental similar ao descrito no Apêndice D. As simulações realizadas em (Oliveira, 2022b; de Oliveira et al., 2023) são baseadas em um modelo similar ao apresentado na Seção 2.2, utilizando as equações (2.18) a (2.22). Na Figura 3.3, é possível observar as diferenças entre os espectros de transmissão de cada dispositivo, em que, para determinados comprimentos de onda, há interferência construtiva (ganho de potência) no dispositivo heteronúcleo MSM ($L = 30$ mm), enquanto que o dispositivo MNM ($L = 30$ mm) exibe uma curva característica ressonante com uma queda mais acentuada de potência.

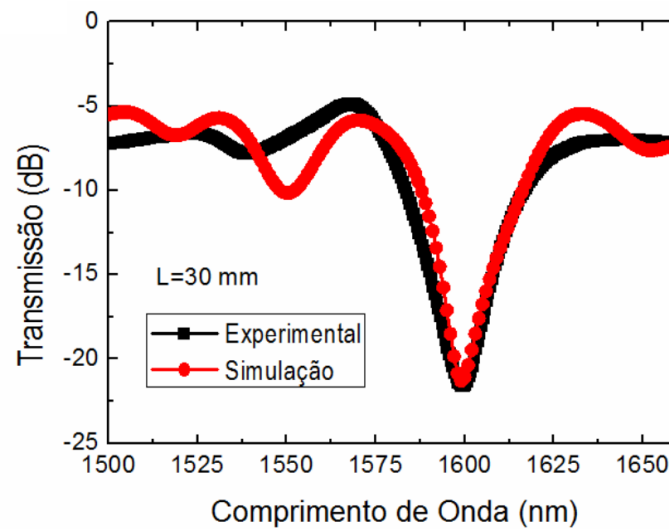
Desta forma, partindo-se do comprimento $L = 30$ mm, foram-se realizando alterações no comprimento da parte sensora dos dispositivos fabricados para obter-se uma sintonização em $\lambda = 1550$ nm. A fabricação dos dispositivos é descrita no Apêndice C.

Figura 3.3: Espectros de Transmissão para Dispositivos Heteronúcleo $L=30$ cm



(a) Resultados experimentais para dispositivo heteronúcleo MSM

Fonte: Retirada de (Oliveira, 2022a)



(b) Resultados experimentais e simulados para $n=1.337$ e dispositivo heteronúcleo MNM

Fonte: Retirada de (Oliveira, 2022b)

3.2.2 Caracterização das Amostras de Eletrólito

Nesta etapa é realizada a verificação da relação linear entre o índice de refração e a densidade de eletrólito das amostras fornecidas pelo ITEM. O procedimento específico encontra-se no Apêndice B.

3.2.3 Delineamento de Pesquisa

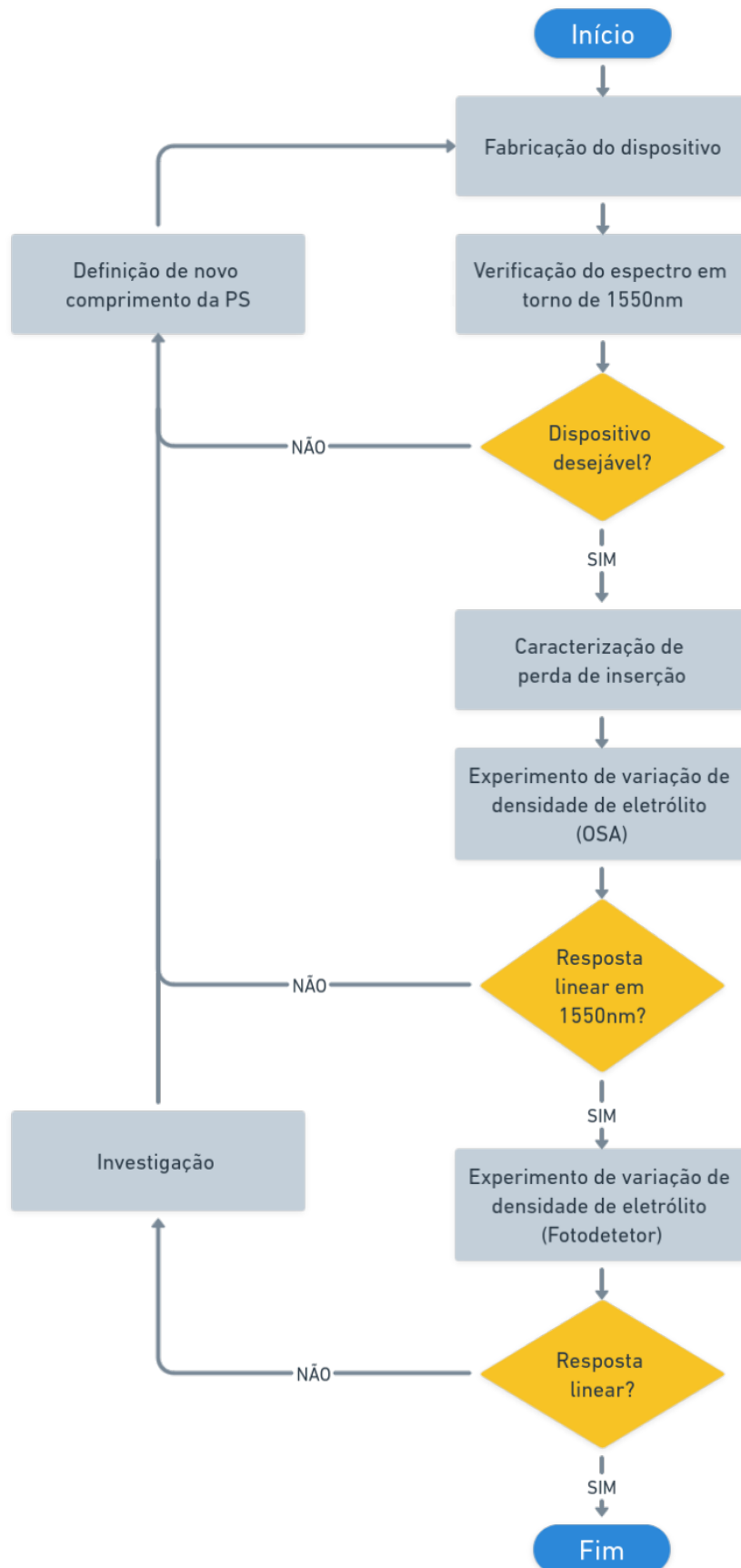
O delineamento de pesquisa, ilustrado na Figura 3.4, foi executado para a investigação de ambas as configurações de dispositivo heteronúcleo. Baseando-se nos resultados de (Oliveira, 2022a) para a configuração MSM e (Oliveira, 2022b) para configuração MNM, tem-se conhecimento de que, para um dado comprimento L , a curva característica tende a deslocar-se para comprimentos de onda maiores diante do aumento do índice de refração n do meio que envolve a parte sensora. O resultado é a variação da potência óptica P_o em um dado comprimento de onda λ . Desta forma, a **verificação do espectro em torno de $\lambda = 1550$ nm** fundamenta-se na resposta do dispositivo com a parte sensora exposta à água⁸. O dispositivo é considerado desejável quando a potência óptica, em torno de $\lambda = 1550$ nm, apresenta um comportamento aproximadamente linear, conforme ilustrado na Figura 3.5.

O **experimento de variação de densidade de eletrólito (OSA)** investiga o deslocamento sofrido pela curva característica mediante o aumento do índice de refração causado pelo aumento da densidade de eletrólito através da transmissão espectral da luz de uma fonte de luz banda larga. Assim, espera-se que a potência óptica em $\lambda = 1550$ nm apresente uma resposta linear ao aumento da densidade de eletrólito. Em seguida, o **experimento de variação de densidade de eletrólito (fotodetector)** valida a resposta do dispositivo heteronúcleo através de uma fonte de luz centrada em 1550 nm e fotodetector a fim de comprovar-se a viabilidade de utilizá-lo na aplicação.

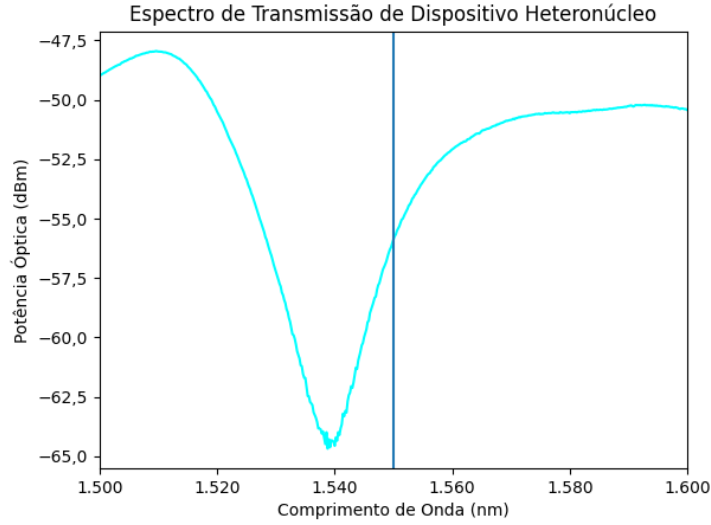
3.2.4 Caracterização Experimental do Sensor

Os procedimentos específicos foram executados para ambas configurações (MSM e MNM) nas dependências dos laboratórios do Grupo de Fotônica - DES - UFPE em ambiente climatizado - com temperaturas em torno de 22°C a 24°C - e são relatados nos Apêndices D e E.

⁸Dá-se preferência à água em relação ao ar visto que seu índice de refração é mais próximo dos índices de refração das soluções de eletrólito.

Figura 3.4: Delineamento de Pesquisa

Fonte: A autora

Figura 3.5: Sintonização do Dispositivo Heteronúcleo

Fonte: A autora

Para a caracterização da perda de inserção, o procedimento consistiu em obter os espectros de transmissão (ANDO® AQ-631SA *Optical Spectrum Analyzer*) de luz de uma fonte de banda larga (Thorlabs® SLS201L/M *Compact QTH Light Source*) através de uma fibra multimodo (Furukawa® COA MM MF) e do dispositivo heteronúcleo em questão com a parte sensora exposta ao ar.

3.2.5 Análise dos Resultados

Os parâmetros são calculados, para cada configuração, a partir dos dados obtidos no experimento descrito no Apêndice E. Para este experimento, é obtida uma equação por regressão linear:

$$P_o = A + B\rho \quad (3.1)$$

Onde P_o é a potência óptica da saída do dispositivo, A e B são coeficientes de interceptação do eixo vertical e de variação em relação à densidade de eletrólito ρ , respectivamente. A sensibilidade S é calculada a partir da equação (3.1), onde $S = B$. O desvio padrão médio $\bar{\sigma}_{dBm}$ é dado pela conversão em dBm da média $\bar{\sigma}_{mW}$ dos desvios padrão da potência óptica (em mW) $\sigma_{m,mW}$ para cada densidade de

eletrólito m no experimento com fotodetector:

$$\mu_{m,mW} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^M P_{m,n,mW} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{m,mW} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (P_{m,n,mW} - \mu)^2}{N}} \quad (3.3)$$

$$\bar{\sigma}_{mW} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sigma_{m,mW} \quad (3.4)$$

$$\bar{\sigma}_{dBm} = 10 \log_{10}(\bar{\sigma}_{mW}/1mW) \quad (3.5)$$

Onde μ_{mW} é o valor médio da potência óptica e $P_{m,n,mW}$ refere-se à potência óptica da n -ésima medição para a amostra de eletrólito m . N representa o número total de medições por amostra de eletrólito e M representa o número total de amostras de eletrólito (1100 g/L, 1150 g/L, 1210 g/L, 1250 g/L, 1290 g/L). O cálculo da relação sinal ruído (SNR) em mW é realizado de acordo com:

$$SNR_{mW} = \frac{\mu_{mW}}{\sigma_{mW}} \quad (3.6)$$

Para cada amostra de eletrólito, seleciona-se o SNR_{mW} de menor valor dentre todas as amostras. Em seguida:

$$SNR_{dBm} = 10 \log_{10}(SNR_{mW}/1mW) \quad (3.7)$$

Por fim, a perda de inserção PI é calculada pela diferença entre potências ópticas transmitidas por uma fibra multimodo e pela fibra heteronúcleo, representadas por P_{MM} e P_{het} respectivamente, em uma região fora da curva característica:

$$PI = P_{MM} - P_{het} \quad (\lambda = 1310nm) \quad (3.8)$$

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do desenvolvimento da arquitetura do sistema proposto e da análise e projeto do transdutor.

4.1 Sistema Proposto

Considerando as principais funcionalidades do sistema como:

- receber um sinal de acionamento do sistema de gerenciamento do BESS, através da rede de sensoriamento, para iniciar as medições.
- medir a densidade de eletrólito em 3 níveis distintos de uma bateria.
- enviar os dados.

E considerando as interfaces de alimentação e com a rede de sensoriamento, foram idealizados os seguintes módulos e suas funções:

- **Sensoriamento:** responsável por realizar as medições de densidade de eletrólito em 3 níveis distintos de uma bateria através de sensores, disponibilizando essas informações em forma de sinais elétricos analógicos.
- **Processamento:** recebe os sinais elétricos dos sensores, calcula a densidade de eletrólito correspondente a cada nível e disponibiliza essas informações em um formato adequado para o envio.

- **Comunicação:** faz a interface com a rede de sensoramento, recebendo o sinal de acionamento e enviando os dados para a rede de sensoramento através do protocolo Modbus RTU e uma interface RS-485. Também sinaliza para o módulo de controle o recebimento do sinal de acionamento.
- **Controle:** deve identificar o acionamento do sistema para início das medições, habilitar o módulo de alimentação e as medições.
- **Alimentação:** responsável por energizar os componentes do sistema (módulos de comunicação e controle continuamente e módulos de sensoramento e processamento mediante o acionamento) e proteger o sistema de variações de tensão na fonte de alimentação de 24V.

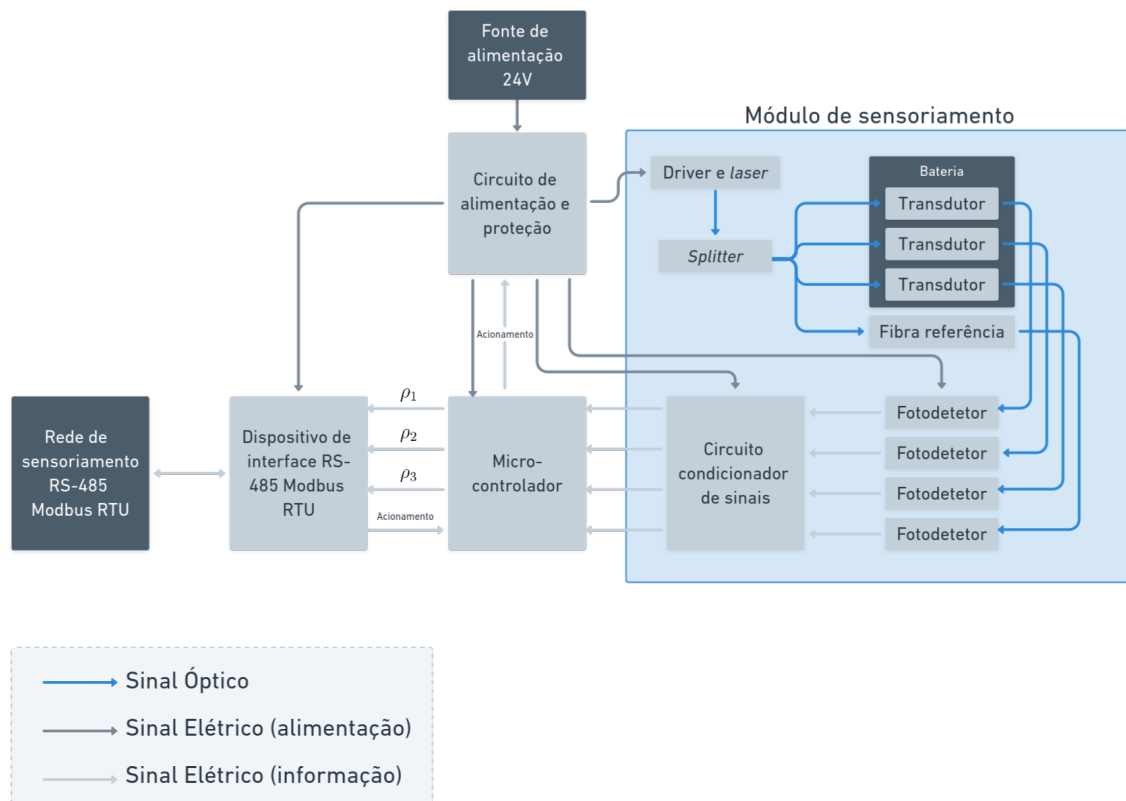
As premissas de projeto incluem:

- não há medições do gradiente horizontal (plano xy) por assumir-se um rápido processo de difusão horizontal em relação ao processo vertical (Schulte et al., 2013), isto é, considera-se que não há um gradiente horizontal significativo.
- assume-se que o gradiente de temperatura dentro da bateria não influencia significativamente o índice de refração do eletrólito, de modo que a influência desta variável não é considerada.
- assume-se que a variação de temperatura do ambiente não influencia significativamente o índice de refração do eletrólito mas pode causar oscilações na potência óptica entregue pelo *laser*.

4.1.1 Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema é apresentada na Figura 4.1. O módulo de alimentação do sistema corresponde ao **circuito de alimentação e proteção**, o qual disponibiliza as tensões necessárias para operação de cada componente do sistema. A preferência dada à centralização em um componente deve-se à priorização da modificabilidade, tendo em vista a possibilidade de fácil substituição dos demais componentes do

Figura 4.1: Arquitetura do Sistema. Em cinza escuro são representados os módulos externos ao sistema e em cinza claro são representados os componentes do sistema. Para fins de visualização, não são representados os circuitos de polarização dos fotodetetores.



Fonte: A autora

sistema, e a verificabilidade em caso de falhas na alimentação do sistema. Também tendo em vista a verificabilidade, este circuito deve conter *test points*. Além disso, ao centralizar as alimentações, não são necessários circuitos de proteção em cada componente¹, diminuindo custos e complexidade dos componentes.

Os módulos de processamento e controle são implementados através de um **micro-controlador**, onde são salvos os parâmetros dos sensores, devido à baixa complexidade de cálculos necessários e controle do sistema. O microcontrolador também deve garantir que o sistema não ultrapasse o tempo limite de funcionamento do *laser* e estabelecer um intervalo mínimo entre as ações de desligar e ligar novamente o *laser*, visando segurança e robustez. É interessante também que possua um indicativo de ausência de sinal (que aconteceria em caso de problemas no laser ou em um fotodetector ou ruptura de uma fibra).

O circuito de comunicação é implementado através de um **dispositivo de interface RS-485 Modbus RTU** dedicado, garantindo a interoperabilidade.

O módulo de sensoriamento é composto por:

- **Driver do laser de diodo:** idealmente, é uma fonte de corrente constante acurada que disponibiliza a corrente necessária para operação do *laser*. Geralmente, pode operar em dois modos - corrente constante ou potência óptica constante.² Aqui é importante ressaltar o efeito da temperatura nos *lasers* de diodo, o qual, com o aumento da temperatura, reduz a eficiência de conversão elétrica-óptica, além de aumentar a corrente limiar³ (Sun, 2015). O modo de operação nesse caso pode ser de corrente constante, uma vez que, diante de variações na temperatura, é esperado que a potência óptica varie e essa flutuação é captada pela fibra de referência. São necessários alguns circuitos de proteção para preservar o *laser*, como um circuito *slow start* para evitar choques térmicos, um circuito *brown out* para lidar com quedas de tensão de alimentação que ameacem a integridade do controle do *driver* e um

¹Com exceção do *laser*, o qual possui circuitos de proteção específicos para sua operação.

²Utiliza-se da potência óptica de saída como referência. Usualmente, os *lasers* de diodo possuem um fotodetector integrado.

³Corrente com a qual, na polarização direta, o *laser* começa a emitir luz.

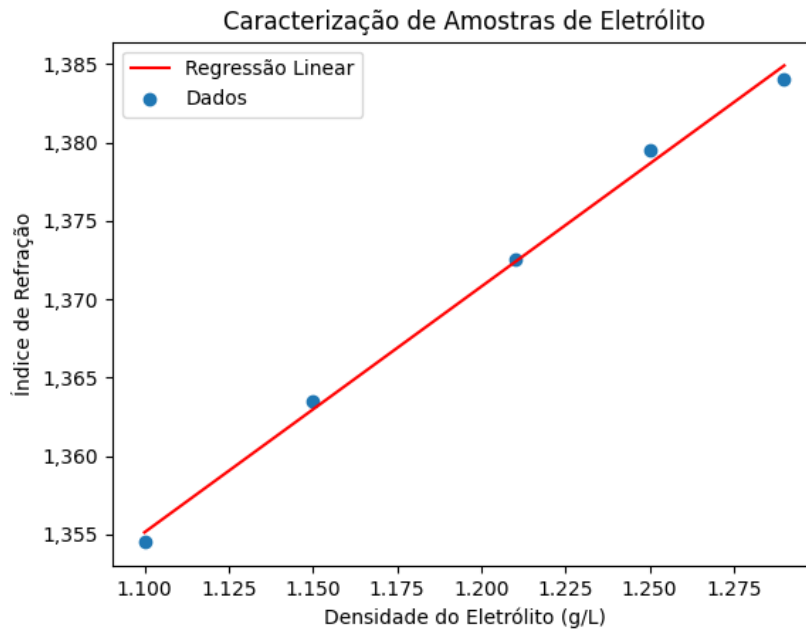
mecanismo de proteção contra descargas eletroestáticas (*ESD - Eletrostatic Discharge*)(Wavelength Electronics, 2013)

- **Laser de diodo e *Splitter***: fonte de luz discreta e divisor do feixe de luz em 4 feixes (supondo-se que a potência óptica seja igualmente dividida). Optou-se pelo conjunto em detrimento do uso de *lasers* distintos (um para cada transdutor) por apresentar menor custo, menos componentes no sistema e por permitir de forma simples a compensação de flutuações na potência óptica através da fibra de referência.
- **Transdutores**: dispositivos heteronúcleo cuja resposta depende do índice de refração do meio que envolve a parte sensora.
- **Fibra de referência**: responsável por fornecer um sinal óptico proporcional à potência de saída do *laser* com o objetivo de compensar eventuais flutuações na potência óptica entregue aos sensores, aumentando a acurácia dos dados gerados.
- **Fotodetetores**: responsáveis por transformar o sinal óptico em sinal elétrico, para que possa ser lido pelo microcontrolador. Deve conter um circuito de polarização.
- **Circuito condicionador de sinais**: garante a conversão do sinal elétrico recebido pelo fotodetector em um sinal elétrico apropriado para o microcontrolador, além de diminuir ruído e eliminar possíveis componentes indesejadas.

4.2 O Sensor

4.2.1 Caracterização das Amostras de Eletrólito

Figura 4.2: Caracterização de Amostras de Eletrólito



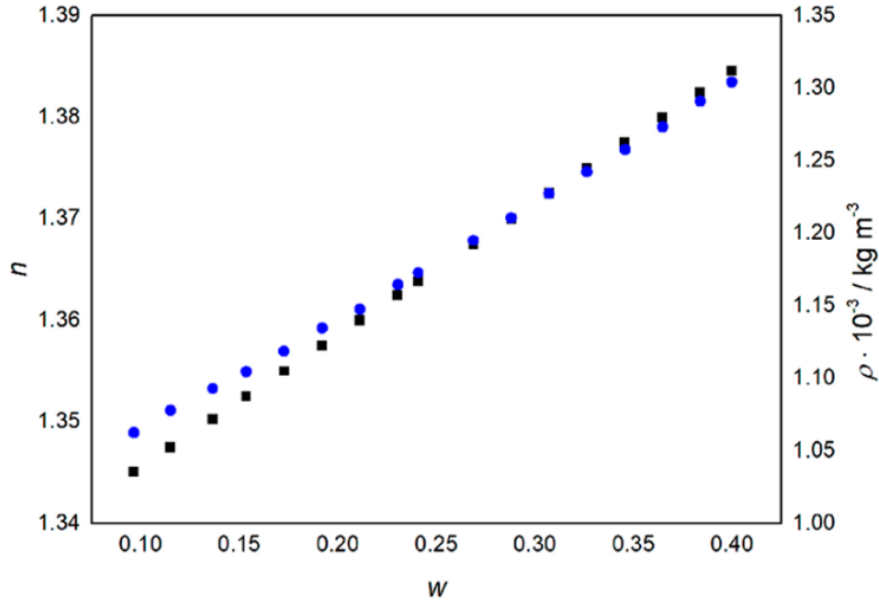
$$R^2 = 0,9961$$

$$n = 1,183 + 0,000157\rho, \quad \text{para } 1100\text{g/L} < \rho < 1290\text{g/L}$$

Fonte: A autora

A Figura 4.2 exibe os resultados do experimento descrito no Apêndice B, constatando-se a relação linear com a variação de densidade de eletrólito ρ . Comparando com os disponíveis na literatura, a exemplo da Figura 4.3, é possível constatar a proximidade dos valores de índice de refração.

Figura 4.3: Índice de Refração do Eletrólito. Relação linear entre as medidas de índice de refração n realizadas pelos autores e a concentração e densidade do eletrólito ρ ($T = 20^\circ\text{C}$), onde w é a fração mássica da solução. $\bullet$, n ; $\blacksquare$, ρ .



Fonte: Retirada de (Oca et al., 2018)

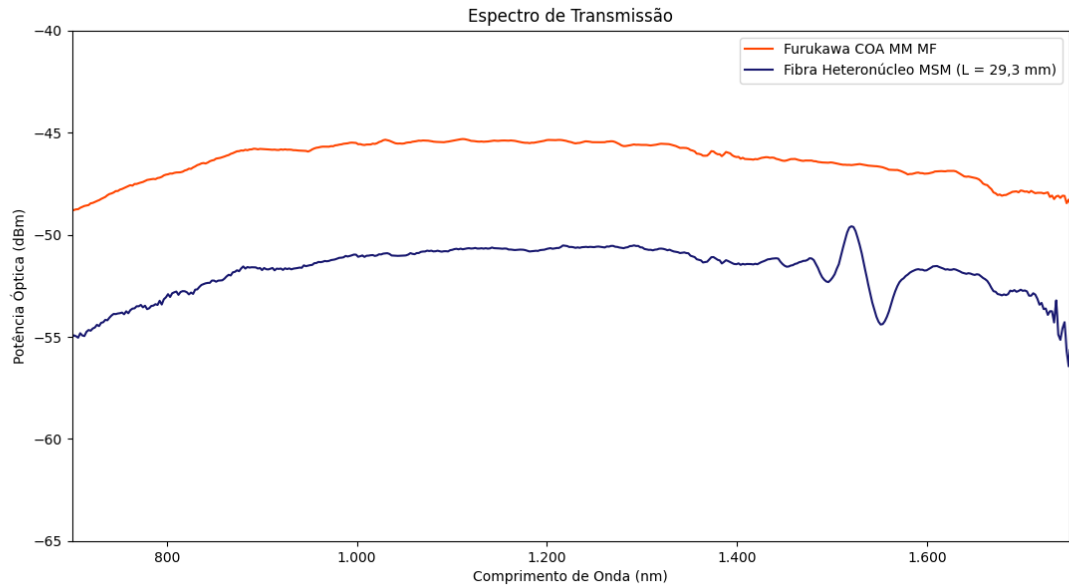
4.2.2 Dispositivo Heteronúcleo MSM

A Figura 4.4 é obtida a partir da **caracterização de perda de inserção**, descrita na Subseção 3.2.4, para um dispositivo MSM cuja parte sensora possui um comprimento $L = 29,3$ mm. A perda de inserção é calculada fora da região da curva característica de dispositivos MSM e encontra-se na Tabela 4.1.

As Figuras 4.5 e 4.6 são obtidas a partir do experimento descrito no Apêndice D para o mesmo dispositivo MSM ($L = 29,3$ mm). Os valores de potência óptica P_o em $\lambda = 1550$ nm para cada amostra de eletrólito na Figura 4.5 são selecionados e exibidos na Figura 4.6.

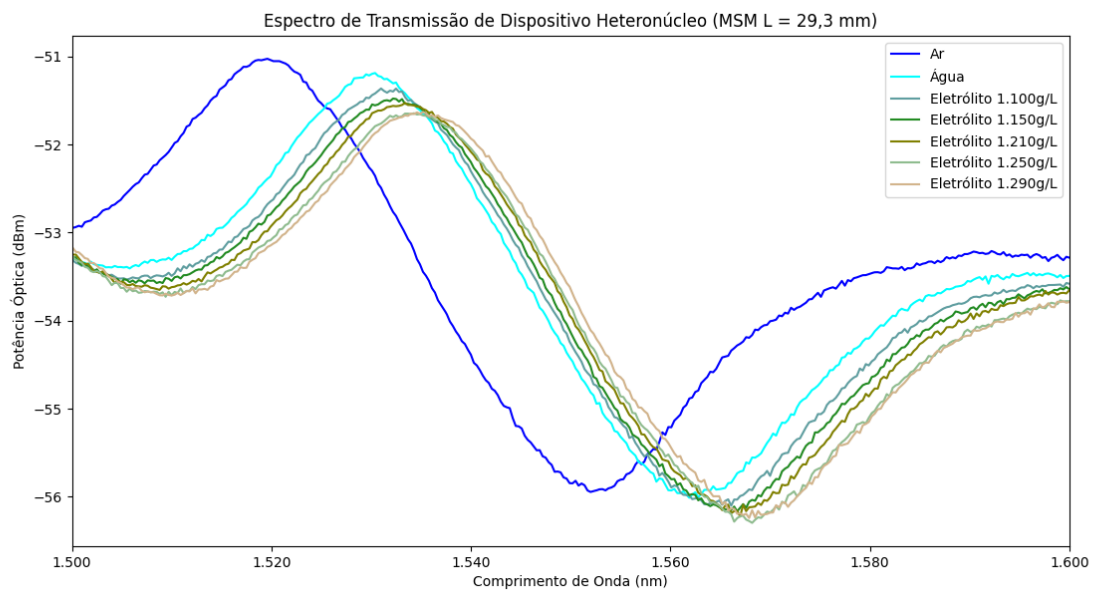
Os pontos da Figura 4.7 são calculados através da média das medições ($N = 300$) de potência óptica P_o para cada amostra de densidade de eletrólito no experimento do Apêndice E para o mesmo dispositivo MSM ($L = 29,3$ mm) dos resultados anteriores. Também são exibidas as barras de erro.

Figura 4.4: Espectro de Transmissão Dispositivo Heteronúcleo MSM. Parte sensora exposta ao ar.



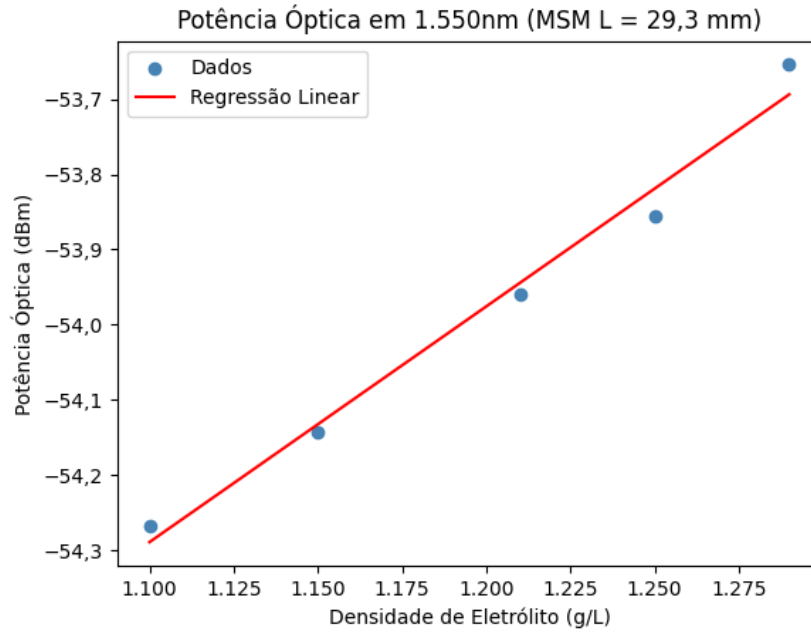
Fonte: A autora

Figura 4.5: Espectro de Transmissão Dispositivo Heteronúcleo MSM com Variação de Densidade de Eletrólito



Fonte: A autora

Figura 4.6: Potência Óptica em 1550nm para Dispositivo Heteronúcleo MSM com Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)

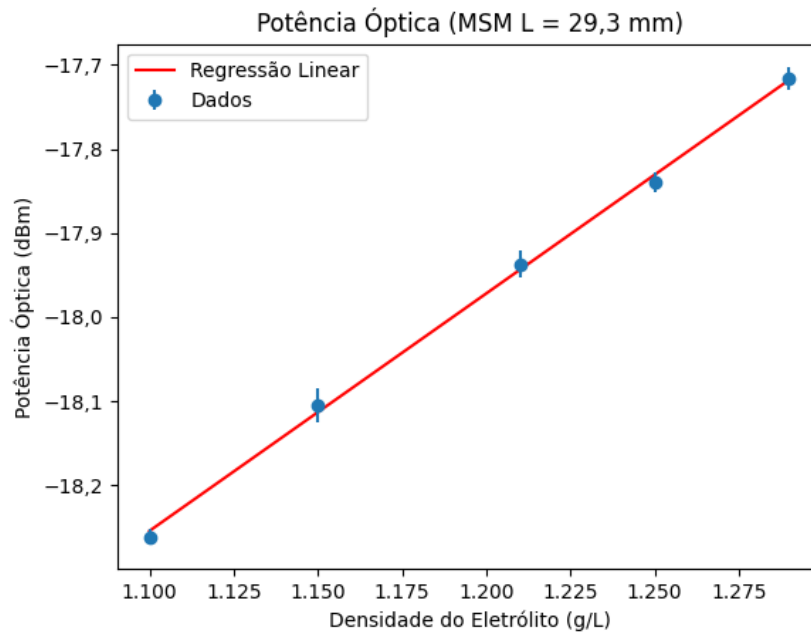


$$R^2 = 0,9843$$

$$P_o = -57,7387 + 0,003136\rho \quad (dBm), \quad \text{para } 1.100 \text{ g/L} < \rho < 1.290 \text{ g/L}$$

Fonte: A autora

Figura 4.7: Potência Óptica para Dispositivo Heteronúcleo MSM com Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetector)

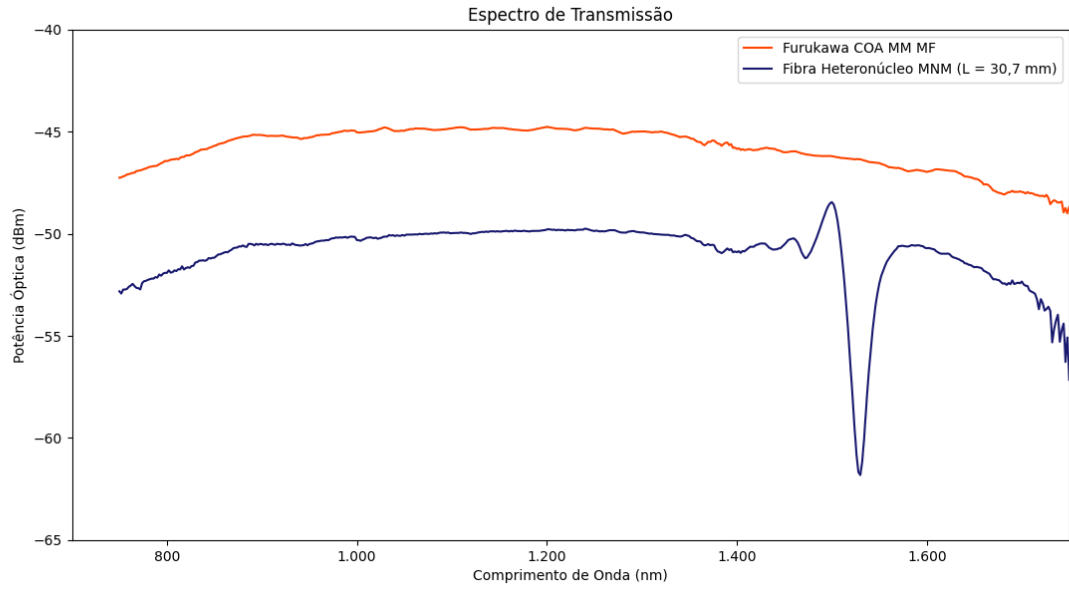


$$R^2 = 0,9987$$

$$P_o = -21,3614 + 0,002825\rho \quad (dBm), \quad \text{para } 1.100 \text{ g/L} < \rho < 1.290 \text{ g/L}$$

Fonte: A autora

Figura 4.8: Espectro de Transmissão Dispositivo Heteronúcleo MNM. Parte sensora exposta ao ar.



Fonte: A autora

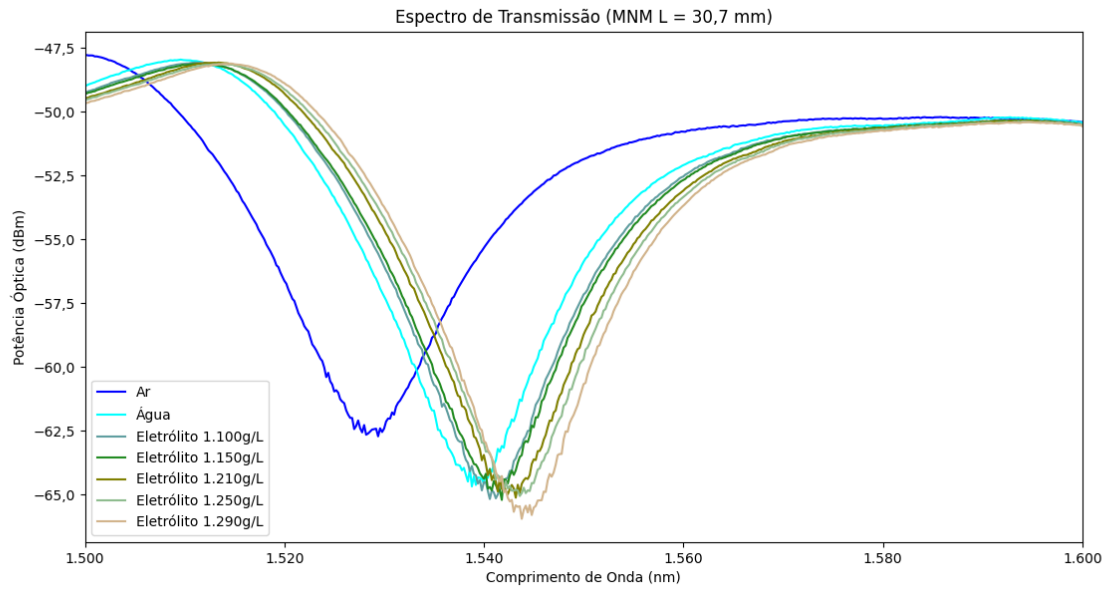
4.2.3 Dispositivo Heteronúcleo MNM

A Figura 4.8 é obtida a partir da **caracterização de perda de inserção**, descrita na Subseção 3.2.4, para um dispositivo MNM cuja parte sensora possui um comprimento $L = 30,7$ mm. A perda de inserção é calculada fora da região da curva característica de dispositivos MNM e encontra-se na Tabela 4.1.

As Figuras 4.9 e 4.10 são obtidas a partir do experimento descrito no Apêndice D para o mesmo dispositivo MNM ($L = 30,7$ mm). Os valores de potência óptica P_o em $\lambda = 1550$ nm para cada amostra de eletrólito na Figura 4.9 são selecionados e exibidos na Figura 4.10.

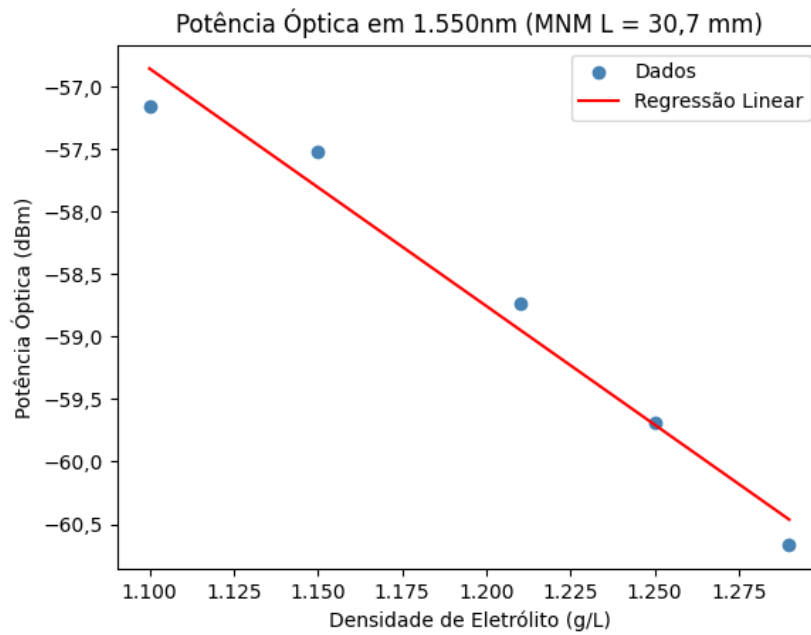
Os pontos da Figura 4.11 são calculados através da média das medições ($N = 300$) de potência óptica P_o para cada amostra de densidade de eletrólito no experimento do Apêndice E para o mesmo dispositivo MNM ($L = 30,7$ mm) dos resultados anteriores. Também são exibidas as barras de erro.

Figura 4.9: Espectro de Transmissão Dispositivo Heteronúcleo MNM com Variação de Densidade de Eletrólito



Fonte: A autora

Figura 4.10: Potência Óptica em 1550nm para Dispositivo Heteronúcleo MNM com Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)

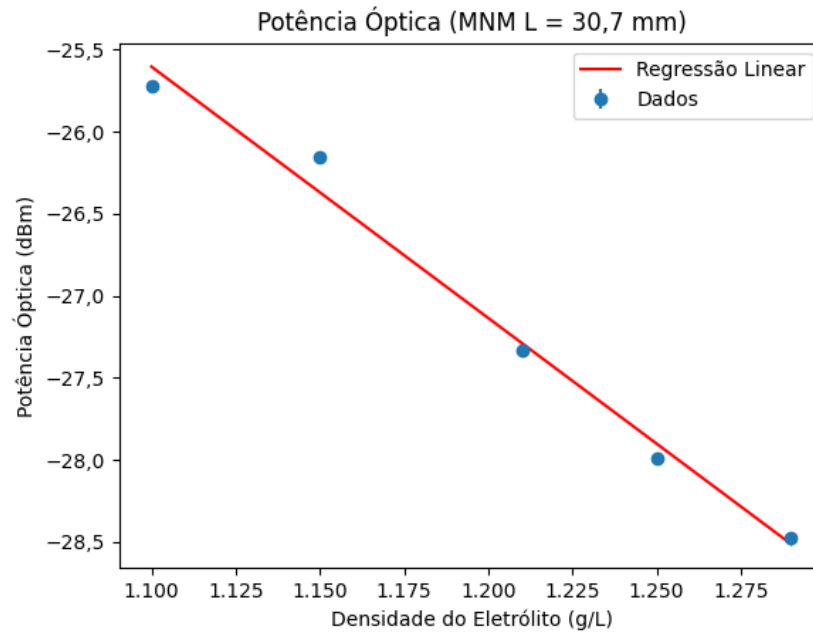


$$R^2 = 0,9701$$

$$P_o = -35,9685 - 0,01899\rho \text{ (dBm)}, \text{ para } 1.100 \text{ g/L} < \rho < 1.290 \text{ g/L}$$

Fonte: A autora

Figura 4.11: Potência Óptica para Dispositivo Heteronúcleo MSM com Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetector)



$$R^2 = 0,9872$$

$$P_o = -8,7633 - 0,0153\rho \quad (dBm), \quad \text{para } 1.100 \text{ g/L} < \rho < 1.290 \text{ g/L}$$

Fonte: A autora

4.2.4 Análise

Tabela 4.1: Parâmetros obtidos para dispositivos heteronúcleo

Parâmetro	MSM	MNM
Sensibilidade	0,0028 dBm/(g/L)	-0,0153 dBm/(g/L)
Desvio Padrão Médio	-42,773 dBm	-50,003 dBm
SNR	23,279 dB	22,018 dB
Perda de Inserção	5,023 dB	4,942 dB

Fonte: A autora

As diferenças entre sensibilidades obtidas para um mesmo dispositivo (comparando a Figura 4.6 com a Figura 4.7 e a Figura 4.10 com a Figura 4.11) podem ser possivelmente justificadas pelo uso de distintos equipamentos entre os experimentos.

Nota-se que, para ambos os dispositivos, as sensibilidades dos experimentos analisados com OSA - onde a largura de linha é muito menor - são superiores aos dos experimentos analisados com os fotodetetores, provavelmente pelo fato de medirem a potência em $\lambda = 1550$ nm, enquanto o fotodetector capta a resposta de comprimentos de onda vizinhos. Outro ponto a ser considerado é a quantidade de amostras utilizadas em cada experimento, enquanto o resultado do experimento com o OSA refere-se a $N = 1$ medição, o resultado do experimento com fotodetector engloba $N = 300$ medições.

Observando as Figuras 4.4 e 4.8, é notável que o dispositivo MNM possui uma curva característica mais acentuada e profunda, contribuindo para sua maior sensibilidade. Sobre o deslocamento da curva característica, é válido questionar-se se um dispositivo exibe um deslocamento maior à medida que o índice de refração aumenta. A Tabela 4.2 apresenta os comprimentos de onda referentes aos mínimos da curva de potência para diferentes meios. Entretanto, não são consideradas medidas confiáveis dada a alta influência de ruído nessas regiões, de forma que é inconclusiva a questão do deslocamento da curva.

Tabela 4.2: Comprimentos de onda da potência mínima

Meio	MSM	MNM
Água	1.561,9 nm	1.538,8 nm
Eletrólito 1.100 g/L	1.566,1 nm	1.540,6 nm
Eletrólito 1.290 g/L	1.567,9 nm	1.543,8 nm

Fonte: A autora

Uma possível explicação para a maior sensibilidade do dispositivo MNM pode ser o fato de que, no dispositivo MSM, o modo guiado pela SMF não interage com o meio externo, diminuindo a influência deste na interferência. Além disso, também há de ser considerado o acoplamento entre a casca da SMF e o núcleo da multimodo. Sobre o desvio padrão da fibra MSM, uma possível causa pode ser que ele seja

mais sensível a flutuações da potência óptica entregue pelo *laser* por apresentar interferências multimodais na casca e interferência entre os modos da casca SMF e o modo guiado pela SMF na MMF2 enquanto que a MNM apresenta apenas interferência multimodal no trecho NCF.

Os dispositivos apresentam SNR muito próximas. O dispositivo MNM, apesar do menor desvio padrão, opera em regiões de potência mais baixas que o dispositivo MSM, resultando nessa proximidade.

4.2.5 Proposta de Calibração do Sensor

Supondo o processo de calibração sendo realizado utilizando o *laser* e o fotodetetor com o qual será utilizado, conforme mostra a Figura 4.1 e utilizando a normalização da tensão do fotodetetor v_o ⁴ em relação à tensão do fotodetetor da fibra de referência v_{ref} , espera-se obter uma relação linear tipo:

$$\frac{v_o}{v_{ref}} = p = k + S' \rho \quad (4.1)$$

Obtida através da regressão linear dos valores de p_i ⁵ para um valor de densidade de eletrólito ρ_i . Uma vez obtidos os parâmetros k e S' , o valor de densidade de eletrólito, para uma tensão normalizada medida v_m , pode ser calculado por:

$$\rho_m = \frac{v_m - k}{S'} \quad (4.2)$$

⁴Pensando na aplicação, seleciona-se a tensão do fotodetetor com o objetivo de eliminar a necessidade de calcular-se a potência óptica, diminuindo o número de operações a serem realizadas pelo microcontrolador.

⁵Pode ser calculado conforme o experimento de variação de densidade de eletrólito (fotodetector), utilizando-se do valor médio das medições para a parte sensora exposta a um eletrólito de densidade conhecida.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusão

Os dispositivos construídos estão sintonizados em $\lambda = 1550$ nm, de forma que é possível medir a variação de densidade de eletrólito com ambos os casos. O dispositivo MNM, dada a sua curva característica acentuada, possui uma sensibilidade muito superior ao dispositivo MSM, além de ser mais estável. Entretanto, por operar em regiões mais baixas de potência óptica, possui um SNR inferior mas ainda próximo do SNR apresentado pelo dispositivo MSM. Dado que ambos possuem mesmo procedimento de fabricação e custos similares, recomenda-se o uso do dispositivo MNM neste contexto.

5.2 Dificuldades Encontradas

Os primeiros experimentos de variação de densidade de eletrólito com dispositivo MSM utilizaram um *laser* (New Focus® Tunable DWDM TBL3900 Laser) e as medidas obtidas apresentavam grande instabilidade. Ao analisar a estabilidade da potência óptica sem o dispositivo heteronúcleo conectado e seu espectro, concluiu-se que o *laser* entregava potência óptica de forma estável mas sua largura de linha $\delta\lambda < 1$ nm indicavam um comprimento de coerência muito alto. Uma possível explicação seria que as interferências dos campos que compõem o feixe de *laser*, as quais

seriam mantidas pelo longo comprimento, somavam-se aos efeitos de interferência multimodal característicos do dispositivo heteronúcleo, tornando o conjunto muito mais sensível. Desta forma, passou-se a utilizar o Anritsu® OTDR MT9083C2 como fonte de luz e os resultados obtidos se aproximaram do esperado.

Uma considerável dificuldade tem sido o experimento de variação de temperatura, devido à limitação de termômetros que podem ser utilizados - por exemplo, em uma das tentativas, o sensor de temperatura foi dissolvido pelo ácido - e a montagem experimental. Este experimento, não estava previsto no escopo inicial do trabalho e, portanto, não foi concluído até a finalização do trabalho.

5.3 Contribuições do Trabalho

Este trabalho contribui com o desenvolvimento de dois dispositivos transdutores à fibra óptica, os quais podem ser utilizados com um *laser* centralizado em $\lambda = 1550$ nm e fotodetector, viabilizando um sensor de baixo custo, simples fabricação, acurado e que não exige manutenção, o qual pode ser aplicado em baterias chumbo-ácido sem interferir no seu funcionamento e permitindo medições durante sua operação.

Além disso, através da compreensão do ambiente de operação e o contexto de gerenciamento de baterias, elaborou-se um conjunto de requisitos os quais subsidiam uma proposta de arquitetura de sistema para monitoramento de densidade de eletrólito em baterias chumbo-ácido que possa ser integrado a um BESS, a qual prioriza atributos como interoperabilidade, modificabilidade, verificabilidade e robustez. Entretanto, possui uma disponibilidade limitada pelo uso do *laser* de diodo como fonte de estímulo dos sensores.

5.4 Trabalhos Futuros

Os próximos passos concentram-se em investigar o comportamento do sensor em condições mais próximas da aplicação e, uma vez sendo comprovado seu uso em ambiente operacional, dar continuidade ao projeto do sistema. São eles:

- Investigar o efeito da temperatura na resposta do dispositivo MNM: espera-se que o sensor apresente baixa sensibilidade cruzada com a temperatura (Jung et al., 2006).
- Verificar se a vida útil do sensor é superior à da bateria de chumbo-ácido da aplicação: analisar se o dispositivo heteronúcleo mantém as propriedades ópticas ao longo do tempo exposto ao ácido.
- Investigar o efeito da temperatura no fotodetector: verificar se a variação de temperatura do ambiente pode alterar a responsividade do fotodetector escolhido. Se for o caso, uma correção via *hardware* ou *software* deve ser necessária.
- Investigar a resposta do sensor à presença de impurezas no eletrólito.
- Repetir o experimento de variação do eletrólito com *laser* e fotodetectores de baixo custo: espera-se que a resposta mantenha-se linear, uma vez que os experimentos foram conduzidos com uma fonte de luz centrada em $\lambda = 1550$ nm e com largura de linha maior.
- Desenvolver uma técnica e, se necessário, uma estrutura para incorporar os dispositivos na bateria: tendo em vista o mínimo de adaptação de bateria e analisar o melhor posicionamento (perto da placa positiva ou negativa, visto que possuem diferentes taxas de produção de H_2SO_4).
- Estudar a posição mais adequada para o *laser* e fotodetectores no ambiente operacional: identificar um local mais apropriado para esses equipamentos. Existe um compromisso em identificar um local onde não ocorram muitas variações de temperatura bem como verificar se, ao aumentar o comprimento dos segmentos multimodo, há efeitos na resposta do sensor.

Referências

- Alavyoon, F., Eklund, A., Bark, F., Karlsson, R., e Simonsson, D. (1991). Theoretical and experimental studies of free convection and stratification of electrolyte in a lead-acid cell during recharge. *Electrochimica Acta*, 36(14):2153–2164.
- Amici, J., Asinari, P., Ayerbe, E., Barboux, P., Bayle-Guillemaud, P., Behm, R. J., Bercibar, M., Berg, E., Bhowmik, A., Bodoardo, S., et al. (2022). A roadmap for transforming research to invent the batteries of the future designed within the european large scale research initiative battery 2030+. *Advanced Energy Materials*, 12(17):2102785.
- Apăteanu, L., Hollenkamp, A., e Koop, M. (1993). Electrolyte stratification in lead/acid batteries: Effect of grid antimony and relationship to capacity loss. *Journal of power sources*, 46(2-3):239–250.
- Cao-Paz, A. M., Marcos-Acevedo, J., del Río-Vázquez, A., Martínez-Peñalver, C., Lago-Ferreiro, A., Nogueiras-Meléndez, A. A., e Doval-Gandoy, J. (2010). A multi-point sensor based on optical fiber for the measurement of electrolyte density in lead-acid batteries. *Sensors*, 2(4):2587–2608.
- Chang, W. S. C. (2015). *Principles of Optics for Engineers: Diffraction and Modal Analysis*. Cambridge University Press.
- Datta, U., Kalam, A., e Shi, J. (2021). A review of key functionalities of battery energy storage system in renewable energy integrated power systems. *Energy Storage*, 3(5):e224.
- Dawoud, D. S. e Dawoud, P. (2022). *Serial communication protocols and standards*. CRC Press.
- de Oliveira, H. J., da Silva, A. A., e Silva, M. S. P., Alves, H. P., do Nascimento, J. F., e Martins-Filho, J. F. (2023). Refractive index sensors based on cascaded multimode interference hetero-core optical fibers. *Applied Optics*, 62(16):E16–E23.

- Dresch, A., Lacerda, D. P., e Antunes Jr, J. A. V. (2015). *Design Science Research*, páginas 67–102. Springer.
- Ebner, E., Börger, A., Gelbke, M., Zena, E., e Wieger, M. (2013). Temperature-dependent formation of vertical concentration gradients in lead-acid batteries under psoc operation—part 1: Acid stratification. *Electrochimica Acta*, 90:219–225.
- Fraden, J. e King, J. (2010). *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*, volume 3. Springer.
- Ghatak, A. K. e Thyagarajan, K. (1998). *An introduction to fiber optics*. Cambridge University Press.
- Guo, Y. (2005). A sensor of sulfuric acid specific gravity for lead-acid batteries. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 105(2):194–198.
- Guo, Y., Yan, W., e Hu, J. (2006). Effects of electrolyte stratification on performances of flood lead-acid batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 154(1):A1.
- Han, G., Yan, J., Guo, Z., Greenwood, D., Marco, J., e Yu, Y. (2021). A review on various optical fibre sensing methods for batteries. *Renewable and sustainable energy reviews*, 150:111514.
- Huang, J., Boles, S. T., e Tarascon, J.-M. (2022). Sensing as the key to battery lifetime and sustainability. *Nature Sustainability*, 5(3):194–204.
- Jung, Y., Kim, S., Lee, D., e Oh, K. (2006). Compact three segmented multimode fibre modal interferometer for high sensitivity refractive-index measurement. 17(5).
- Linden, D. e Reddy, T. B. (1995). *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill Professional.
- Marcuse, D. (1977). Loss analysis of single-mode fiber splices. *Bell system technical journal*, 56(5):703–718.
- Mohammed, W. S., Mehta, A., e Johnson, E. G. (2004). Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference. *Journal of Lightwave Technology*, 22(2):469.
- Nunamaker Jr, J. F., Chen, M., e Purdin, T. D. (1990). Systems development in information systems research. *Journal of management information systems*, 7(3):89–106.

- Oca, L., Campillo-Robles, J. M., e Bou-Ali, M. M. (2018). Review and analysis of thermophysical properties of a sulfuric acid–water electrolyte. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 63(9):3572–3583.
- Oliveira, C. H. J. d. (2022a). Sensor à fibra óptica heteronúcleo msm para monitoramento da densidade de eletrólito de baterias de chumbo-ácido. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Oliveira, H. J. B. d. (2022b). *Sensores à fibra óptica com dupla camada metálica na faceta e com estrutura heteronúcleo*. PhD thesis, Universidade Federal de Pernambuco.
- Patil, S. S., Labade, V., Kulkarni, N., e Shaligram, A. (2014). Refractometric fiber optic sensor for in-situ monitoring the state-of-charge of a lead acid battery. *Journal of Optical Technology*, 81(3):159–163.
- Pavlov, D. (2011). *Lead-acid batteries: science and technology*. Elsevier.
- Pavlov, D., Kirchev, A., Stoycheva, M., e Monahov, B. (2004). Influence of h₂so₄ concentration on the mechanism of the processes and on the electrochemical activity of the pb/pbo₂/pbso₄ electrode. *Journal of Power Sources*, 137(2):288–308.
- Raijmakers, L. (2018). *Sensorless temperature measurements for advanced battery management systems*. PhD thesis, Delft University of Technology.
- Schulte, D., Sanders, T., Waag, W., Kowal, J., Sauer, D. U., e Karden, E. (2013). Automatic device for continuous measurement of potential distribution and acid stratification in flooded lead-acid batteries. *Journal of power sources*, 221:114–121.
- Sun, H. (2015). *A practical guide to handling laser diode beams*, volume 147. Springer.
- Takamatsu, D., Hirano, T., Yoneyama, A., Kimura, T., Harada, M., Terada, M., e Okoshi, T. (2020). In operando visualization of electrolyte stratification dynamics in lead-acid battery using phase-contrast x-ray imaging. *Chemical Communications*, 56(66):9553–9556.
- Wavelength Electronics (2013). Laser diode driver basics. Technical Report AN-LD13. Rev. A.

Glossário

bateria Dispositivo conversor de energia química em energia elétrica através de uma reação eletroquímica do tipo redox (processo químico no qual ocorre a transferência de elétrons entre espécies químicas - átomos, íons, moléculas).

comunicação serial Processo sequencial de envio e recebimento de dados *bit a bit* através de um barramento de computador ou canal de comunicação (Dawoud e Dawoud, 2022).

célula Unidade básica de conversão eletroquímica. Uma bateria pode ser formada por uma ou mais células eletricamente conectadas (Linden e Reddy, 1995).

Design Science Research Processo de elaboração de artefatos para resolução de problemas, avaliação dos artefatos produzidos e comunicação dos resultados.

disponibilidade A extensão na qual o sistema está disponível para uso quando necessário.

integridade A extensão da proteção contra perda de dados e falta de acurácia.

interoperabilidade Com que facilidade o sistema se interconecta com outros sistemas ou componentes e troca dados.

Modbus RTU Modbus trata-se de um protocolo de comunicação de dados que define uma estrutura das mensagens trocadas entre dispositivos cliente-servidor conectados a diferentes barramentos ou redes. Pertence à camada de aplicação

do modelo OSI. A versão RTU (*Remote Terminal Unit*) refere-se a um protocolo de transmissão serial em que endereços e dados são representados em formato binário, sendo amplamente utilizado em sistemas de automação industrial, como controladores lógicos programáveis (*PLC - Programmable Logic Controllers*) e sistemas supervisórios de controle e aquisição de dados (*SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition*).

modificabilidade Com que facilidade o sistema pode ser compreendido e modificado. Geralmente, refere-se à procedimentos de manutenção (podem ser corretivas, de aperfeiçoamento, adaptativa ou suporte de campo).

robustez Quão bem o sistema responde a condições de operação inesperadas.

RS-485 Padrão de interface de comunicação entre dispositivos que conecta um equipamento terminal de dados (*DTE - Data Terminal Equipment*) a um equipamento de comunicação de dados (*DCE - Data Communication Equipment*) através da definição das características elétricas dos dispositivos utilizados em comunicação serial. Pertence à camada física do modelo OSI. Difere dos seus precedentes por permitir conexão direta entre DTEs e DCEs, conexão de vários DTEs em uma estrutura de rede, comunicação por longas distâncias e taxas de comunicação mais altas. É amplamente utilizado em aplicações de controle e aquisição de dados (Dawoud e Dawoud, 2022).

sensor Dispositivo que transforma um estímulo em sinal elétrico (cuja propriedade pode ser tensão, corrente, carga, frequência, amplitude, fase, polaridade, formato do sinal, atraso no tempo ou código digital)(Fraden e King, 2010).

transdutor Conversor de um tipo de energia ou propriedade em outro tipo de energia ou propriedade (Fraden e King, 2010).

V Model Tipo de representação do ciclo de vida do desenvolvimento de sistemas. Define uma sequência de etapas bem como as atividades performadas em cada uma delas e seus produtos.

verificabilidade O quão prontamente pode-se confirmar que o sistema foi implementado corretamente.

Apêndice A

Especificação de Requisitos

A.1 Descrição Geral

A.1.1 Ambiente de Operação

O sistema deve operar em um ambiente - o qual contém bancos de baterias - cuja temperatura varia de aproximadamente 20°C a 30°C. A temperatura das baterias - medida nos terminais localizados na parte superior - pode variar entre cerca de 15°C a 45°C e há um gradiente de temperatura ao longo do eixo vertical que pode atingir -5°C.

A.1.2 Restrições de Design e Implementação

- O sensor não pode interagir quimicamente com o eletrólito
- O sensor deve ser imune ao campo elétrico formado no interior da bateria em operação
- Para o funcionamento dos sensores empregados, devem ser utilizados fonte de luz discreta (luz espectralmente composta por um determinado comprimento de onda) e fotodetector devido à inviabilidade de se utilizar um analisador espectral óptico para leitura do sinal e diminuição de custos

A.2 Principais *Features*

- O sistema deve disponibilizar informações sobre a densidade do eletrólito em 3 níveis distintos do eixo vertical de uma bateria
- O sensor deve ser capaz de detectar variações de densidades de eletrólito na faixa de 1100 g/L a 1290 g/L

A.3 Requisitos de Interface Externa

No BESS, cada bateria é gerenciada por um módulo conhecido como *Battery Management Unit* (BMU) - conectado ao restante do sistema por uma rede *Controller Area Network* CAN+24 V, o qual pode prover alimentação para o sistema de monitoramento de densidade de eletrólito. Outro componente do BESS trata-se de uma fonte de 24 V - a qual também pode fornecer alimentação aos componentes do sistema. Além disso, também conta com uma rede de sensoramento RS-485 Modbus RTU, a qual deve fornecer um sinal de acionamento para ligar e desligar o sistema bem como receber as informações do mesmo.

Apêndice B

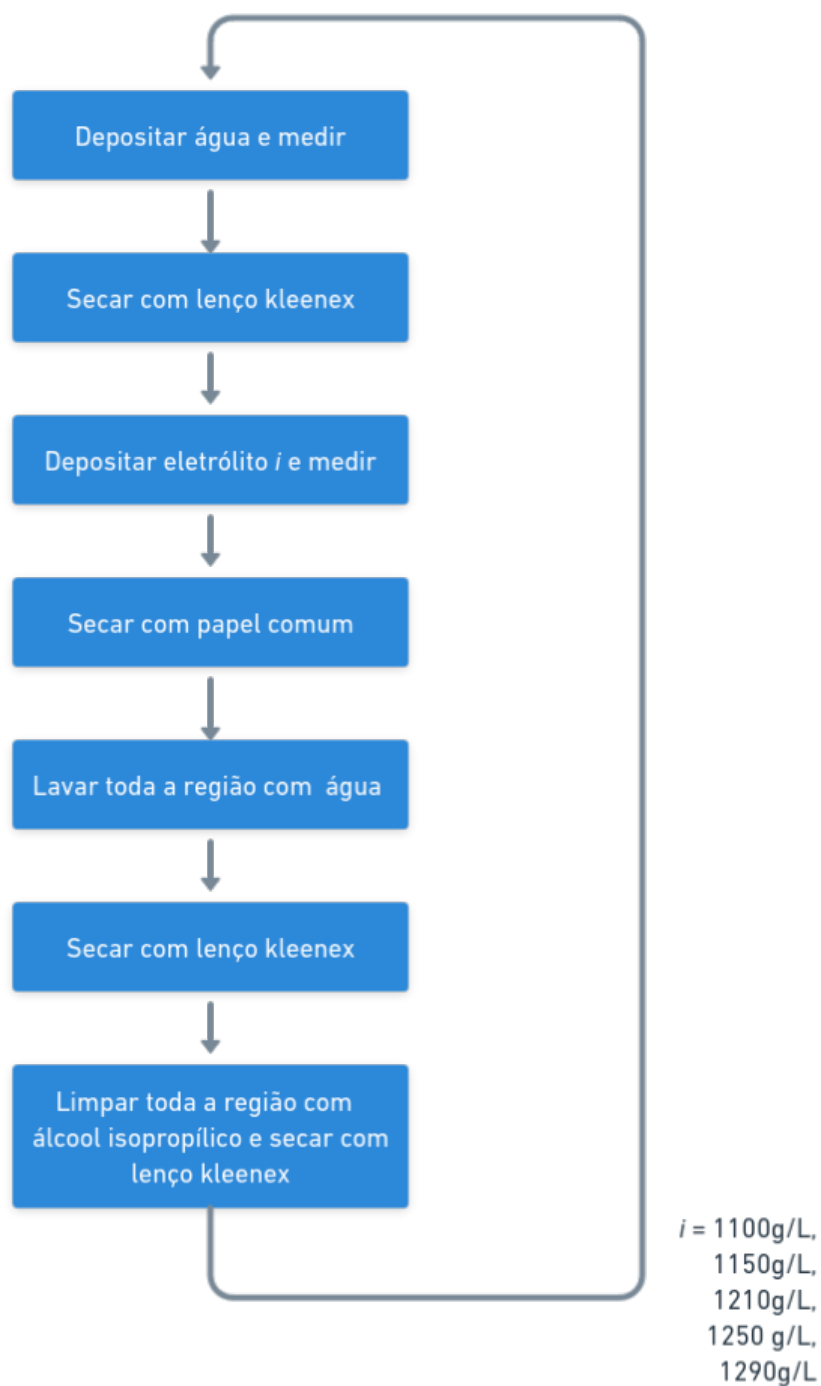
Caracterização das Amostras de Eletrólito

B.1 Materiais

- Soluções de eletrólito disponibilizadas pelo ITEM (1100g/L, 1150g/L, 1210g/L, 1250 g/L, 1290g/L)
- Refratômetro
- Álcool isopropílico
- Água destilada
- Lenços Kleenex[®]
- Papel toalha
- 7 pipetas descartáveis (água, retirada de soluções do refratômetro, 1100g/L, 1150g/L, 1210g/L, 1250 g/L, 1290g/L)

B.2 Método

Figura B.1: Fluxo da Caracterização de Eletrólito



Fonte: A autora

Observações:

1. Utilizar EPI adequado para manuseio do eletrólito

Apêndice C

Fabricação do Dispositivo Heteronúcleo

C.1 Materiais

- Fibra multimodo (MMF) (2 trechos de aprox. 50 cm)
- Fibra monomodo (SMF) (caso MSM)
- No Core Fiber (NCF) Rod-Type fiber 125um NA 0.4 low index coating ID K16180 (caso MNM)
- Fusion Splicer Fitel® S178A ver.2
- Fiber Cleaver Fitel® S326
- Fiber Optic Stripper Jonard® JIC-375
- Paquímetro 0.02x140mm Dial Calipers®
- Álcool isopropílico
- Caneta permanente
- Lenço Kleenex®

- Placa de petri para suporte da parte sensora¹
- Fita crepe
- 2 cabos ópticos Furukawa® COA MM MF

C.2 Método

1. Preparar² MMF1
2. Posicionar extremidade do *coating* no encaixe do segundo *v-groove* (indicado pela seta vermelha na Figura C.1)

Figura C.1: Indicação do *v-groove* no clivador



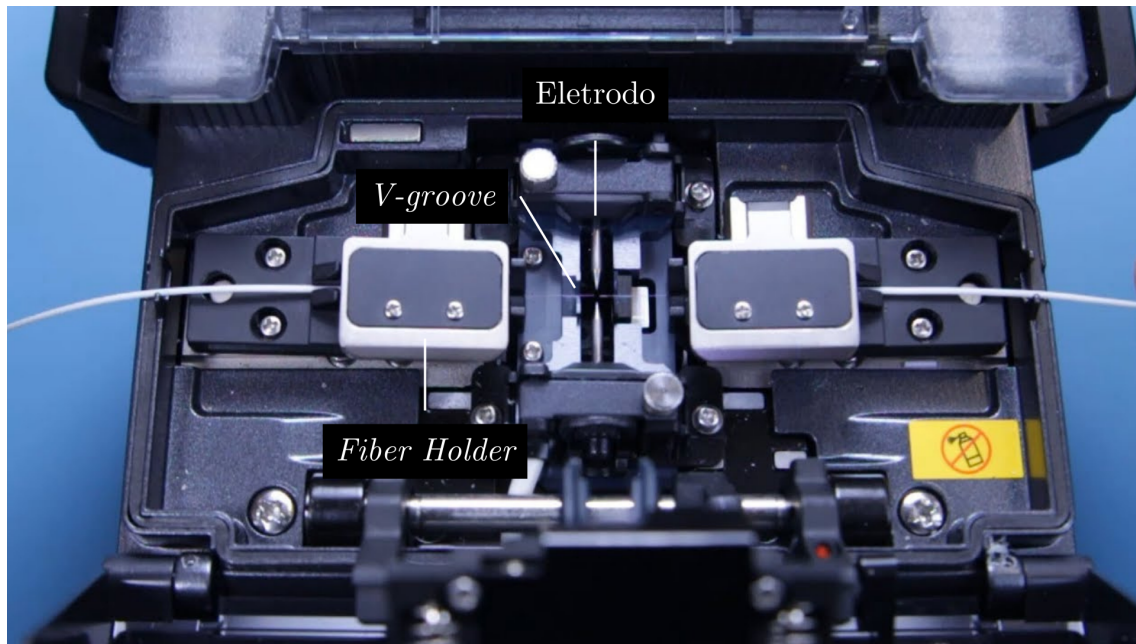
Fonte: Adaptada de fiberopticstools.com

3. Preparar SMF ou NCF
4. Fusionar SMF e MMF1 ou NCF e MMF1:

¹O dispositivo também pode ser fixado diretamente em uma placa de acrílico

²Retirar revestimento (recomenda-se retirar aprox. 6 cm), retirar *coating* (recomenda-se retirar aprox. 3 cm) e limpar com lenço embebido em álcool isopropílico

Figura C.2: Posicionamento das fibras no *splicer*



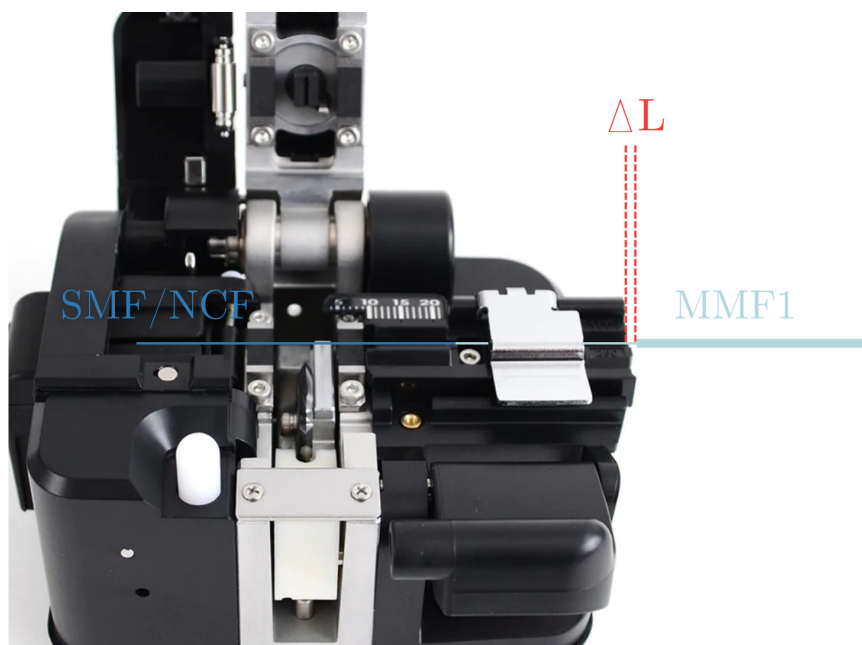
Fonte: Adaptada de outdoorchief.com

- (a) Selecionar programa SMF-MMF (caso MSM) ou NCF-MMF (caso MNM)
 - (b) Abrir *wind shield* e *fiber holders*
 - (c) Colocar a fibra MMF1 no *v-groove* referente ao lado MMF (verificar de acordo com o programa selecionado) com a ponta clivada próxima do eixo dos eletrodos (mas não exatamente no eixo, conforme mostra a Figura C.2) e fechar *fiber holder*
 - (d) Posicionar a fibra SMF/NCF no *v-groove* no lado oposto e fechar *fiber holder* de forma similar ao passo anterior
 - (e) Fechar *wind shield*
 - (f) Executar programa de fusão
5. Para clivar a outra extremidade da SMF/NCF no tamanho adequado, é necessário posicionar a fibra de acordo com a diferença $\Delta L = L - 30mm$, em que L é o comprimento da parte sensora desejado, e compensar distanciando-se ΔL da borda do clivador, conforme ilustrado na Figura C.3³. Caso $\Delta L < 0$,

³Caso $\Delta L > 0$, é possível marcar a distância $\Delta L < 0$ com caneta permanente. Limpar a parte SMF/NCF após manuseio e antes de clivá-la

adentra-se a fibra em relação à borda. Utilizar o paquímetro (com abertura em ΔL) para medir a distância necessária.

Figura C.3: Posicionamento da Fibra na Clivagem da Segunda Extremidade da Fibra NCF

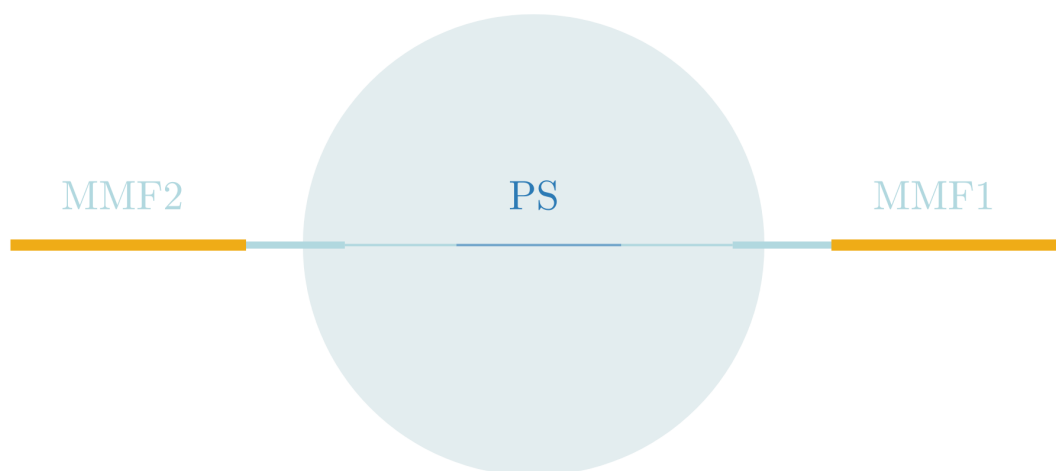


Fonte: Adaptada de fiberopticstools.com

6. Preparar MMF2
7. Fusionar SMF/NCF e MMF2
8. Dispor parte sensora no centro da placa de petri invertida⁴ e limpa com álcool isopropílico - conforme Figura C.4 - verificando a centralização através das emendas e fixar as fibras MMF1 e MMF2 na borda da placa de petri com fita crepe

⁴Utilizar a superfície externa no recipiente para diminuir tensionamentos do dispositivo

Figura C.4: Posicionamento da Fibra na Clivagem da Segunda Extremidade da Fibra Hetero-núcleo



Fonte: A autora

9. Preparar MMFs dos cabos ópticos e fusionar com MMF1 e MMF2 (selecionar programa MMF-MMF)

Observações:

1. Utilizar luvas no manuseio das fibras

Apêndice D

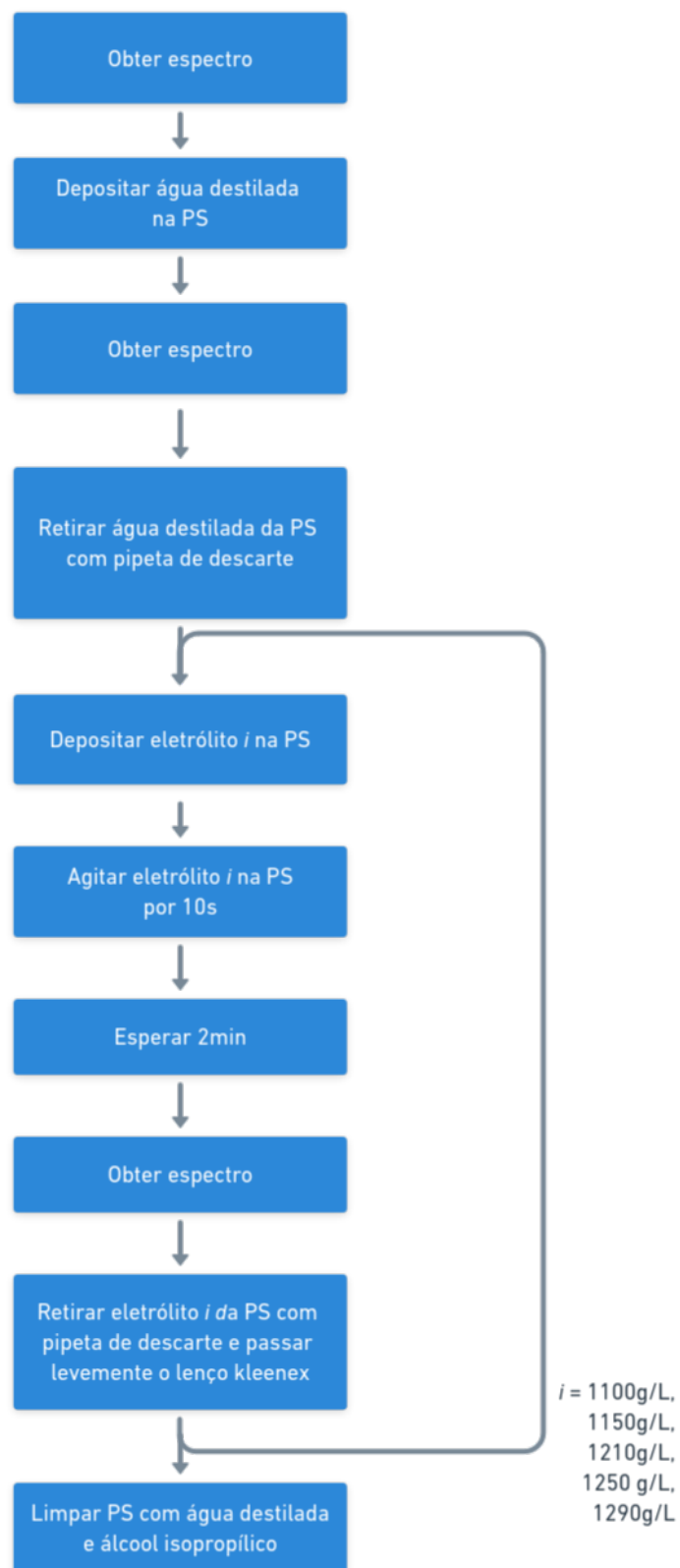
Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)

D.1 Materiais

- Dispositivo heteronúcleo
- Soluções de eletrólito disponibilizadas pelo ITEM (1100g/L, 1150g/L, 1210g/L, 1250 g/L, 1290g/L)
- ANDO® AQ-631SA Optical Spectrum Analyzer (configurações nos arquivos raw)
- Thorlabs® SLS201L/M Compact QTH Light Source (fonte de luz banda larga)
- Álcool isopropílico
- Água destilada
- Lenços Kleenex®
- 7 pipetas descartáveis (água, retirada de soluções da PS, 1100g/L, 1150g/L, 1210g/L, 1250 g/L, 1290g/L)
- Placas de petri (descarte de soluções)

D.2 Método

Figura D.1: Fluxo do Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)



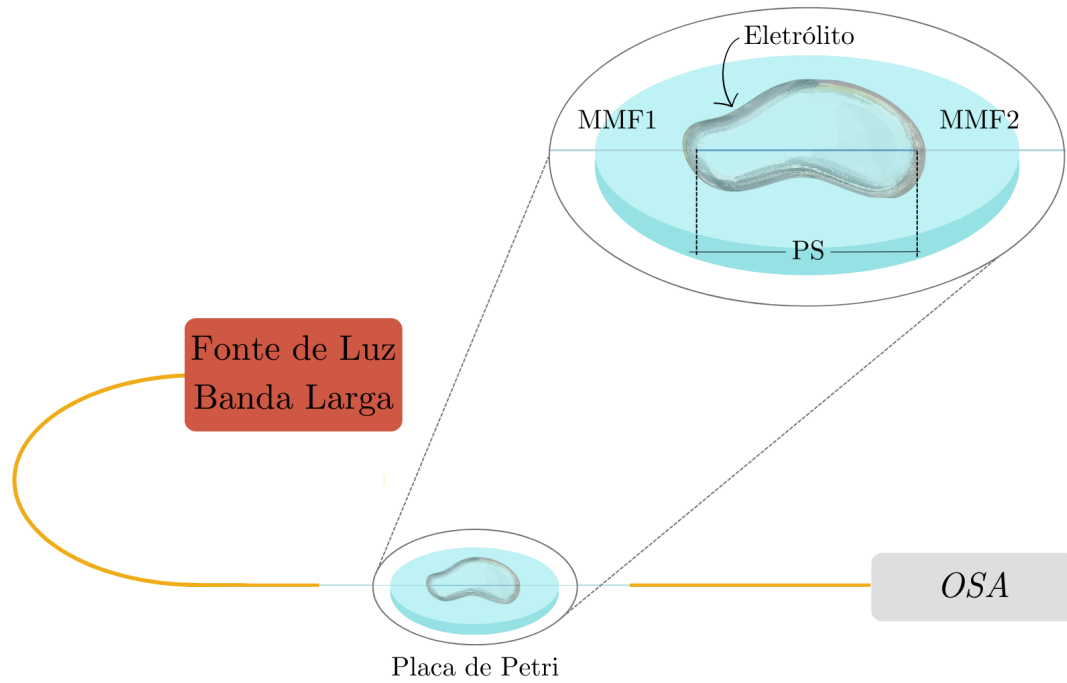
Fonte: A autora

Observações:

1. Limpar conectores dos cabos ópticos e receptores dos equipamentos com álcool isopropílico
2. Conectar os cabos ópticos do dispositivo heteronúcleo ao OSA e à fonte de luz
3. Limpar a região ao redor da PS com álcool isopropílico
4. Ligar equipamentos 30 minutos antes do início do experimento
5. Não se deve utilizar uma mesma pipeta para transferir diferentes soluções de eletrólito de forma que não ocorra contaminação de amostras
6. Utilizar papel toalha para dispor as pipetas e com distância suficiente para que não entrem em contato
7. Utilizar EPI adequado para manuseio do eletrólito
8. O eletrólito é agitado com movimentos de succionar e liberar com a pipeta para PS ser coberta de forma homogênea
9. Depositar eletrólito apenas sobre a parte sensora, de forma que o mesmo não entre em contato com a fibra crepe que é utilizada para fixar o dispositivo na placa para evitar contaminação da amostra

D.3 Montagem Experimental

Figura D.2: Montagem experimental do Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (OSA)



Fonte: A autora

Apêndice E

Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetector)

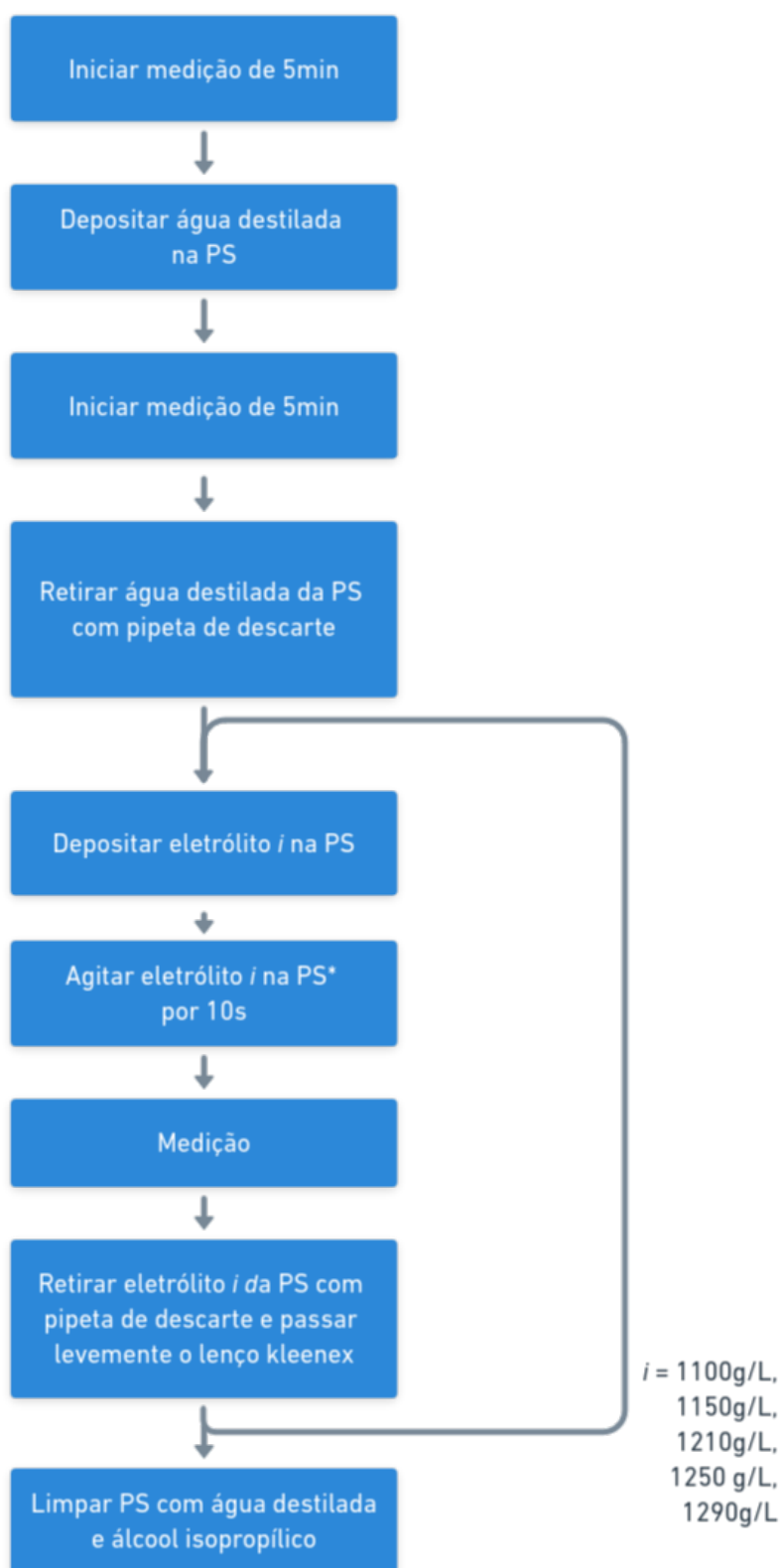
E.1 Materiais

- Dispositivo heteronúcleo
- Soluções de eletrólito disponibilizadas pelo ITEM (1100g/L, 1150g/L, 1210g/L, 1250 g/L, 1290g/L)
- Thorlabs® DET410 Photodetector
- Anritsu® OTDR MT9083C2 SN 6201268811 (*laser* CW 1550nm)
- Agilent® 34401A 6 ½ Digital Multimeter
- Álcool isopropílico
- Água destilada
- Lenços Kleenex®
- 7 pipetas descartáveis (água, retirada de soluções da PS, 1100g/L, 1150g/L, 1210g/L, 1250 g/L, 1290g/L)

- Placas de petri (descarte de soluções)
- Código de aquisição (período de amostragem de 1 segundo, tempo total de 5 minutos por medição)

E.2 Método

Figura E.1: Fluxo do Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetector)



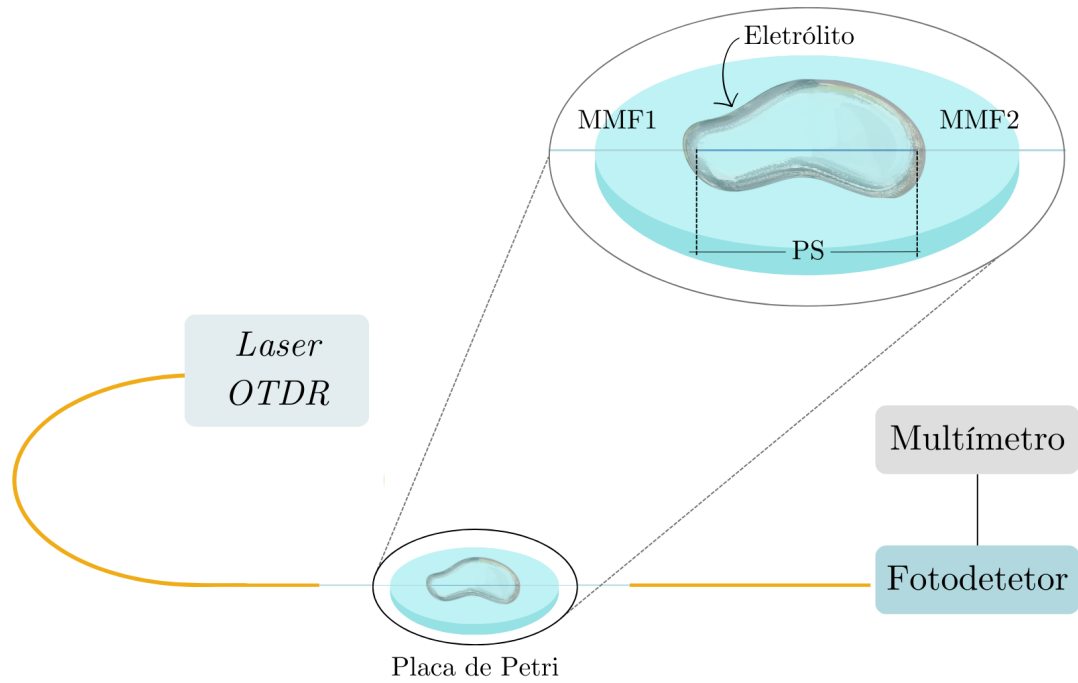
Fonte: A autora

Observações:

1. Limpar conectores dos cabos ópticos e receptores dos equipamentos com álcool isopropílico
2. Conectar os cabos ópticos do dispositivo heteronúcleo fotodetector e ao *laser*
3. Limpar a região ao redor da PS com álcool isopropílico
4. Ligar equipamentos 30 minutos antes do início do experimento
5. Não se deve utilizar uma mesma pipeta para transferir diferentes soluções de eletrólito de forma que não ocorra contaminação de amostras
6. Utilizar papel toalha para dispor as pipetas e com distância suficiente para que não entrem em contato
7. Utilizar EPI adequado para manuseio do eletrólito
8. O eletrólito é agitado com movimentos de succionar e liberar com a pipeta para PS ser coberta de forma homogênea
9. Depositar eletrólito apenas sobre a parte sensora, de forma que o mesmo não entre em contato com a fibra crepe que é utilizada para fixar o dispositivo na placa para evitar contaminação da amostra

E.3 Montagem Experimental

Figura E.2: Montagem experimental do Experimento de Variação de Densidade de Eletrólito (Fotodetetor)



Fonte: A autora