



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE BELO JARDIM
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

PEDRO SIQUEIRA NETO

**SENSOR À FIBRA ÓPTICA PARA O MONITORAMENTO DE ELETRÓLITO EM
BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO**

Belo Jardim
2026

PEDRO SIQUEIRA NETO

**SENSOR À FIBRA ÓPTICA PARA O MONITORAMENTO DE ELETRÓLITO EM
BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade
Federal Rural de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Patriota Alves,

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Nubia Matos – CRB-4 2234

S563s Siqueira Neto, Pedro.

Sensor à fibra óptica para o monitoramento de eletrólito em baterias de chumbo-ácido / Pedro Siqueira Neto. – Belo Jardim, 2026.
58 f.; il.

Orientador(a): Henrique Patriota Alves.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Belo Jardim - UABJ, Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, Belo Jardim, BR-PE, 2026.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Eletrólitos. 2. Bateria (chumbo-ácido) . 3. Sensores à fibra óptica. 4. Fotônica 5. Instrumentação - óptica eletrônica . I. Alves, Henrique Patriota, orient. II. Título

CDD 629.895

PEDRO SIQUEIRA NETO

**SENSOR À FIBRA ÓPTICA PARA O MONITORAMENTO DE ELETRÓLITO EM
BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade
Federal Rural de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 14 de Julho de 2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Henrique Patriota Alves (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Moisés Tavares da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Raoni de Freitas Góis (Examinador Externo)
Membro Externo Universidade de Pernambuco

Prof. Mr. Thales Henrique Castro de Barros (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

A todos aqueles que me apoiaram, acreditaram na minha caminhada e estiveram ao meu lado durante todos esses anos, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Henrique Patriota Alves, pela orientação, apoio e dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho, principalmente pela paciência e pelas valiosas discussões e orientações que contribuíram significativamente para a realização deste trabalho.

Agradeço também à Universidade Federal de Pernambuco, em especial, ao Laboratório de Fotônica, pelo suporte computacional fornecido para a realização das simulações e estudos desenvolvidos nesse TCC.

Agradeço à minha mãe, Andrea, ao meu pai, Gutemberg, e ao meu irmão, Gustavo, pelo apoio, incentivo e presença constante ao longo da minha trajetória.

Expresso minha profunda gratidão aos meus amigos que me acompanham desde o ensino médio, Ana Luiza, Levi, Rebeca e Yasmin.

Aos amigos de curso, Douglas, Márcio, Maria Clara e Alysson, agradeço por todo o incentivo e por sempre acreditarem no meu potencial. Estendo também os meus agradecimentos a Alana e Guilherme, que, mesmo sendo de outros cursos da faculdade, fizeram parte dessa jornada e me apoiaram muito.

Agradeço aos meus colegas de estágio Alan, Beatriz, Eduardo e Nunes pela parceria, colaboração e companheirismo ao longo desta jornada.

”Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração.”(Nikola Tesla, 1997)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma modelagem computacional de dois sensores à fibra óptica com perfil D para monitoramento do eletrólito presente em baterias de chumbo-ácido. O primeiro dispositivo é um sensor multiponto de nível baseado em fibra óptica de plástico com perfis D inseridos em cascata, que pode ser utilizado para realizar medições indiretas do volume do eletrólito. Já o segundo modelo é um sensor monoponto, também baseado em fibra óptica com perfil D, proposto para mensurar variações da concentração de eletrólito. A modelagem desses dispositivos foi implementada em no *software* dedicado COMSOL *Multiphysics*, que é baseado no método dos elementos finitos (FEM). Para o primeiro dispositivo proposto, é apresentado um dispositivo com 10 elementos que atuam como uma régua de nível em uma única fibra óptica de plástico, capaz de mensurar a altura da coluna de líquido do eletrólito a partir da análise da transmitância na saída do sensor. Já o segundo dispositivo modelado permitiu detectar variações na concentração do eletrólito, com uma resposta linear para uma faixa de detecção de 90 % a 100 %, com sensibilidade de 9,11 dB/%. Adicionalmente, foi implementada no Simulink/MATLAB uma instrumentação optoeletrônica para simular um sistema de aquisição de dados para os dispositivos modelados. Os resultados obtidos apresentam a conversão do sinal óptico para um sinal elétrico de tensão e a recuperação das variáveis de interesse: nível de líquido e concentração.

Palavras-chave: bateria de chumbo-ácido, eletrólito, fotônica, instrumentação optoeletrônica, sensores à fibra óptica.

ABSTRACT

This work presents computational modeling for two D-shaped optical fiber sensors designed to monitor the electrolyte in lead-acid batteries. The first device is a multipoint level sensor based on plastic optical fiber with cascaded D-shape profiles, which enables indirect measurement of the electrolyte volume. The second model is a single-point D-shaped optical fiber sensor proposed to measure variations in electrolyte concentration. The modeling of these devices was implemented in the dedicated software COMSOL Multiphysics, which is based on the finite element method (FEM). For the first proposed device, a configuration with 10 elements functions as a liquid level gauge on a single plastic optical fiber, measuring the height of the electrolyte column through transmittance analysis at the sensor output. The second modeled device detected variations in electrolyte concentration, demonstrating a linear response across a detection range of 90 % to 100 %, with a sensitivity of 9.11 dB/%. Additionally, an optoelectronic instrumentation setup was implemented in Simulink/MATLAB to simulate a data acquisition system for the modeled sensors. The results show the conversion of the optical signal into an electrical voltage signal and the recovery of the variables of interest: liquid level and concentration.

Keywords: electrolyte, fiber optic sensors, lead-acid battery, optoelectronic instrumentation, photonics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Composição de uma bateria de chumbo-ácido.	18
Figura 2 – Funcionamento básico da fibra óptica.	21
Figura 3 – Geometria da fibra óptica plástica com perfil D utilizada na modelagem do sensor (representação esquemática fora de proporção). (a) vista em perspectiva. (b) seção transversal.	23
Figura 4 – Ilustração dos processos optoeletrônicos em uma junção p-n: (a) diagrama de bandas de energia de um LED e (b) Estrutura típica de um LED.	25
Figura 5 – Ilustração dos processos optoeletrônicos em uma junção p-n: (a) diagrama de bandas de energia de um fotodetector e (b) seção transversal da estrutura de um fotodetector.	26
Figura 6 – Conversor básico de corrente para tensão (conversor I-V).	28
Figura 7 – Tipos de elementos finitos para diferentes geometrias.	29
Figura 8 – (a) Região da solução; (b) Discretização por elementos finitos.	29
Figura 9 – Modelo base para fibra com perfil D.	32
Figura 10 – Esquema simplificado da seção longitudinal do sensor de nível de eletrólito modelado no COMSOL <i>Multiphysics</i>	33
Figura 11 – Discretização do modelo implementado com malha retangular.	34
Figura 12 – Diagrama da instrumentação do sistema.	36
Figura 13 – Instrumentação optoeletrônica implementada no Simulink.	37
Figura 14 – Distribuição do módulo do campo elétrico ao longo da geometria do sensor de nível de eletrólito, medida em V/m.	40
Figura 15 – Transmitância como função da variação da altura da coluna de líquido da solução eletrolítica.	41
Figura 16 – Transmitância em função do número de elementos sensores na solução eletrolítica.	42
Figura 17 – Distribuição do módulo do campo elétrico ao longo da geometria do sensor de concentração de eletrólito, medida em V/m.	43
Figura 18 – Transmitância em função da concentração de eletrólito. Dados da simulação do elemento sensor e ajuste linear.	43
Figura 19 – Gráfico da tensão em função do tempo. Resposta da instrumentação para o sinal de tensão amostrado em função do tempo para a aquisição de dados com o sensor de nível de eletrólito.	45
Figura 20 – Gráfico da variação do nível de eletrólito em função do tempo. Resposta da instrumentação para a recuperação da variável de interesse (nível de eletrólito).	45

Figura 21 – Gráfico da tensão em função do tempo para o sensor de concentração de eletrólito. Resposta da instrumentação para o sinal de tensão amostrado em função do tempo.	46
Figura 22 – Gráfico da variação da concentração de eletrólito em função do tempo. Resposta da instrumentação para o resgate da grandeza de interesse, para uma variação na concentração em função do tempo.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros ópticos e geométricos utilizados no estudo para o sensor de nível.	33
Tabela 2 – Parâmetros ópticos e geométricos utilizados no estudo para o sensor de concentração.	35
Tabela 3 – Relação de parâmetros para os modelos de transmitância linear.	44
Tabela 4 – Figuras de mérito dos sensores propostos.	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Organização do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Baterias de Chumbo-Ácido	18
2.1.1	Princípio Eletroquímico de Funcionamento	19
2.1.2	Eletrólito e Estado de Carga (SoC)	19
2.1.3	Degradação, Sulfatação e Monitoramento	20
2.2	Sensores à Fibra Óptica com Perfil D	21
2.2.1	Propagação da Luz e Fibras Ópticas	21
2.2.2	Sistemas de Sensoriamento à Fibra Óptica	22
2.2.3	Instrumentação Optoeletrônica	24
2.2.3.1	Fontes Emissoras	25
2.2.3.2	Fotodetectores	26
2.2.3.3	Condicionamento do sinal	27
2.3	Método dos Elementos Finitos via COMSOL <i>Multiphysics</i>	28
2.3.1	Fundamentos do Método dos Elementos Finitos	29
2.3.2	Modelagem Eletromagnética no COMSOL	30
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	31
3.1	Design dos Elementos Sensores	31
3.2	Implementação do Modelo no COMSOL <i>Multiphysics</i>	32
3.2.1	Sensor de Nível de Eletrólito	32
3.2.2	Sensor de Concentração de Eletrólito	34
3.3	Instrumentação via Simulink/MATLAB	35
3.4	Rotinas de Testes e Caracterização	38
4	RESULTADOS	40
4.1	Resultados no COMSOL	40
4.2	Resultados da Simulação da Instrumentação no Simulink	44
4.3	Figuras de Mérito dos Sensores Modelados	47
5	CONCLUSÕES	50
5.1	Contribuições do Trabalho	50

5.2	Perspectivas de Trabalhos Futuros	51
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A – LISTA DE PUBLICAÇÕES	57

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os contextos e as motivações que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho, abordando a importância da demanda por armazenamento de energia estacionária e apresentando como as baterias de chumbo-ácido ainda permanecem amplamente utilizadas no mercado, além do seu funcionamento. Também são destacados alguns obstáculos significativos que são enfrentados no monitoramento de seu estado operacional, a mensuração do estado atual do eletrólito e suas propriedades, que por muitas vezes, é limitada por métodos que necessitam de equipamentos sofisticados ou outros que apresentam uma baixa precisão.

1.1 Motivação

O contínuo crescimento da demanda global por eletricidade e as metas de mitigação das mudanças climáticas têm acelerado a integração de fontes renováveis de energia, como a eólica e solar, à matriz energética. No entanto, a intermitência inerente a essas fontes provoca flutuações de potência que afetam diretamente a confiabilidade, a resiliência e a estabilidade das redes elétricas (HOSSAIN et al., 2020). Diante desse desafio, os Sistemas de Armazenamento de Energia (*Energy Storage Systems* – ESS) se consolidam como a abordagem mais viável e promissora para mitigar tais oscilações, armazenando a energia excedente e despachando-a nos momentos de escassez ou alta demanda, equilibrando assim a geração e o consumo (HOSSAIN et al., 2020).

A avaliação confiável da perda prematura de capacidade de carga e do estado de saúde (*State of Health* – SoH) de baterias estacionárias é um desafio de manutenção e segurança, uma vez que as alterações registradas apenas na resistência interna e no potencial muitas vezes não fornecem indicações precisas sobre o início da degradação do sistema (MAJCHRZYCKI; ŚWIERCZYŃSKI et al., 2018). Para contornar essas limitações, métodos baseados na análise de parâmetros elétricos têm ganhado destaque, especialmente, a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), que se apresenta como uma ferramenta diagnóstica alternativa, rápida e não destrutiva. Trata-se de uma técnica amplamente utilizada na caracterização de baterias, pois permite analisar processos internos como resistência ôhmica, transferência de carga e difusão iônica por meio da resposta em frequência do sistema (MAJCHRZYCKI; ŚWIERCZYŃSKI et al., 2018). No entanto, sua aplicação no monitoramento contínuo do estado de saúde apresenta limitações relevantes. A técnica requer condições de pequeno sinal e regime estacionário, o que dificulta sua utilização durante a operação real da bateria. Além disso, a aquisição de dados, especialmente em baixas frequências, pode ser demorada, comprometendo o uso em tempo real. A resposta de impedância também é fortemente influenciada por variáveis

como temperatura e estado de carga, o que introduz ambiguidades na interpretação dos resultados. Soma-se a isso a dependência de modelos equivalentes para análise, que nem sempre representam de forma única os fenômenos físicos envolvidos (MAJCHRZYCKI; ŚWIERCZYŃSKI et al., 2018). Com isso, embora a EIE seja uma ferramenta robusta para diagnóstico em laboratório, suas limitações operacionais e interpretativas motivam a investigação de técnicas alternativas que possibilitam o monitoramento mais direto, local e potencialmente em tempo real de parâmetros da bateria, em especial, o eletrólito.

Diante das limitações dos métodos de análise de parâmetros puramente elétricos, o monitoramento direto do nível do eletrólito surge como uma metodologia inovadora e mais precisa. Para essa finalidade, o uso de sensores de fibra óptica representar uma importante inovação tecnológica para o setor, sobretudo, considerando as vantagens inerentes aos sistemas de sensoramento a fibra óptica: imunidade a interferências eletromagnéticas, baixo peso, tamanho reduzido, além de alta sensibilidade, seletividade, não degradação com o meio sob análise e versatilidade (HAUS, 2010), diversos estudos na literatura demonstram a eficácia dos sensores à fibra óptica em uma ampla gama de aplicações, incluindo a detecção de adulterantes, o monitoramento, bem como o controle de processos industriais (OLIVEIRA et al., 2023; BARROS et al., 2024b; BEZERRA et al., 2025; ZHAO et al., 2024; BARROS et al., 2021; SILVA et al., 2023; MIRANDA et al., 2025; BARROS et al., 2022).

Diversas abordagens ópticas têm sido investigadas para o monitoramento interno de baterias de chumbo-ácido através da medição do índice de refração e do nível do eletrólito. O sistema baseado em fibras plásticas em curvatura, proposto por Cao-Paz et al. (CAO-PAZ et al., 2010), utiliza múltiplos pontos de medição e se baseia na perda de luz por curvatura, correlacionando diretamente a atenuação da intensidade luminosa transmitida com as mudanças na densidade do eletrólito. Já o sensor com cavidades circulares, proposto por Ye et al. (YE et al., 2023), emprega uma fibra com fendas usinadas que expõem o campo evanescente da luz. Essa estrutura híbrida permite quantificar o nível do líquido em degraus discretos e, simultaneamente, medir o índice de refração de forma contínua. Uma abordagem por ressonância de plásmons de superfície (SPR) é obtida no trabalho proposto por Zhao et al. (ZHAO et al., 2024), que se baseia em uma sonda reflexiva revestida com um filme fino de ouro. O monitoramento ocorre através da análise espectral do deslocamento do comprimento de onda de ressonância, devido às variações nas propriedades químicas do eletrólito. Por fim, o sensor baseado em fibra óptica heteronúcleo é proposto por Barros et al. (BARROS et al., 2024a), que utiliza a fusão de seções de fibras ópticas com núcleos de diâmetros distintos para aumentar o campo evanescente no trecho de fibra óptica com núcleo de tamanho diferente, gerando uma interferência multimodal. O deslocamento dos vales no padrão de interferência ocorre devido às alterações na densidade do eletrólito.

Com base nesse contexto, este trabalho propõe dois sensores para aplicação em baterias de chumbo-ácido: um sensor multiponto de nível de líquidos, para o monitoramento

do nível de eletrólito, e um outro sensor para monitorar a concentração de eletrólitos. Tratam-se de dispositivos que se complementam, com objetivo de se obter um monitoramento de alta precisão do real estado de baterias de chumbo-ácido. Os sensores propostos foram modelados no *software* COMSOL *Multiphysics*, que é baseado no método dos elementos finitos, e permite a realização de estudos de desempenho de cada dispositivo proposto, com base em análises de parâmetros ópticos e geométricos. Além disso, com o objetivo de analisar o comportamento dos sensores propostos em um link sensor, é apresentada uma simulação, via Simulink/MATLAB, de uma instrumentação optoeletrônica para a aquisição de dados desses dispositivos.

1.2 Objetivos

Nesta seção, são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho de conclusão de curso.

1.2.1 Objetivo Geral

Modelar sensores baseado em fibra óptica para o monitoramento de eletrólito em baterias de chumbo-ácido.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o levantamento bibliográfico e o estudo teórico sobre baterias chumbo-ácido, sensores de fibra óptica baseados em polímeros com perfil D e os fundamentos do Método dos Elementos Finitos (MEF).
- Introduzir o *software* COMSOL *Multiphysics* como ferramenta de simulação e sua aplicabilidade na modelagem de sensores ópticos.
- Desenvolver um modelo de simulação no Simulink/MATLAB para analisar o comportamento da instrumentação optoeletrônica para aquisição de dados dos sensores propostos.
- Discutir as principais limitações dos sensores propostos e destacar as possíveis melhorias para trabalhos futuros.

1.3 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)

Este Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 corresponde a esta introdução, na qual são apresentados o contexto do estudo, sua motivação e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, são abordados os conceitos relacionados às baterias de chumbo-ácido, incluindo seu princípio de funcionamento e suas principais características. Em

seguida, são apresentados os fundamentos dos sensores à fibra óptica, discutindo aspectos como a propagação da luz na fibra óptica e os principais sistemas de sensoriamento baseados nessa tecnologia. Também são apresentados outros sistemas de sensoriamento utilizados para o monitoramento de nível em baterias. O capítulo traz uma breve introdução ao *software* COMSOL *Multiphysics*, bem como ao Método dos Elementos Finitos, que é utilizado na modelagem e simulação do sensor proposto. Por fim, uma breve introdução sobre instrumentação optoeletrônica, os principais dispositivos e o funcionamento básico desse tipo de sistema de detecção de sinais ópticos.

O Capítulo 3 descreve a modelagem computacional do sensor desenvolvido. Neste capítulo, são apresentados os parâmetros utilizados na simulação, incluindo os parâmetros físicos do sistema e as configurações empregadas no ambiente do *software*, como a definição da malha para a discretização do modelo. Além disso, são apresentados os procedimentos adotados para a realização dos testes e para a validação do modelo proposto. Por fim, uma breve apresentação sobre o MATLAB/Simulink, e a instrumentação proposta, apresentando os componentes que foram selecionados no sistema, para uma aplicação com o sensor proposto.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações computacionais dos sensores apresentados ao longo do trabalho. São apresentados os resultados dos dispositivos modelados no COMSOL *software* e os comportamentos obtidos pelos mesmo, além de figuras de mérito que qualificam os dispositivos e gráficos com as curvas características dos sensores modelados. Também são apresentados os resultados da instrumentação implementada via Simulink/MATLAB, são discutidos os resultados obtidos na instrumentação simulada, estabelecendo uma correlação entre a resposta óptica do sensor e o sinal elétrico gerado pelo sistema de medição.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho, destacando as principais contribuições da pesquisa, os impactos da modelagem desenvolvida, as limitações observadas e conclusões obtidas em função dos resultados apresentados. Além disso, são apresentadas perspectivas para trabalhos futuros, como possíveis melhorias para os dispositivos modelados.

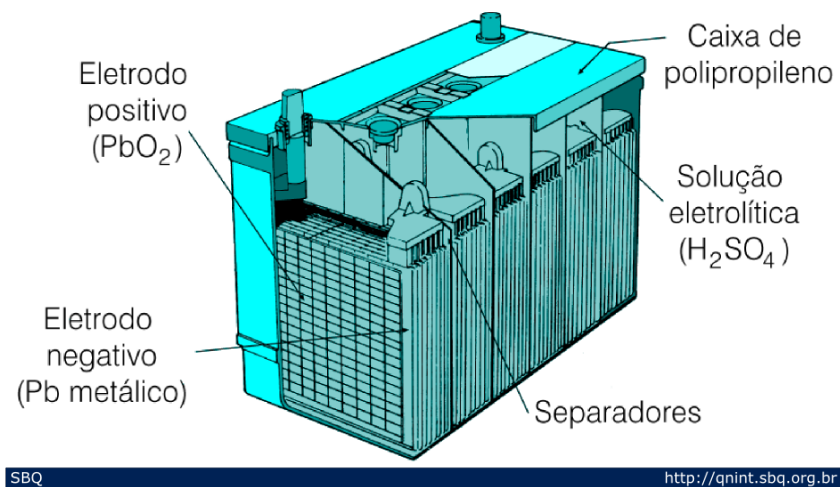
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica dos principais conceitos que serão abordados ao longo deste trabalho. Na Seção 2.1, são discutidos os fundamentos e o funcionamento das baterias de chumbo-ácido e as principais técnicas para o monitoramento de seus parâmetros internos, além de apresentar as principais causas de mal funcionamento dessas baterias, desde a produção ao uso contínuo. Na Seção 2.2, é apresentada uma revisão da literatura sobre sensores à base de fibra óptica, apresentando seus princípios físicos, vantagens de utilização, tipos de sensores que podem ser feitos, além do contexto de sua utilização. Na Seção 2.3, são apresentados os recursos da modelagem computacional por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizado no COMSOL *Multiphysics*, e sua utilização para a simulação do dispositivo proposto.

2.1 Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido são uma das tecnologias de armazenamento de energia mais estabelecidas e usadas em diversos setores como indústria, veículos e telecomunicações. Sua durabilidade, custo acessível e confiabilidade tornaram elas essenciais em sistemas de energia renovável e fontes de alimentação ininterrupta (UPS - *Uninterruptible Power Supplies*) para controle de automação e produção (YANG et al., 2018). Mesmo com o surgimento das baterias de íons de lítio, e outro tipos baterias, a capacidade das baterias de chumbo-ácido em fornecer correntes de pico elevadas garante sua importância em aplicações diversas, visto que a medida que o tempo passa, esse método se torna cada vez mais eficiente e confiável (PAVLOV, 2011).

Figura 1 – Composição de uma bateria de chumbo-ácido.



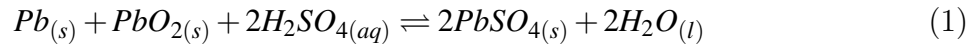
Fonte: Bocchi, 2000.

A Figura 1 ilustra a estrutura interna e a composição química fundamental de uma célula de bateria de chumbo-ácido convencional. Esse sistema eletroquímico de armazenamento de energia se baseia em um eletrodo positivo constituído de dióxido de chumbo e um eletrodo negativo formado por chumbo metálico, ambos imersos em uma solução eletrolítica aquosa de ácido sulfúrico (PAVLOV, 2011).

2.1.1 Princípio Eletroquímico de Funcionamento

Uma célula padrão de chumbo-ácido é composta essencialmente por um eletrodo positivo de dióxido de chumbo (PbO_2), um eletrodo negativo de chumbo esponjoso (Pb) e um eletrólito que consiste em uma solução aquosa de ácido sulfúrico (H_2SO_4). As reações eletroquímicas que ocorrem durante os ciclos de carga e descarga envolvem a conversão do material ativo de ambos os eletrodos em sulfato de chumbo ($PbSO_4$) (LINDEN; REDDY, 2001).

A equação global reversível que descreve o funcionamento do acumulador é dada por:



No eletrodo positivo (cátodo):



No eletrodo negativo (ânodo):



Conforme evidenciado pelas equações, o processo de descarga consome ativamente os íons de sulfato presentes no eletrólito e produz água. Essa reação resulta em uma diluição gradual do ácido sulfúrico e, conseqüentemente, na queda drástica do nível do eletrólito e da densidade do fluido no interior da bateria, ocorrendo principalmente pela eletrólise da água durante a fase de carga, onde ela é decomposta e liberada como gases hidrogênio e oxigênio (PAVLOV, 2011). À medida que o tempo passa, há a alteração do conteúdo da bateria, ou seja, o uso faz com que ocorra um desgaste interno, que reduz a capacidade de carga da bateria, que altera as propriedades do eletrólito (CONRADT et al., 2023).

2.1.2 Eletrólito e Estado de Carga (SoC)

O eletrólito desempenha um papel crítico não apenas como condutor iônico, mas como reagente limitante no sistema. A variação da densidade (ou massa específica) ρ do ácido sulfúrico está diretamente correlacionada com o Estado de Carga da bateria

(PAVLOV, 2011). Teoricamente, o SoC pode ser estimado de forma linear com base na densidade do eletrólito utilizando a seguinte relação matemática:

$$SoC(\%) = \left(\frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que ρ_{max} é a densidade do eletrólito em estado de carga total (geralmente variando entre 1,26 g/cm³ e 1,30 g/cm³, dependendo da aplicação industrial) e ρ_{min} é a densidade na condição de descarga completa. O monitoramento contínuo da concentração e do nível do eletrólito é fundamental para garantir a integridade operacional da bateria, uma vez que a exposição das placas ao ar acelera processos de degradação, reduz a vida útil do dispositivo e pode ocasionar falhas em seu funcionamento (YANG et al., 2018).

2.1.3 Degradação, Sulfatação e Monitoramento

Ao longo da vida útil da bateria, condições de operação inadequadas no chão de fábrica, como descargas profundas prolongadas ou a estratificação do eletrólito, podem levar à chamada sulfatação irreversível. A sulfatação consiste na cristalização do sulfato de chumbo em formas espessas e não reativas, reduzindo a área de superfície ativa dos eletrodos e bloqueando os poros das placas, comprometendo o desempenho, a capacidade de armazenamento de energia e a vida útil da bateria (MAJCHRZYCKI; ŚWIERCZYŃSKI et al., 2018).

A degradação física e química dos componentes reflete diretamente no aumento da resistência interna R_{int} da célula. A tensão real nos terminais do dispositivo V_{bat} é reduzida durante a descarga de acordo com essa resistência, por meio da relação mostrada na Equação (5), em que E_0 é a força eletromotriz em circuito aberto e I é a corrente de descarga imposta pela carga (MAJCHRZYCKI; ŚWIERCZYŃSKI et al., 2018):

$$V_{bat} = E_0 - I \cdot R_{int} \quad (5)$$

Técnicas de diagnóstico por *software*, como a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, têm sido utilizadas para estimar a condição interna das baterias de forma indireta, onde a redução do nível do eletrólito eleva a concentração do ácido sulfúrico e a resistência interna da célula, o que acelera a sulfatação irreversível das placas e reduz drasticamente o Estado de Saúde (MAJCHRZYCKI; ŚWIERCZYŃSKI et al., 2018). No entanto, o monitoramento preventivo e direto *in loco* do nível do eletrólito, especialmente por meio de sensores a fibra óptica, que possuem imunidade eletromagnética e resistência à corrosão severa se apresenta como uma alternativa altamente inovadora para detectar a evaporação da água ou vazamentos, prevenindo a sulfatação prematura das placas. Além disso, a escolha por esse tipo de tecnologia fotônica também é justificada pelo fato da fibra óptica não sofrer degradação no ambiente ácido interno à bateria.

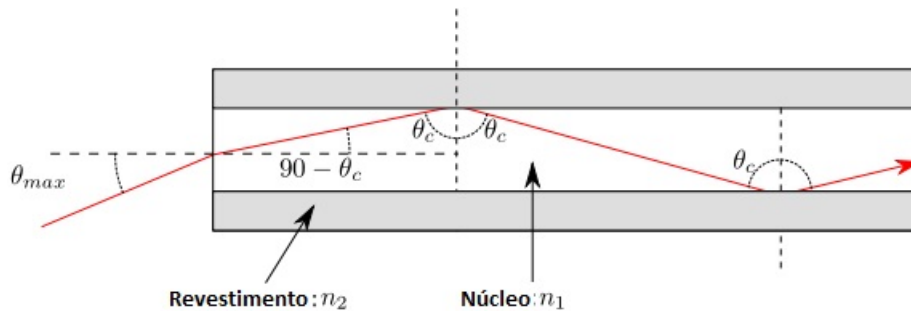
2.2 Sensores à Fibra Óptica com Perfil D

A tecnologia de sensores a fibra óptica tem despertado crescente interesse industrial e acadêmico devido às características inerentes que superam as limitações dos sensores eletrônicos convencionais. Entre suas principais vantagens, destacam-se a imunidade à interferência eletromagnética, segurança intrínseca em ambientes inflamáveis ou explosivos, alta sensibilidade, estabilidade química e a possibilidade de monitoramento remoto (HAUS, 2010; SILVA et al., 2023). No contexto das baterias de chumbo-ácido, que envolvem ambientes com presença de gases reativos e eletrólitos de alta acidez, a fibra óptica se apresenta como uma plataforma de sensoriamento robusta e altamente promissora (CAO-PAZ et al., 2010).

2.2.1 Propagação da Luz e Fibras Ópticas

O princípio fundamental que rege o confinamento e a propagação da luz ao longo de uma fibra óptica convencional é a Reflexão Interna Total (RIT). Uma fibra óptica é composta tipicamente por um núcleo cilíndrico de índice de refração n_1 , envolto por uma casca (ou revestimento) com índice de refração n_2 , de modo que a condição $n_1 > n_2$ seja satisfeita (HAUS, 2010).

Figura 2 – Funcionamento básico da fibra óptica.



Fonte: Vieira, 2021.

A Figura 2 apresenta o funcionamento de uma fibra óptica, e o princípio de capacidade de acoplamento de luz de uma fonte externa, que por sua vez pode ser explicado pela Equação (6), que representa o comportamento destacado acima. Quando um raio de luz incide na interface entre o núcleo e a casca, o seu comportamento é descrito pela Lei de Snell-Descartes, onde θ_1 é o ângulo de incidência e θ_2 é o ângulo de refração, ambos medidos em relação à reta normal da interface (HAUS, 2010).

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (6)$$

Para que a luz permaneça confinada dentro do núcleo, o ângulo de incidência na interface núcleo-casca deve ser superior a um valor crítico (θ_c), no qual o ângulo de refração atinge 90° . Esse ângulo crítico é definido a partir da Equação (6) por

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (7)$$

A capacidade de acoplamento de luz de uma fonte externa na fibra óptica é quantificada pela Abertura Numérica (*NA* - *Numerical Aperture*), definida na Equação (8). Ela está diretamente relacionada ao ângulo máximo de aceitação (θ_a) pelo qual a luz proveniente de um meio externo (geralmente o ar, assumindo $n_0 \approx 1$) consegue sofrer a Reflexão Interna Total na fibra óptica (HAUS, 2010).

$$NA = n_0 \sin(\theta_a) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (8)$$

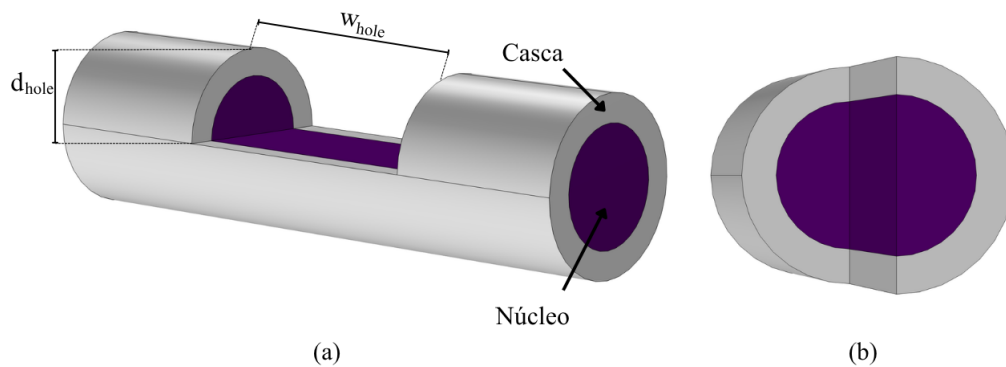
2.2.2 Sistemas de Sensoriamento à Fibra Óptica

Os sistemas de sensoriamento óptico operam com base na modulação de um ou mais parâmetros da luz guiada, como intensidade, fase, comprimento de onda, ou estado de polarização (HAUS, 2010). Para o monitoramento do nível de líquidos e de sua densidade em baterias, os sensores baseados em modulação de intensidade são amplamente explorados. O princípio se baseia na alteração do índice de refração ao redor da fibra quando o eletrólito líquido substitui o ar. Essa alteração no contraste refrativo afeta o acoplamento de ondas evanescentes ou as perdas por espalhamento no líquido (YE et al., 2023). Em fibras ópticas do tipo hetero-núcleo ou macrocurvaturas, as perdas ópticas respondem expressivamente à imersão no eletrólito, variando a potência óptica transmitida de forma proporcional à densidade ou ao nível da solução (BARROS et al., 2024a). Nas fibras hetero-núcleo, uma seção de fibra com núcleo de diâmetro ou índice de refração diferente é inserida entre dois trechos de fibra convencional. Essa descontinuidade provoca o desacoplamento parcial dos modos guiados e a transferência de parte da potência óptica para a casca da fibra óptica, aumentando a interação do campo evanescente com o meio externo (BARROS et al., 2024a). De maneira semelhante, sensores baseados em macrocurvaturas consideram as perdas induzidas pela curvatura da fibra óptica. Quando a fibra é curvada além de um determinado raio, parte dos modos guiados deixa de permanecer confinada ao núcleo e passa a irradiar para a casca e para o meio externo (CAO-PAZ et al., 2010), gerando perdas na intensidade do sinal guiado.

Existem diversas formas de modificações nas fibras ópticas para obter diferentes tipos de sensores. Por exemplo, a fibra com perfil D, onde a fibra sofre um polimento lateral, expondo uma parte do seu comprimento ao meio externo, fazendo com que haja uma interação maior com o mesmo, e expondo o campo evanescente da luz, o que por sua vez, a torna suscetível a variações no meio externo. (LI et al., 2024; ALVES, 2020). A principal vantagem desse tipo de sensor está na grande área plana criada pelo processo de polimento, que facilita a interação com o meio externo, além da possibilidade de deposição de materiais e camadas transdutoras (ALVES, 2020). Um fator a ser considerado sobre

o perfil D, é a presença de rugosidade que é induzido durante o processo de polimento, que atua como parâmetro crítico de desempenho, pois a presença de irregularidades afeta diretamente o comportamento da onda evanescente, diferente de uma superfície lisa, a rugosidade induz um maior espalhamento da luz, aumentando a área de interação efetiva, elevando a sensibilidade do sensor a variações do meio externo (ALVES, 2020; ALVES et al., 2023). Além de outros modelos, como o heteronúcleo, que interpolam fibras com núcleos de tamanhos diferentes, tem-se as fibras com grade de Bragg (FBG - *Fiber Bragg Gratings*), que modulam o índice de refração do núcleo, criando uma estrutura periódica que gera a reflexão de um único comprimento de onda, denominado de comprimento de onda de Bragg. O meio externo pode alterar a periodicidade dessa grade ou o índice de refração efetivo da região em que a grade é inserida, gerando uma mudança no comprimento de onda de Bragg. Esse é o mecanismo de sensoriamento para esse tipo de fibra óptica (LI et al., 2024).

Figura 3 – Geometria da fibra óptica plástica com perfil D utilizada na modelagem do sensor (representação esquemática fora de proporção). (a) vista em perspectiva. (b) seção transversal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 3 apresenta a geometria da fibra óptica de plástico com perfil D, fora de proporção, empregada em diversos tipos de sensores. Na vista lateral em perspectiva, Figura 3(a), pode ser observada a região polida ao longo do comprimento da fibra, região essa que possui comprimento w_{hole} , onde a casca é totalmente retirada e também uma fração do núcleo, ficando exposto ao meio externo. A remoção de parte do núcleo pode variar, sendo representada pela profundidade do perfil D, d_{hole} , parâmetro que influencia a intensidade da interação óptica do sensor com o meio externo. Já a vista transversal, Figura 3(b), evidência a seção da fibra na região do perfil D, apresentando o núcleo (em roxo), e a casca (em cinza), dando ênfase no formato em semelhante à letra "D", característica que dá origem ao nome "perfil D" (ALVES, 2020).

Recentes avanços também exploram sensores reflexivos baseados em Ressonância de Plásmons de Superfície (SPR) em fibras ópticas, atingindo alta precisão no diagnóstico

interno das baterias. O dispositivo proposto por Zhao et al. (ZHAO et al., 2024) utiliza uma fibra óptica multimodo cuja região sensora é revestida com uma fina camada de ouro para excitar o efeito de plásmons de superfície. Uma camada de prata é depositada na extremidade da fibra para formar uma estrutura reflexiva. O sensor opera na faixa espectral de 605,1 nm e 627,3 nm. As variações na concentração de ácido sulfúrico alteram a posição do comprimento de onda de ressonância, permitindo a medição indireta da densidade do eletrólito e do estado de carga da bateria.

Adicionalmente, trabalhos aplicados especificamente a baterias de chumbo-ácido ressaltam o grande potencial das Fibras Ópticas Plásticas (POF - *Plastic Optical Fibers*). Sensores de nível de eletrólito desenvolvidos em POF viabilizam uma implementação em larga escala devido ao baixo custo, facilidade de manipulação mecânica e excelente resposta à detecção de líquidos. Além disso, esse tipo de fibra óptica não sofre degradação devido ao contato com a solução ácida. Diferentemente dos sensores baseados em fibras de sílica ou em técnicas espectrais mais complexas, dispositivos em POF podem operar na região do espectro visível, utilizando fontes luminosas simples, como LEDs vermelhos, emitindo em 650 nm, e fotodetectores de silício de baixo custo, reduzindo significativamente a complexidade eletrônica do sistema (SIQUEIRA NETO et al., 2025). No trabalho de Siqueira Neto et al. (SIQUEIRA NETO et al., 2025), foi proposta uma estrutura multiponto composta por dez elementos sensores inseridos em uma única POF, permitindo monitorar a altura da coluna de eletrólito com resolução de 1 mm e comportamento aproximadamente linear.

Os sensores à fibra óptica são geralmente classificados de acordo com o mecanismo de modulação da luz, que determina a forma como a grandeza de interesse influencia as propriedades do sinal óptico propagado na fibra. Nos sensores intrínsecos, a fibra óptica atua como o próprio meio sensor, onde o parâmetro externo, que será mensurado, altera diretamente o meio de propagação no núcleo da fibra. Já os sensores extrínsecos, a fibra óptica atua como guia de onda levando o sinal óptico até a região de interação com o meio externo, e coletando a informação do sinal modificado (CULSHAW; DAKIN, 1989; LI et al., 2024). Também podem ser classificados em relação à quantidade de pontos de monitoramento, pontual, quando o medem a grandeza em um único ponto discreto, multiponto quando medem a grandeza em vários pontos diferentes ao longo do enlace do sensor, e por fim, os distribuídos, nos quais toda a extensão da fibra óptica atua como um sensor contínuo através de fenômenos de dispersão (CULSHAW; DAKIN, 1989).

2.2.3 Instrumentação Optoeletrônica

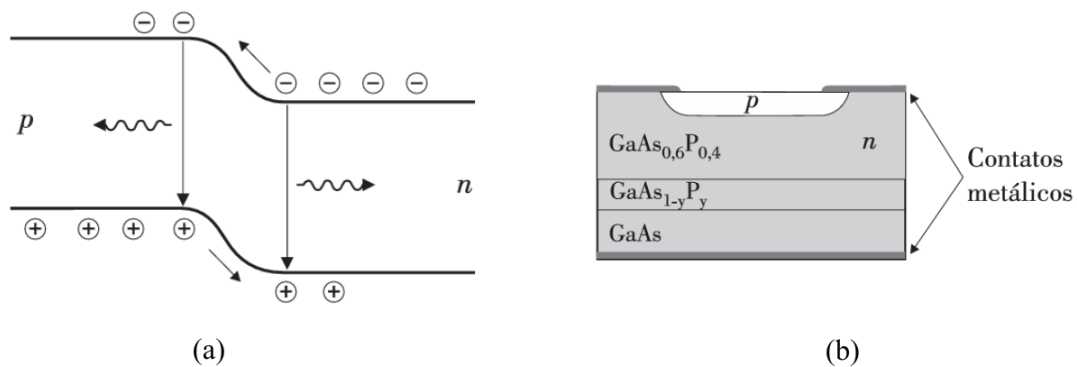
A instrumentação optoeletrônica desempenha um papel fundamental em sistemas baseados em sensores ópticos. Ao considerarmos sensores a fibra óptica, a fibra atua como meio de transmissão (elemento do sensor), não atuando somente como guia de onda, mas também como transdutor, recebendo alterações do meio externo e alterando

a propagação interna da luz na fibra. Esse tipo de instrumentação é a parte do circuito eletrônico responsável pela conversão, tratamentos e processamento dos sinais luminosos, responsáveis na medição das grandezas a serem monitoradas a partir da conversão do sinal óptico para eletrônico. O princípio básico de funcionamento desse tipo de sistema consiste em: uma emissão de uma fonte luminosa, que é acoplada e propagada por meio da fibra óptica, a detecção desse sinal por meio de um fotodetector, que é responsável pela conversão do sinal óptico em um sinal elétrico, na forma de uma fotocorrente. Após a fotodetecção, é necessário o condicionamento do sinal recebido, visto que, normalmente, o sinal da fotocorrente elétrica é da ordem de μA . Nesses casos, tipicamente, é feito o uso de algum tipo de circuitos de condicionamento, como por exemplo o amplificador de transimpedância (TIA) (UDD, 1991).

2.2.3.1 Fontes Emissoras

As fontes emissoras são a parte do circuito responsável pela geração do sinal óptico utilizado no sistema de sensoriamento. Entre os principais dispositivos utilizados, destacam-se dois, os diodos emissores de luz (LEDs) e os diodos lasers. Os LEDs apresentam baixo custo, elevada robustez e ampla faixa espectral de emissão, sendo utilizados principalmente em aplicações que não são necessárias altas potências ópticas, nem faixa espectral estreita (UDD, 1991). Por outro lado, os diodos laser fornecem uma maior intensidade, melhor direcionalidade do feixe aplicado no sistema, resolução, faixa espectral muito estreita (em comparação com os LEDs), além de representarem uma fonte de luz coerente (UDD, 1991; REZENDE, 2004). Os fotodiodos são detectores de radiação, cujo funcionamento baseia-se na geração de pares elétron-buraco decorrente da absorção de fótons nas imediações de uma junção $p-n$ (REZENDE, 2004).

Figura 4 – Ilustração dos processos optoeletrônicos em uma junção $p-n$: (a) diagrama de bandas de energia de um LED e (b) Estrutura típica de um LED.



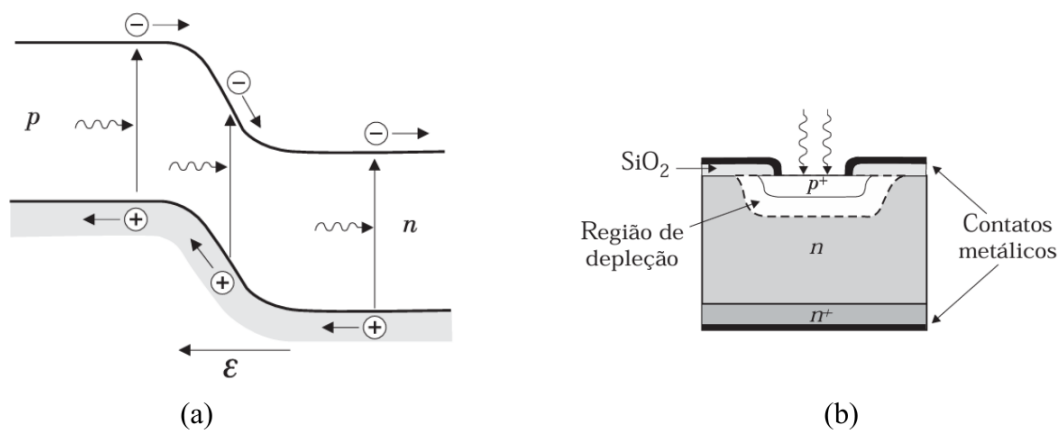
Fonte: Adaptado de Rezende, 2004.

Em dispositivos semicondutores, como os destacados anteriormente, a emissão luminosa ocorre por meio da recombinação dos elétrons e lacunas em uma junção p-n polarizada diretamente, a Figura 4 (a) ilustra detalhadamente o processo que ocorre na região de depleção: ao ser alimentado por uma fonte de tensão, as cargas recém-criadas são separadas pelo campo elétrico gerado, enviando os elétrons para o lado n , e os buracos para o lado, a energia é liberada na forma de fótons, p (REZENDE, 2004). Eles operam em dois modos principais: o fotovoltaico (circuito aberto), que converte luz em tensão elétrica, e o fotocondutivo (curto-circuitado ou com tensão reversa), onde a luz induz diretamente a passagem de corrente (REZENDE, 2004). Já Figura 4 (b) detalha a seção transversal da estrutura física de um LED de $Ga(AsP)$ que opera no vermelho, para esse caso a sua camada p superficial é mais fina e menos dopada que a camada n , o que garante que a radiação seja gerada bem próxima à janela de saída, minimizando perdas por absorção interna (REZENDE, 2004).

2.2.3.2 Fotodetectores

Os fotodetectores são dispositivos responsáveis pela conversão óptica/eletrônica. Entre os mais utilizados, tem-se os fotodiodos do tipo PIN e os fotodiodos de avalanche (APD). Os fotodiodos do tipo PIN são formados pela inserção de um semiconductor intrínseco, entre os semicondutores do tipo p e tipo n, que promove o alargamento da região de depleção, resultando em mais estabilidade para o dispositivo.

Figura 5 – Ilustração dos processos optoeletrônicos em uma junção p-n: (a) diagrama de bandas de energia de um fotodetector e (b) seção transversal da estrutura de um fotodetector.



Fonte: Adaptado de Rezende, 2004.

Ele tem seu funcionamento semelhante ao que é apresentado na Figura 5 (a), onde há uma absorção de fótons (UDD, 1991). Esse tipo de fotodetector apresenta uma melhor linearidade, um baixo custo e uma resposta rápida, sendo empregados principalmente

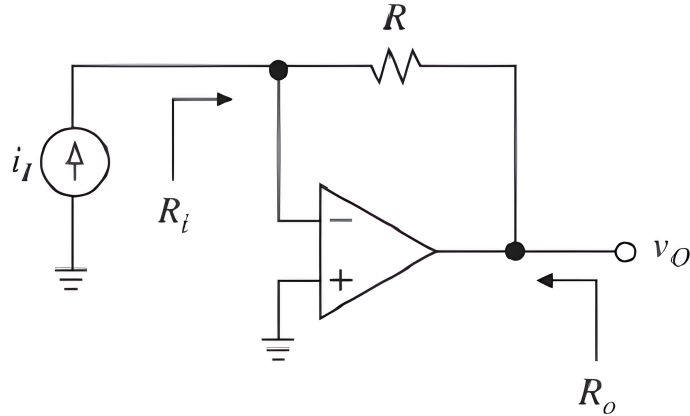
em sistemas de comunicação e sensoriamento óptico. Já os fotodiodos APD, operam sob uma tensão de polarização reversa elevada, o que permite a detecção de sinais ópticos de menor intensidade, contudo é necessário um controle térmico robusto. Eles possuem mecanismo internos que melhoram a sensibilidade do dispositivo, contudo possuindo uma maior complexidade de fabricação e alto custo (UDD, 1991; REZENDE, 2004). Já a Figura 5 (b), pode ser observado que o dispositivo é composto por uma fina camada superior fortemente dopada (p^+) e uma região central de menor dopagem (n), onde se concentra a maior parte da região de depleção. A base do componente conta com uma camada n^+ projetada para otimizar a condução até o contato metálico inferior, essa configuração, maximiza a penetração dos fótons na região de depleção (REZENDE, 2004).

Um ponto a ser considerado dos fotodetectores, é o ruído presente nesses dispositivos, que gera degradação no sinal transmitido para o sistema. Os principais tipos de ruído presente nesse tipo de dispositivo são: ruído de disparo (*shot noise*), resultado da natureza dos portadores de carga; ruído térmico (*Johnson noise*), gerado pela agitação térmica dos elétrons no sistema, além de ruído específico para o APDs, introduzido pelo efeito avalanche. A existência desse tipo de ruído faz com que seja necessário a implementação de filtros para um condicionamento adequado de sinais (UDD, 1991).

2.2.3.3 Condicionamento do sinal

Após a fotodetecção, o sinal da fotocorrente elétrica gerada normalmente apresenta uma amplitude muito reduzida e sujeito à influência de ruídos. Por esse motivo é necessário empregar circuitos de condicionamento de sinal, para adequar e manter a integridade da informação do sinal antes do processamento digital. O principal componente nessa etapa é o amplificador de transimpedância (TIA). Em instrumentações optoeletrônicas, o TIA atua convertendo a fotocorrente fornecida pelo fotodetector em uma tensão elétrica proporcional e aplicando um ganho (KEISER, 2010). Após a conversão corrente-tensão, o sinal pode ser submetido a outras etapas de amplificação e filtragem, para a atenuação de efeitos indesejados provenientes de fontes de ruídos e flutuações externas (FRANCO, 2014).

A Figura 6 apresenta o esquema elétrico básico de um conversor de corrente para tensão, referenciado como TIA. O circuito emprega um amplificador operacional onde a corrente de entrada (i_I) é direcionada ao terminal inversor, enquanto o terminal não inversor é aterrado. Dessa forma, a corrente de entrada entra no amplificador, sendo forçada a ir através do resistor (R), consequentemente, isso produz uma tensão no terminal de saída (v_O), que é diretamente proporcional à corrente de entrada (FRANCO, 2014). Essa relação é expressa pela Equação (9).

Figura 6 – Conversor básico de corrente para tensão (conversor I-V).

Fonte: Franco, 2014.

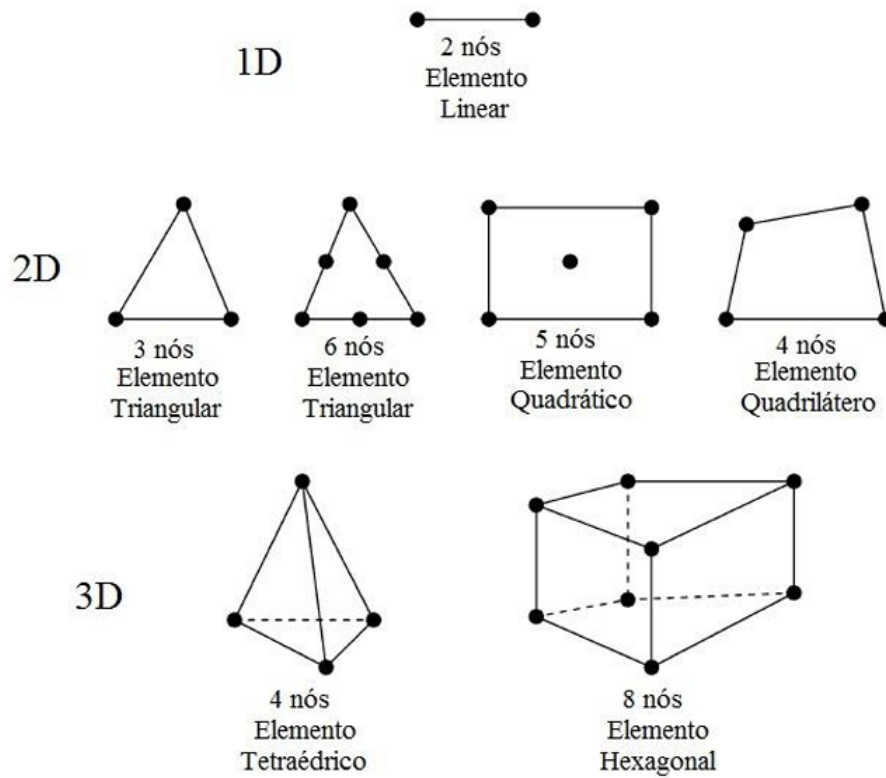
$$v_O = -Ri_I \quad (9)$$

Apesar de ser um dispositivo fundamental em instrumentações optoeletrônicas, o TIA também pode atuar na degradação dos sinais. Isso pode ocorrer, principalmente, devido ao ruído térmico que esse dispositivo pode inserir (FRANCO, 2014). Além disso, possíveis oscilações na alimentação desse amplificador podem impactar na inserção de mais ruído no sistema.

2.3 Método dos Elementos Finitos via COMSOL *Multiphysics*

Para o desenvolvimento e a otimização de sensores à fibra óptica frequentemente se exige análises complexas da interação entre a luz guiada e o meio externo ao qual o sensor está exposto. Devido à complexidade das geometrias empregadas e a variação das propriedades ópticas e geométricas dos materiais utilizados, a obtenção de soluções analíticas exatas torna-se inviável (JIN, 2015). Para contornar o desafio de se obter soluções analíticas exatas para geometrias não convencionais, utiliza-se o Método dos Elementos Finitos (MEF).

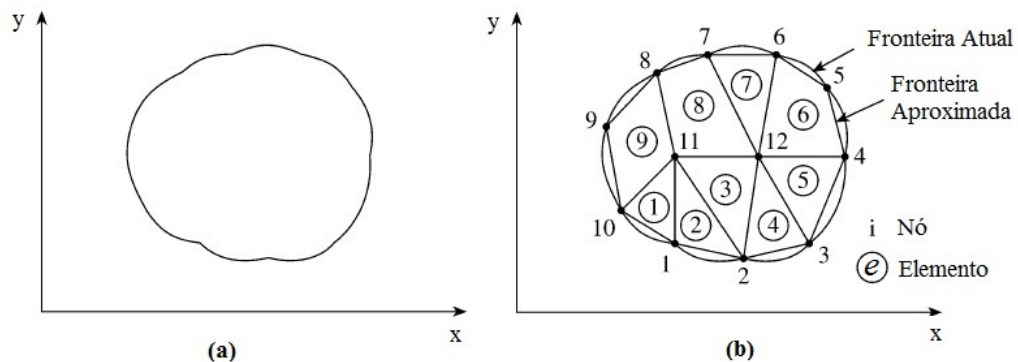
O MEF é uma técnica numérica consolidada para encontrar soluções aproximadas de Equações Diferenciais Parciais (EDPs) que modelam fenômenos físicos. Ela consiste em discretizar o domínio de interesse em pequenos elementos, permitindo que problemas complexos, sejam resolvidos por aproximações locais (JIN, 2015). Os elementos da discretização podem assumir diferentes geometrias, adequadas à modelagem unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais, visando se adequar de melhor forma ao domínio (SA-DIKU, 2000), a Figura 7 apresenta os principais tipos de elementos finitos empregados na discretização de geometrias unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, destacando as diferentes configurações de nós e elementos utilizadas na malha computacional.

Figura 7 – Tipos de elementos finitos para diferentes geometrias.

Fonte: Alves, 2016.

2.3.1 Fundamentos do Método dos Elementos Finitos

O princípio básico do MEF consiste na discretização do domínio contínuo do problema matemático (a geometria do sensor) em subdomínios menores e mais simples, denominados elementos finitos. Estes elementos são conectados por pontos chamados nós, formando uma malha (*mesh*) (REDDY, 2019). A Figura 8 apresenta a ideia principal de como esses nós se comportam, tentando preencher o domínio com formas mais simples.

Figura 8 – (a) Região da solução; (b) Discretização por elementos finitos.

Fonte: Alves, 2016.

Ao invés de resolver as EDPs de forma global, o método aproxima a solução em cada elemento através de funções de forma (ou funções de interpolação). Ao reunir essas soluções locais e aplicar as condições de contorno, o problema é transformado em um grande sistema algébrico, resolvido computacionalmente com alta precisão (REDDY, 2019). Após a discretização e o uso de funções de interpolação, o sistema global do MEF é particionado considerando os nós com potenciais livres (V_f) e os com valores prescritos pelas condições de contorno (V_p). A resolução da equação matricial resultante representa a etapa de maior esforço computacional do processo.

$$[C_{ff}][V_f] = -[C_{fp}][V_p]. \quad (10)$$

Onde $[C_{ff}]$ é a matriz de coeficientes dos nós livres e $-[C_{fp}]$ é a matriz de coeficientes de acoplamento com as fronteiras, que pode ser compactada na forma de

$$[A][V] = [B]. \quad (11)$$

2.3.2 Modelagem Eletromagnética no COMSOL

Nesse cenário, o *software* COMSOL *Multiphysics* se destaca como uma das principais ferramentas para a modelagem e simulação de dispositivos fotônicos e sensores ópticos. Em particular, destaca-se os módulos voltados para ondas eletromagnéticas, que permitem a modelagem detalhada de guias de onda ópticos, permitindo analisar parâmetros para o desempenho dos dispositivos simulados, além de controle dos parâmetros ópticos e geométricos utilizados na simulação (COMSOL AB, 2023).

Para o estudo da propagação da luz em fibras ópticas, utiliza-se tipicamente o módulo de *Wave Optics* ou *Ray Optics* do COMSOL. No regime permanente senoidal, o simulador resolve as equações de Maxwell aplicadas a meios dielétricos (COMSOL AB, 2023). Assumindo um meio isotrópico, linear e sem fontes de cargas ou correntes livres, a propagação do campo elétrico $\mathbf{E}$ no domínio da frequência é governada pela equação de onda de Helmholtz, exibida em (12).

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = 0 \quad (12)$$

Onde k_0 representa o número de onda no espaço livre, definido por $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ (sendo λ o comprimento de onda de operação do sinal óptica), e ϵ_r é a permissividade elétrica relativa do meio material. Dessa forma, a solução dessa equação fornece a distribuição espacial dos campos eletromagnéticos, permitindo identificar regiões de confinamento da energia óptica e possíveis interações com o meio externo. Sabendo que, para frequências ópticas, a permissividade elétrica está diretamente relacionada ao índice de refração do meio por $\epsilon_r = n^2$.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Este capítulo detalha a abordagem computacional e as ferramentas numéricas que foram utilizadas para simular o comportamento óptico dos sensores propostos e sua utilização em instrumentação para o sistema de monitoramento de eletrólito. A modelagem constitui uma etapa importante deste trabalho, permitindo uma melhor validação dos resultados e ajuste dos parâmetros do dispositivo, reduzindo a necessidade de prototipagem em etapas iniciais e contribuindo para a otimização dos parâmetros de projeto. A Seção 3.1 apresenta os *designs* geométricos e estruturais que serão utilizados para a base dos dispositivos propostos. Para tal, foi utilizado o *software* COMSOL *Multiphysics*. A Seção 3.2 apresenta o modelo numérico que foi implementado no COMSOL *Multiphysics*, destacando a malha do sistema e os parâmetros utilizados para ajustar e reduzir o esforço computacional. Por fim, a Seção 3.3 apresenta a rotina de simulação, que possibilitou a otimização de parâmetros geométricos do sensor proposto, a rotina que permite prever a resposta do dispositivo frente às variações do nível e da concentração do eletrólito em uma bateria de chumbo-ácido, e os parâmetros que foram utilizados nos modelos simulados.

3.1 Design dos Elementos Sensores

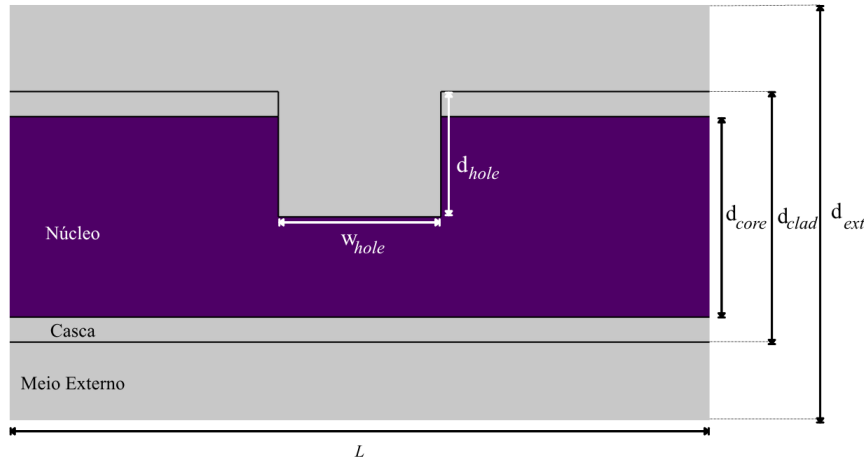
O princípio de funcionamento de ambos os dispositivos, sensor de nível de eletrólito e o sensor de concentração de eletrólito, requer que a luz confinada na fibra óptica interaja com o meio externo. Para que isso ocorra, o *design* do elemento sensor deve incluir regiões onde a casca da fibra óptica é parcialmente ou totalmente removida ou estruturalmente modificada (como em curvaturas ou com rugosidade de superfície), expondo o campo evanescente ou permitindo o desacoplamento de parte do sinal óptico guiado. (YE et al., 2023).

Com o auxílio COMSOL *Multiphysics*, foi possível modelar a fibra óptica com o perfil D, que compõem a estrutura do sensor proposto neste trabalho, pela geometria 2D mostrada na Figura 9. Nessa figura, tem-se a representação da seção longitudinal de uma fibra óptica monomodo com perfil D (*D-shaped Plastic Optical Fiber - POF-D*), onde estão destacadas as camadas do núcleo, casca e meio externo, e a área relativa ao perfil D.

Na modelagem computacional, a fibra óptica foi parametrizada com base nas características de uma Fibra Óptica Plástica (*Plastic Optical Fiber - POF*) comercial, tipicamente composta por um núcleo de Polimetilmetacrilato (PMMA). Para o comprimento de onda de 650 nm, foi adotado para o núcleo um índice de refração (n_{core}) de aproximadamente 1,49, com diâmetro definido por d_{core} . O revestimento fluorado, representado pelo índice de refração (n_{clad}), foi modelado com valor aproximado de 1,41 e diâmetro correspondente a d_{clad} . Além disso, foi considerada uma região adicional representando o

meio externo, cuja dimensão é definida por d_{ext} . A zona de sensoriamento foi estabelecida por meio da definição de um comprimento de interação L , correspondente à região modificada da fibra responsável pela interação óptica com o meio externo. Adicionalmente, foram definidos o índice de refração da região de interação (n_{hole}) e a profundidade da cavidade ou polimento lateral (H_{hole}), que são parâmetros que influenciam diretamente na intensidade da interação do campo evanescente com o meio sob análise (SIQUEIRA NETO et al., 2025).

Figura 9 – Modelo base para fibra com perfil D.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2 Implementação do Modelo no COMSOL *Multiphysics*

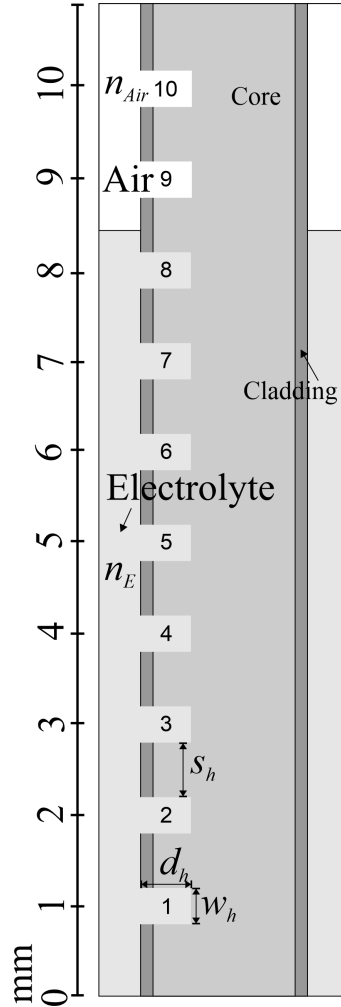
3.2.1 Sensor de Nível de Eletrólito

A estrutura geométrica do sensor foi modelada no ambiente CAD do COMSOL *Multiphysics* (COMSOL AB, 2023). Dependendo da escala da fibra óptica e das aproximações necessárias, o modelo pode ser implementado em geometria bidimensional (2D), para reduzir a demanda computacional. Para o primeiro modelo, foram determinados alguns parâmetros, que podem ser observados na Tabela 1.

A Figura 10 mostra o domínio simulado, desde o meio externo, com ar e com o eletrólito, até a fibra óptica com os furos (pequenos perfil D inseridos em cascata ao longo da direção de propagação), que são responsáveis por permitir a interação do sinal óptico com o meio externo. A resolução da malha foi refinada especificamente na interface entre a fibra e o meio externo, garantindo que o decaimento exponencial do campo evanescente e as interações na interface fossem capturadas com maior precisão pelo Método dos Elementos Finitos. Para truncar o domínio computacional e evitar reflexões espúrias nas fronteiras da simulação que poderiam corromper os resultados, foram aplicadas Camadas Perfeitamente

Casadas (*Perfectly Matched Layers - PMLs*) nos limites da geometria. As PMLs têm a função de absorver completamente qualquer onda eletromagnética incidente.

Figura 10 – Esquema simplificado da seção longitudinal do sensor de nível de eletrólito modelado no COMSOL *Multiphysics*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

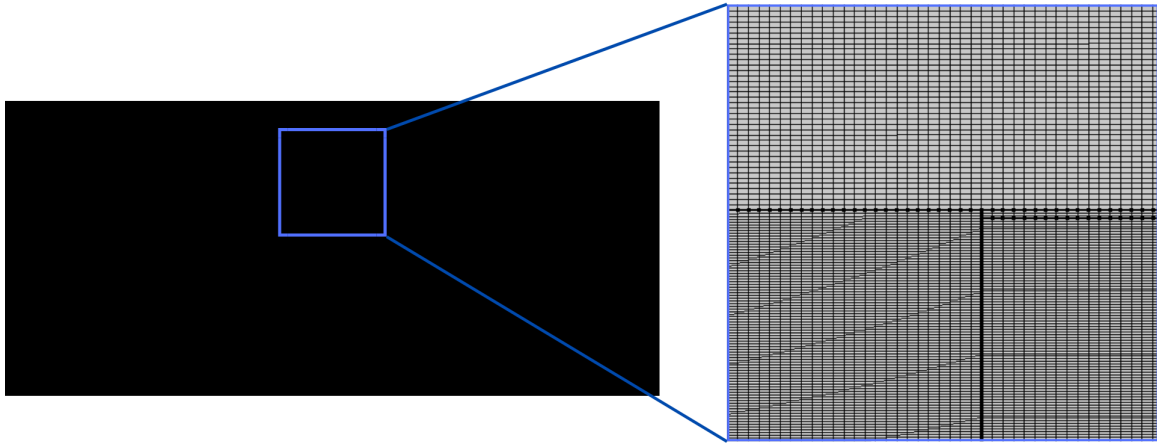
Tabela 1 – Parâmetros ópticos e geométricos utilizados no estudo para o sensor de nível.

Descrição	Símbolo	Valor
Índice de refração do núcleo	n_{core}	1,492
Índice de refração da casca	n_{clad}	1,417
Comprimento de onda	λ	650 nm
Índice de refração do eletrólito	n_E	1,40
Índice de refração do ar	n_{Air}	1,0
Diâmetro do núcleo	D_{core}	980 μm
Diâmetro da casca	D_{clad}	1000 μm
Largura da cavidade	w_h	500 μm
Profundidade da cavidade	d_h	600 μm
Espaçamento entre cavidades	s_h	1 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 11 ilustra a malha computacional empregada no sistema, cujos parâmetros físicos foram obtidos via teste. Em simulações computacionais, a malha mapeada (*mapped mesh*) é uma grade altamente estruturada onde os elementos são organizados em um padrão perfeitamente regular. Ou seja, para o modelo implementado, por apresentar um formato retangular, essa malha se adapta melhor ao sistema modelado, acompanhando os contornos da geometria.

Figura 11 – Discretização do modelo implementado com malha retangular.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O dimensionamento dos elementos foi estabelecido em função do comprimento de onda (λ). Na região do núcleo, onde exige-se maior precisão dos resultados, adotou-se o critério de 5λ . Em contrapartida, para a casca e o meio externo, aplicou-se o valor de 10λ . Essa redução no número de elementos nas regiões periféricas se justifica já que não é necessária tanta precisão quanto no núcleo, contribuindo também para a redução da demanda computacional e do tempo de simulação. Essa estratégia, aliada à principal vantagem do mapeamento (alta precisão), que é a otimização inteligente da grade, garante resultados rigorosos na região de interesse sem sobrecarregar o processamento. Além disso, o modelo computacional foi implementado usando o módulo *Electromagnetic Waves, Beam Envelopes*, em que a equação de Helmholtz é resolvida com muita precisão para a amplitude (envelope) a partir de uma aproximação inicial para a fase (usando a constante de propagação).

3.2.2 Sensor de Concentração de Eletrólito

Para o segundo dispositivo simulado, ou seja, o sensor de concentração de eletrólito, foi utilizado uma simulação mais simples, com um modelo próximo ao apresentado a Figura 9, com apenas um perfil D. Contudo, com o diferencial de que foi realizado uma variação no índice de refração do meio externo em função da concentração do eletrólito, diferente do sensor de nível que funciona com base em dois estados: ar ou eletrólito. Os parâmetros ópticos implementados no segundo sensor modelo podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros ópticos e geométricos utilizados no estudo para o sensor de concentração.

Descrição	Símbolo	Valor
Índice de refração do núcleo	n_{core}	1.492
Índice de refração da casca	n_{clad}	1.417
Comprimento de onda	λ	650 nm
Índice de refração do eletrólito	n_E	1.4176 - 1.4245
Diâmetro do núcleo	D_{core}	980 μm
Diâmetro da casca	D_{clad}	1000 μm
Comprimento do perfil D	w_{hole}	0.65 mm
Profundidade do perfil D	d_{hole}	600 μm

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a simulação, foi selecionada uma redução na faixa de concentração de ácido (eletrólito) de 100% para 90%. Dessa forma, as propriedades do meio externo foram a única variável alterada no modelo, enquanto os parâmetros relacionados à fibra óptica ficaram fixos. Ainda sobre os parâmetros geométricos observados na Tabela 2, eles foram definidos após simulações prévias, que indicaram os parâmetros que melhor se alinhavam com o modelo proposto. Para a malha, foi utilizado o mesmo tipo descrito e utilizado no primeiro dispositivo, apresentado na Figura 11.

3.3 Instrumentação via Simulink/MATLAB

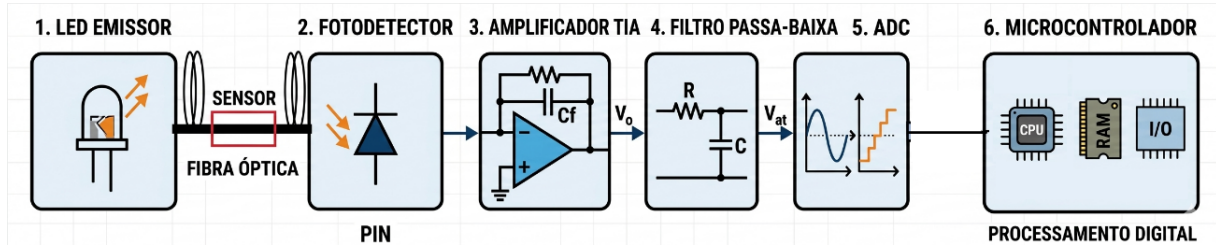
A Figura 12 ilustra a arquitetura em diagrama de blocos de um instrumentação optoeletrônica projetada para a leitura e processamento de sinais do sensor óptico. O circuito inicia com a emissão de luz por meio de um LED, que emite no comprimento de onda de 650 nm, com potência de 1 mW, com o objetivo de acoplar o sinal óptico na fibra óptica, onde o elemento sensor está inserido. A interação da luz com o meio externo modula o sinal óptico transmitido, que é detectado por um fotodiodo do tipo PIN, e é o componente responsável por realizar a conversão de sinal óptico para sinal elétrico. O modelo matemático que representa essa conversão é mostrado nas equações (13) e (14) (TEICH; SALEH, 2007).

$$P_{op} = P_0 10^{T_{dB}/10} \quad (13)$$

$$I_{ph} = P_{op} R(\lambda) \quad (14)$$

Em que $P_0 = 1 \text{ mW}$ é a potência óptica do LED emissor, T_{dB} é a transmitância obtida com a simulação no COMSOL em escala de decibel, I_{ph} é a fotocorrente e $R(\lambda) = 0,4 \text{ A/W}$ é a responsividade do fotodiodo PIN, para o comprimento de onda de 650 nm (TEICH; SALEH, 2007).

Figura 12 – Diagrama da instrumentação do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após a conversão para um sinal elétrico de corrente, usa-se um Amplificador de Transimpedância (TIA - *Transimpedance Amplifier*), para converter o sinal de corrente elétrica de entrada em um sinal de tensão na saída, com um ganho $K=10^4$ ajustado pela resistência R_f . Esse ganho é apropriado para fotocorrentes, que são da ordem de μA (TEICH; SALEH, 2007). O modelo matemático que representa essa conversão é mostrado na Equação (15). Após essa etapa, é aplicado um filtro RC passa-baixa, para o tratamento do ruído eletrônico gerado no fotodetector, garantir a integridade do sinal e eliminar ruídos de alta frequência. Além disso, esse filtro define a largura de banda do sistema. Por fim, o bloco do ADC é um conversor analógico-digital, que discretizar o sinal contínuo de tensão a partir de um amostrador, para o emprego de um microcontrolador na composição de um sistemas digitais de monitoramento da variável de interesse, ou seja, o eletrólito.

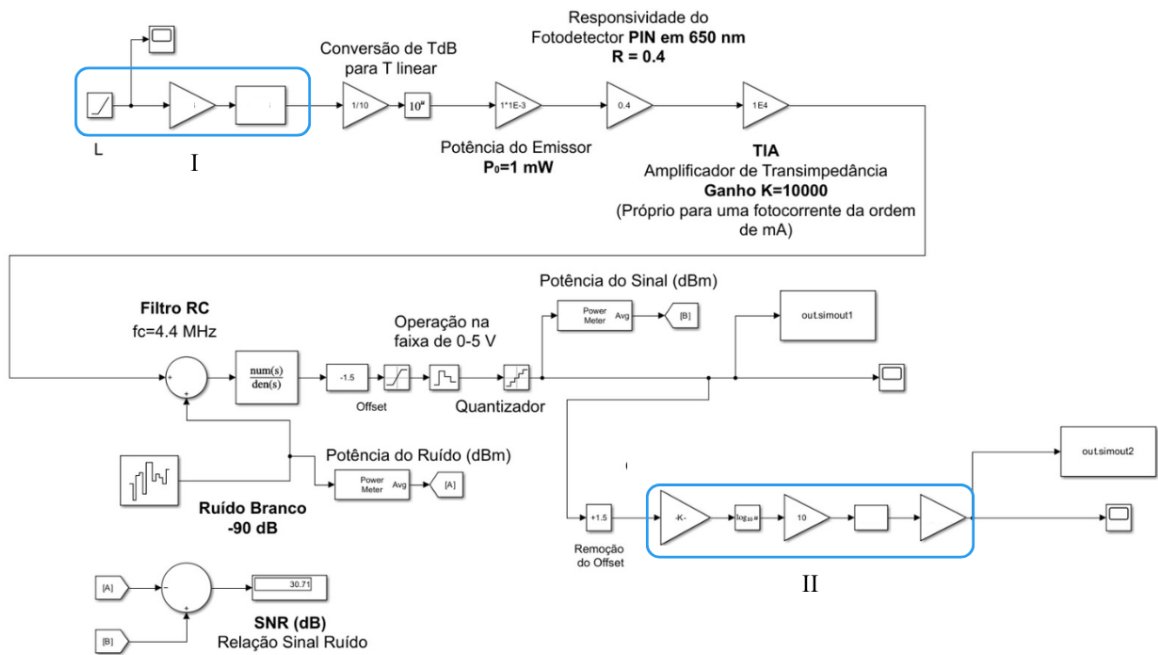
$$V = I_{ph}R_f \quad (15)$$

Para validar o comportamento da instrumentação e dimensionar de forma adequada os componentes que seriam utilizados no sistema planejado, foi utilizado o *software* Simulink/MATLAB, que é uma plataforma de modelagem matemática de alta performance. Como parte integrante, o Simulink atua como uma aplicação dentro do ambiente do MATLAB, ao fornecer um ambiente gráfico de simulação baseado em diagramas de blocos. O Simulink se baseia no conceito de Projeto Baseado em Modelos (*Model-Based Design*), permitindo a modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos lineares e não lineares em domínios contínuos ou discretos no tempo ou na frequência (The MathWorks Inc., 2023).

Na Figura 13, é apresentado o diagrama da instrumentação implementada no Simulink/MATLAB a partir da instrumentação base ilustrada na Figura 12. O fluxo de sinal inicia no módulo do sensor óptico, onde é determinado as especificações do sensor, juntamente com o LED emissor e o fotodetector. O sinal de entrada é modelado como um sinal do tipo rampa, simulando uma variação linear na concentração do eletrólito de 100% para 90%, com taxa de $-0,01\%/s$. A fotocorrente resultante desse processo é direcionada ao bloco do amplificador de transimpedância (TIA), cuja saída é acoplada a um filtro RC passivo. Para o dimensionamento do filtro RC, a frequência de corte foi definida para

$f = 4,4$ MHz, com base nas características nominais do fotodetector HFBR-1521Z da Avago Technologies® (Avago Technologies, 2020), usado em circuitos optoeletrônicos para a detecção de sinais ópticos de fibras ópticas de plástico. Ainda no modelo implementado no Simulink, destaca-se a inserção de uma fonte de ruído branco gaussiano de -90 dBm como forma de representar as possíveis oscilações na fonte de luz, fotodetector, amplificador TIA e demais componentes passivos de introduzir ruído ao sistema. Por fim, a relação sinal/ruído (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*) também é calculada a partir da diferença da potência em dBm na saída do amostrador e a potência em dBm da fonte de ruído branco.

Figura 13 – Instrumentação optoeletrônica implementada no Simulink.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ainda na Figura 13, podem ser observadas duas regiões, a região I, que é referente a aplicação da resposta do sensor no sistema, obtida com a modelagem no COMSOL, e a rampa correspondente. Já a região II, é onde ocorre a reconstrução da variável de interesse (nível ou concentração de eletrólito). Para o sensor de concentração, sua resposta em função da concentração é inserida na região I, por meio da transmitância do sinal óptico, exibida na Equação (16). É importante destacar que TdB_C representa a função de transferência do sensor óptico, ou seja, é a razão do sinal de saída pelo sinal de entrada, obtida durante a simulação óptica do dispositivo sob variações na concentração de eletrólito C . Já a Equação (17), representa a reconstrução da variável de interesse, destacada na região II, em função da grandeza resultante da instrumentação optoeletrônica, ou seja, o sinal de tensão V .

$$TdB_C = A_1 + B_1 C \quad (16)$$

$$C = \frac{10 \log_{10} \left[\frac{V}{K \cdot R \cdot P_0} \right] - A_1}{B_1} \quad (17)$$

A descrição anterior também se aplica ao sensor de nível, com suas equações exibidas em (18) e (19), em que X é a variável usada para representar o nível de eletrólito.

$$\text{TdB}_X = A_2 + B_2 X \quad (18)$$

$$X = \frac{10 \log_{10} \left[\frac{V}{K \cdot R \cdot P_0} \right] - A_2}{B_2} \quad (19)$$

Para esse conjunto de equações que descreve a resposta óptica dos sensores e a reconstrução da variável de interesse, a partir da instrumentação optoeletrônica, deve-se destacar que está sendo considerada uma resposta linear dos sensores ópticos. Isso não é um comportamento genérico desse tipo de tecnologia sensora, mas se trata de uma consideração usual, visto que nos sistemas sensores à fibra óptica é possível encontrar faixas de operação em que a resposta é linear.

3.4 Rotinas de Testes e Caracterização

A etapa inicial da rotina de simulação, de ambos os sensores modelados, consistiu em verificar e determinar uma combinação de seus parâmetros geométricos no COMSOL. Para o sensor de nível de eletrólito, foram realizados testes variando parâmetros como a distância entre cada perfil D, a profundidade e a largura dos perfil D, com o intuito de otimizar a resposta na saída deste sensor. Um dos principais objetivos desta etapa é a obtenção de um comportamento linear para a faixa de operação desejada.

Para o sensor de nível de eletrólito, com os parâmetros geométricos do elemento do sensor já estabelecidos, fez-se necessária a condução de ensaios adicionais. Para avaliar o desempenho do sensor proposto, implementou-se uma rotina de varredura paramétrica (*Parametric Sweep*). O parâmetro crítico de variação foi o índice de refração do meio externo circundante à região sensível (perfil D) (n_{ext}). Dessa forma, simulou-se a condição em que a fibra estaria parcialmente exposta ao ar e parcialmente submersa no material eletrólito, permitindo analisar a resposta do sensor sob diferentes níveis de preenchimento.

As simulações foram configuradas para analisar dois cenários extremos de operação no interior de uma bateria de chumbo-ácido:

- **Sensor não submerso:** O meio externo é caracterizado pela presença de ar e gases, com $n_{\text{ext}} \approx 1,00$.
- **Sensor submerso:** O meio externo é caracterizado pela solução de ácido sulfúrico. Como a densidade do eletrólito varia com o estado de carga (SoC) da bateria, o índice do líquido foi parametrizado para variar na faixa de $n_{\text{ext}} \approx 1.35$ a 1.38 (CAO-PAZ et al., 2010; ZHAO et al., 2024).

A caracterização do sensor nível de eletrólito consistiu em monitorar a potência óptica transmitida para cada valor de n_{ext} em contato com os 10 perfis D. Devido ao menor contraste de índice de refração entre o núcleo e o ácido sulfúrico em comparação com o ar, as perdas ópticas aumentam significativamente quando o líquido atinge a região sensível. A curva de potência de saída em função do índice de refração do meio externo permite estimar a sensibilidade teórica e validar se a atenuação calculada pelo COMSOL *Multiphysics* é suficiente para detecção precisa numa futura prototipação do sensor proposto. Trata-se de uma importante análise, pois o sensor modelado deve fornecer sinais de saída com intensidade mensurável numa instrumentação fotônica, em que alguns equipamentos operam no limiar de potência de -60 dBm.

Para o sensor de concentração de eletrólito modelado, foi realizada uma variação mais suave no índice de refração do meio externo, ao invés de uma variação brusca do ar para o eletrólito. Esse ensaio computacional visou encontrar o comportamento do sensor diante de pequenas alterações no índice de refração do meio externo, que podem indicar pequenas alterações nas propriedades do eletrólito. Com os resultados obtidos da rotina de simulação, a configuração inicial do modelo computacional seguiu as especificações detalhadas na Tabela 1 e na Tabela 2, que reúne tanto as propriedades ópticas quanto às propriedades geométricas utilizadas na simulação.

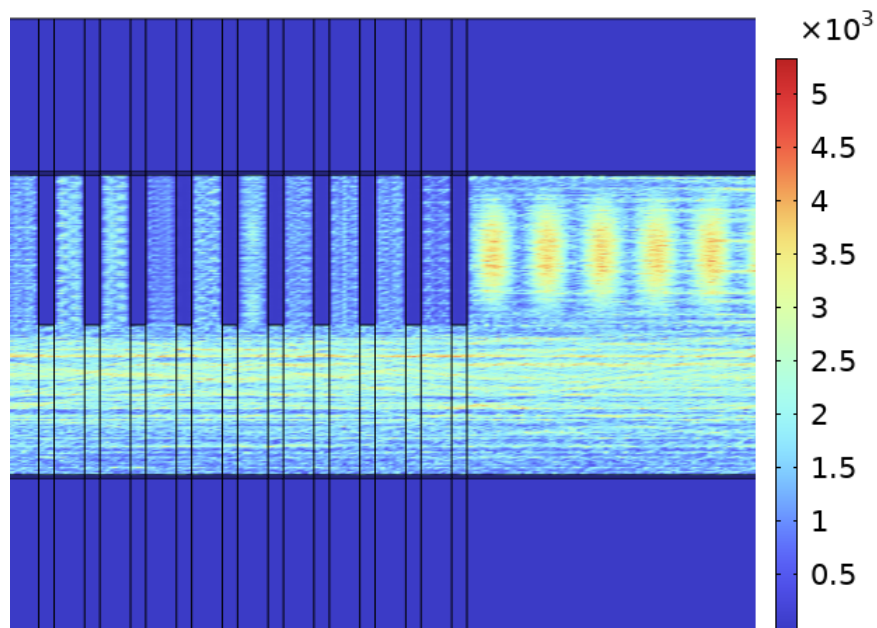
4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados e discussões do estudo realizado. A Seção 4.1 detalha os resultados obtidos a partir das modelagens computacionais desenvolvidas no *software* COMSOL. São apresentados os resultados do comportamento óptico de cada dispositivo, com base na distribuição de intensidade do campo elétrico, e caracterização de cada sensor em termos da variação da transmitância em função da variável sob análise. Por fim, a Seção 4.2 expõe o comportamento e os resultados referentes à instrumentação, buscando apresentar o desempenho do modelo proposto e validar a resposta de ambos os sensores modelados.

4.1 Resultados no COMSOL

Para o sensor de nível de eletrólito, na Figura 14, tem-se a distribuição de intensidade do campo elétrico do sinal óptico guiado na estrutura, considerando a geometria fora de escala, para uma melhor visualização. Como pode ser observado, tem-se a interação da onda localizada inteiramente dentro da fibra. Ainda na Figura 14, devido a presença dos perfis D em cascata, a distribuição de intensidade do sinal óptico ocorre de forma não uniforme, com maior concentração na região sem perfil D.

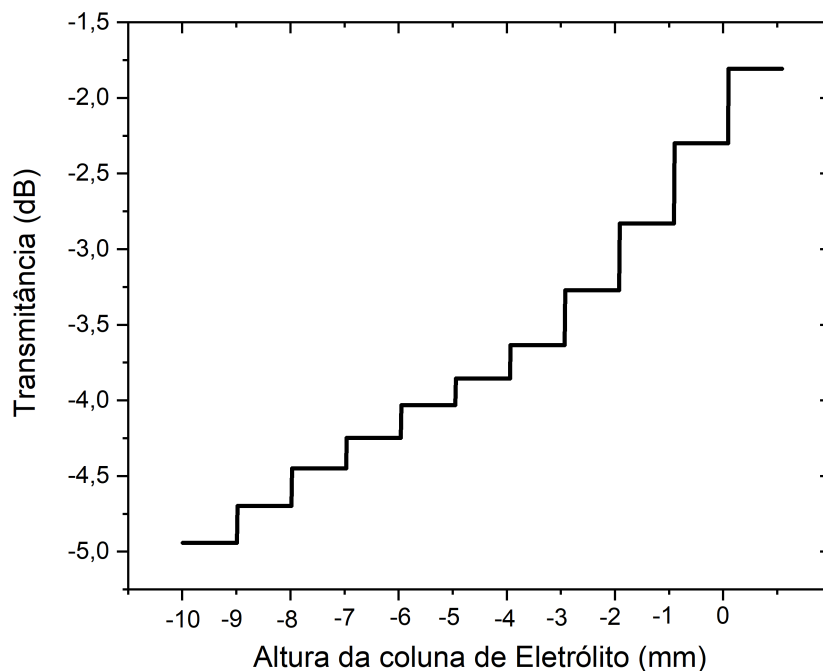
Figura 14 – Distribuição do módulo do campo elétrico ao longo da geometria do sensor de nível de eletrólito, medida em V/m.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 15 representa a simulação da redução de volume do eletrólito em uma coluna de 10 mm, que é a capacidade total de leitura do sensor. Ou seja, indiretamente, pode representar uma redução de volume desse ácido. Um ponto fundamental, já mencionado na metodologia, é que a redução do nível do líquido altera o meio externo de eletrólito para o ar, o que impacta diretamente a passagem da luz. Portanto, à medida que o nível de eletrólito varia, a transmitância varia, visto que o meio externo também varia, nesse caso, o valor do índice de refração do meio externo diminui, já que varia do eletrólito para o ar (sistema de dois níveis). Tem-se também que para cada ponto de sensoriamento de eletrólito, foi considerado que o ácido preenche totalmente a região do perfil D. Além disso, entre dois elementos sensores, tem-se um trecho de 1 mm, de fibra óptica com a casca com seu diâmetro nominal. Nesse trecho, o dispositivo não é sensível à detecção de eletrólito. Com isso, a resposta desse tipo de sensor é em "degraus", conforme é mostrado na Figura 15. Enfatizando, os degraus da Figura 15 existem porque o sensor trabalha de forma multiponto: ele identifica o nível em locais específicos (onde os elementos sensores estão posicionados) e não consegue captar pequenas variações que ocorrem no espaço vazio entre um elemento sensor e outro.

Figura 15 – Transmitância como função da variação da altura da coluna de líquido da solução eletrolítica.



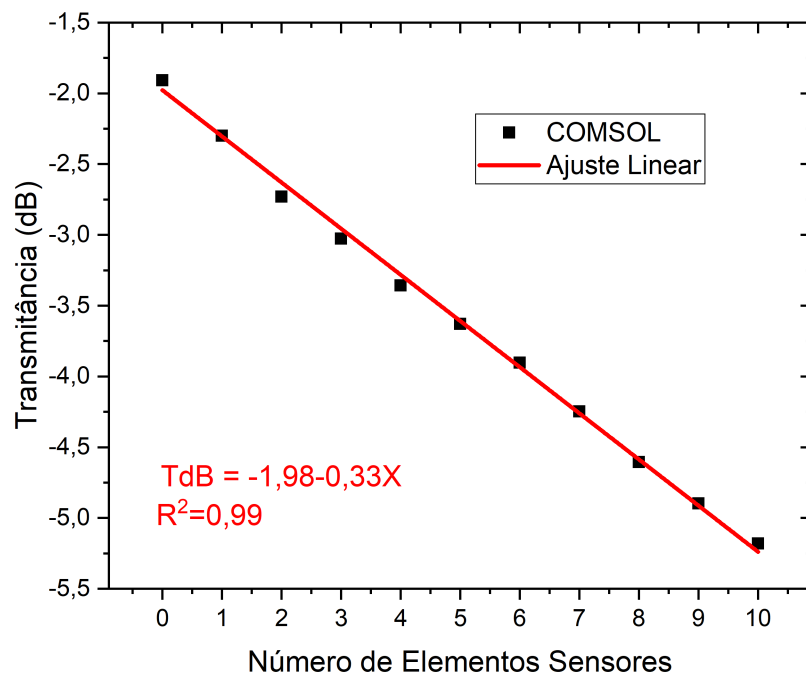
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ainda no gráfico da Figura 15, observa-se que à medida que o nível do eletrólito diminui, a transmitância do sinal óptico aumenta. Esse fenômeno ocorre porque o índice de refração do eletrólito é muito próximo ao do núcleo da fibra óptica, o que facilita a interação da luz através do perfil D com o meio externo. Quando o líquido é substituído pelo ar

(que possui índice de refração igual a 1), uma maior fração do sinal óptico fica confinado no interior da fibra óptica, aumentando a intensidade do sinal transmitido. Mesmo sem a presença do eletrólito, o sensor apresenta uma perda de sinal de aproximadamente 1,8 dB. Isso acontece devido à própria estrutura física dos perfis D inseridos ao longo da fibra óptica. No entanto, esse valor é considerado baixo e positivo quando comparado a sensores feitos de fibras de sílica, que costumam apresentar perdas muito maiores por terem diâmetro muito inferior que as fibras plásticas utilizadas aqui.

Para o sensor de nível de eletrólito, pode ser observado na Figura 16 como esse sensor se comporta conforme o eletrólito perde o contato com os elementos sensores. Com base nos resultados apresentados na Figura 16, a regressão linear aplicada aos dados simulados permite extrair a sensibilidade média do dispositivo. Essa sensibilidade é diretamente representada pelo coeficiente angular da reta de ajuste, que apresenta o valor de -0,33 dB/elemento sensor. Isso indica que, em média, a transmitância do sinal sofre uma atenuação constante de 0,33 dB a cada novo elemento sensor submetido à solução eletrolítica. O comportamento altamente previsível e linear do sensor é reforçado pelo coeficiente de determinação (R^2) de 0,99. Além disso, a regressão linear fornece, principalmente, os coeficientes da função linear que descreve o comportamento da transmitância em função do nível de eletrólito, definida pela Equação (18).

Figura 16 – Transmitância em função do número de elementos sensores na solução eletrolítica.

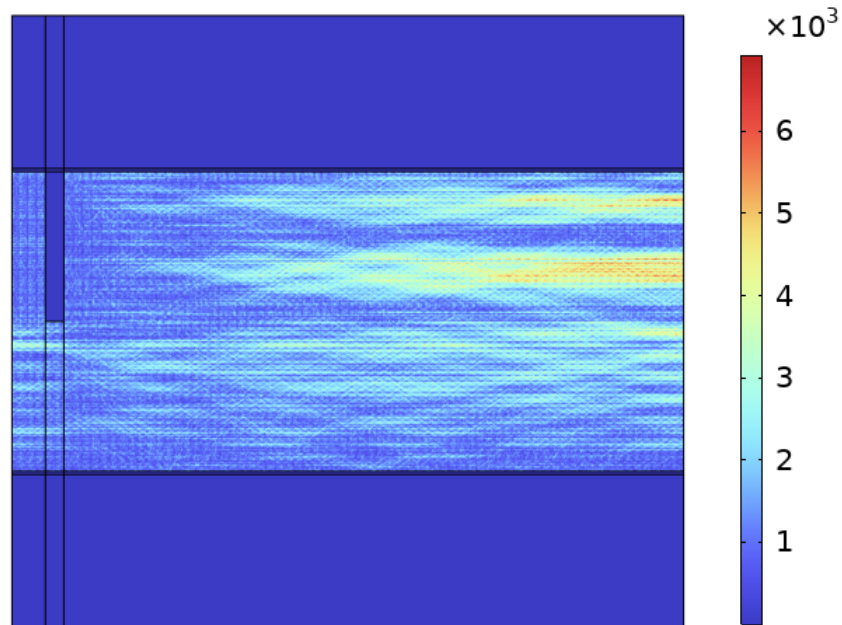


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a modelagem do sensor de concentração de eletrólito, a Figura 17 apresenta a distribuição de intensidade do campo elétrico do sinal óptico guiado para esse dispositivo. Temos que diferente do sensor de nível, que apresenta uma estrutura periódica, este modelo

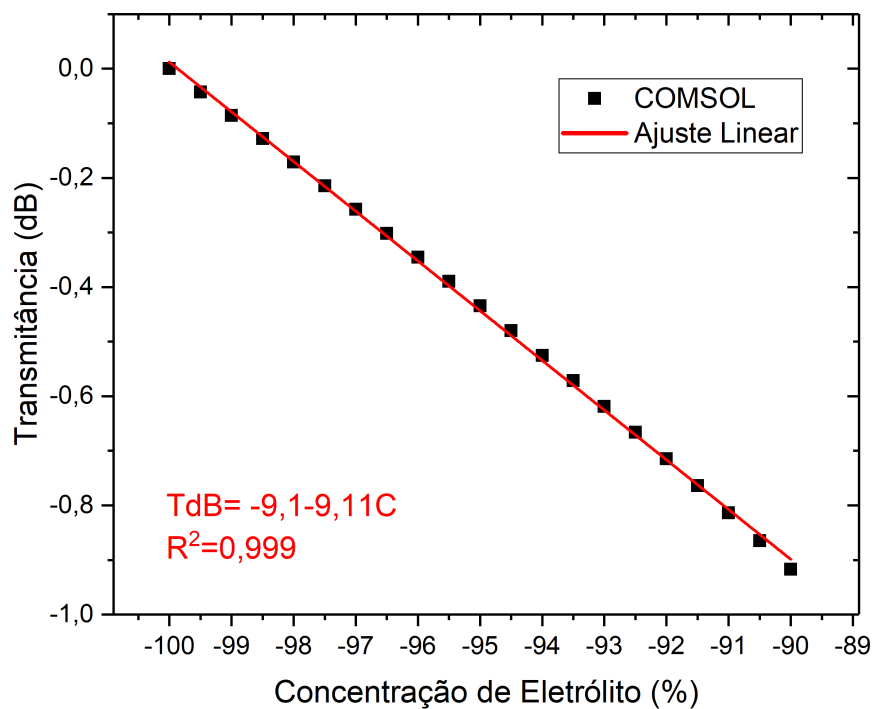
apresenta apenas um perfil D. Além disso, pode ser observado também, que ao passar pela região do perfil D, há uma perturbação na onda guiada.

Figura 17 – Distribuição do módulo do campo elétrico ao longo da geometria do sensor de concentração de eletrólito, medida em V/m.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 18 – Transmitância em função da concentração de eletrólito. Dados da simulação do elemento sensor e ajuste linear.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 18, apresenta a resposta do sensor proposto, para a simulação de uma redução na concentração de ácido sulfúrico na faixa de 100% para 90%. Nota-se um comportamento perfeitamente linear, com um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,999$, apresentando uma correlação entre os dados simulados e o ajuste linear. Além disso, destaca-se a elevada sensibilidade média de 9,11 dB/% dentro da faixa analisada. Pode ser observado também o aumento da transmitância, como observado na Figura 18, esse comportamento se deve ao efeito do aumento do índice de refração do meio externo, à medida que se tem um aumento na concentração do eletrólito, interagindo com o perfil D do modelo proposto, que por sua vez, no modelo implementado, o meio externo atua como uma casca na interface com o perfil D, implicando em, uma maior fração da luz se mantendo guiada, resultando no aumento da transmitância.

4.2 Resultados da Simulação da Instrumentação no Simulink

Com os resultados obtidos após as simulações no *software* COMSOL, foram determinadas as constantes para as Equações (16), (17), (18), (19), a partir de regressões lineares. A Tabela 3 apresenta os valores dessas constantes e que são utilizados no modelo implementado no Simulink.

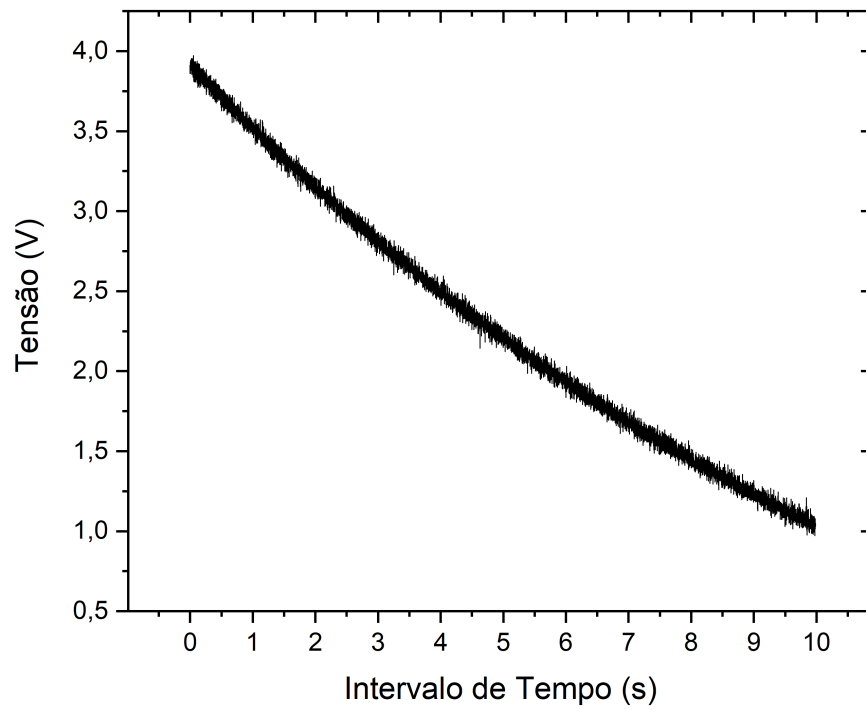
Tabela 3 – Relação de parâmetros para os modelos de transmitância linear.

Tipo de Sensor	Constante	Valor
Concentração	A_1	-1.98
	B_1	-0.33
Nível	A_2	-9.10
	B_2	-9.11

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

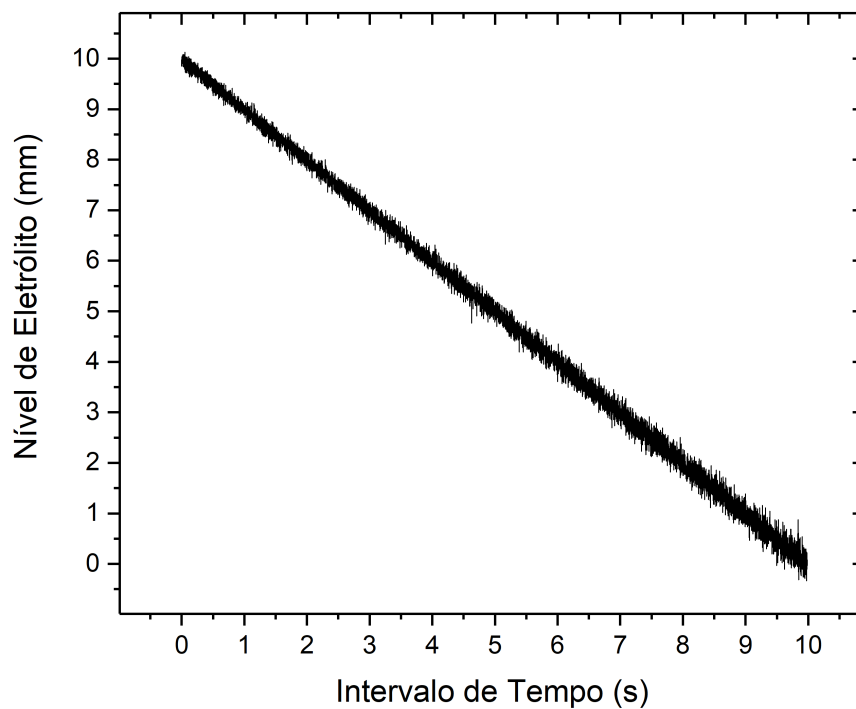
Com os resultados obtidos a partir da modelagem no COMSOL, as caracterizações dos dois dispositivos foram implementados no sistema apresentado na Seção 3.3, ilustrado na Figura 13. A Figura 19 apresenta a resposta temporal do sistema em função da tensão ao longo de um intervalo de 10 segundos de medição, para o sensor de nível de eletrólito. Observa-se que a amplitude do sinal decai de forma contínua, saindo de um valor de 3,9 V, e decaindo até um valor de aproximado de 1,10 V ao final dos 10 segundos, variando aproximadamente 2,8 V ao longo da faixa de operação. Trata-se de uma variação de sinal analógico significativa e detectável por diversos tipos de sistemas digitais de aquisição de dados. Pode ser observado também o ruído presente no sistema, devido a inserção da fonte de ruído branco de -90 dB, indicando que o filtro RC passivo não foi capaz de eliminar completamente o ruído do sistema. Trata-se de uma situação esperada, considerando que o ruído branco tem ampla largura de banda. Contudo, a SNR calculada na simulação para esse dispositivo é de 30 dB, indicando que a intensidade do sinal detectado é superior à intensidade do ruído.

Figura 19 – Gráfico da tensão em função do tempo. Resposta da instrumentação para o sinal de tensão amostrado em função do tempo para a aquisição de dados com o sensor de nível de eletrólito.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 20 – Gráfico da variação do nível de eletrólito em função do tempo. Resposta da instrumentação para a recuperação da variável de interesse (nível de eletrólito).

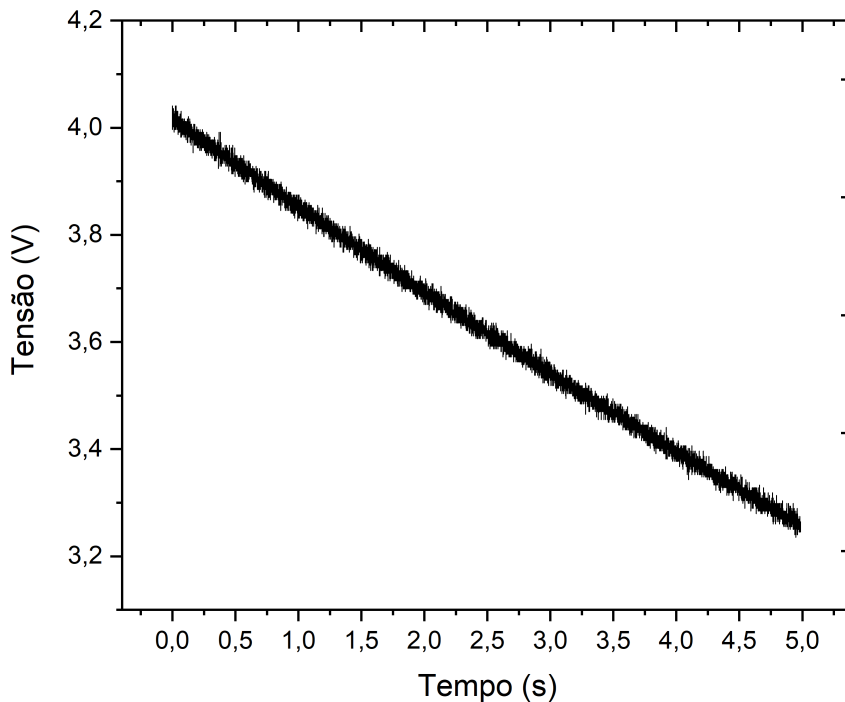


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir do sinal de tensão obtido e digitalizado, como visto na Figura 19, aplicou-se uma equação de conversão inversa, para reconstrução do sinal inicial, a partir dos componentes presentes no sistema. Conforme apresentado na Figura 20, o gráfico do nível do eletrólito em função do tempo, decai de 10 mm para 0, com uma variação de 10,0 mm. Esse comportamento decrescente comprova que o sinal foi reconstruído de forma correta e esperada com a modelagem matemática do sistema, como pode ser observado na Figura 16.

A Figura 21 apresenta a resposta da tensão em função do tempo para o sensor de concentração de eletrólito. Observa-se que, no instante inicial $t = 0$ s, o sinal elétrico assume um valor de aproximadamente 4,0 V e decresce de forma linear até atingir cerca de 3,3 V, ao final do intervalo de 5 segundos, apresentando uma variação de 0,14 V/s. Esse decaimento reflete diretamente a variação da fotocorrente gerada no fotodetector em resposta ao sinal do tipo rampa de entrada. Essa variação foi obtida a partir da modelagem computacional, como apresentado na Figura 18. Mesmo com a presença do ruído, para esse sistema sensor de concentração, a SNR calculada é de 40 dB, indicando a predominância do sinal diante do ruído branco.

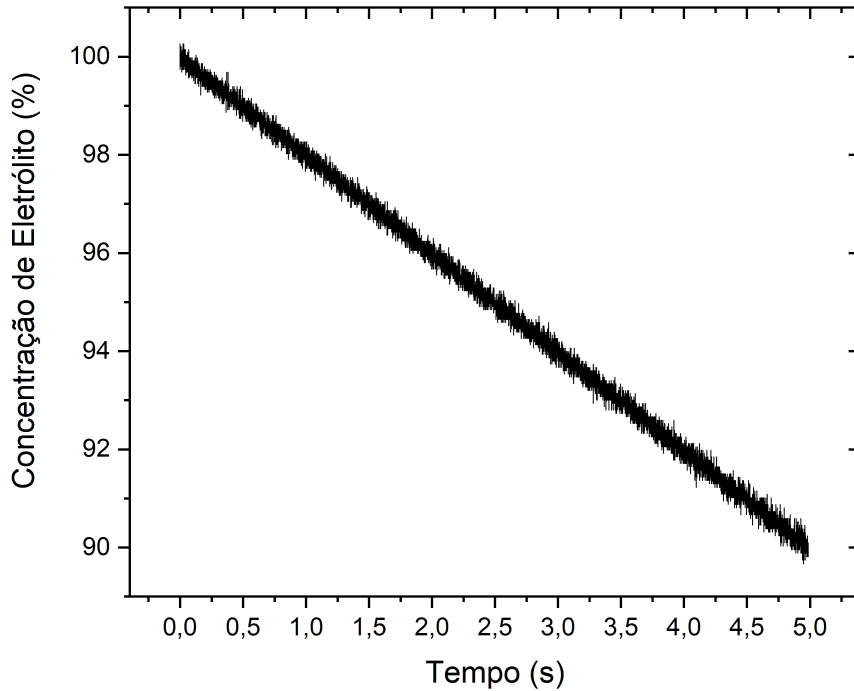
Figura 21 – Gráfico da tensão em função do tempo para o sensor de concentração de eletrólito. Resposta da instrumentação para o sinal de tensão amostrado em função do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 22 apresenta o sinal reconstituído após passar pelo bloco matemático de conversão inversa, fornecendo a concentração de eletrólito. O gráfico apresenta o mapeamento do sistema, visto que o perfil da rampa é apresentado na saída, iniciando em 100% e decaindo linearmente até atingir 90% no intervalo de tempo de 5 s.

Figura 22 – Gráfico da variação da concentração de eletrólito em função do tempo. Resposta da instrumentação para o resgate da grandeza de interesse, para uma variação na concentração em função do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com base nos resultados apresentados, temos que a modelagem computacional desenvolvida, foi capaz de simular o comportamento dinâmico de ambos os dispositivos propostos. A instrumentação projetada demonstrou robustez, mesmo com a introdução de um ruído branco de -90 dB, foi parcialmente tratado pela ação de um filtro RC passivo. O mesmo pode ser visto com relação à aplicação da equação de conversão inversa que comprovou a eficácia do algoritmo de reconstrução, onde pode ser observado a recuperação da informação de entrada, depois de passar pelo link sensor.

4.3 Figuras de Mérito dos Sensores Modelados

Em sistemas de sensoriamento, as figuras de mérito são os parâmetros que descrevem e qualificam o regime de operação e performance dos dispositivos. Neste trabalho, os parâmetros qualificados como figuras de mérito são: sensibilidade média, resolução, faixa dinâmica de operação e SNR. Como neste trabalho são apresentadas modelagens de dispositivos sensores ópticos e da instrumentação para aquisição de dados, essas figuras de mérito foram divididas em uma classe de natureza óptica e outra de natureza eletrônica.

A sensibilidade média foi obtida para a resposta óptica dos sensores a partir do ajuste linear exibido nos gráficos das figuras 16 e 18. A resolução do sensor de nível foi definida pela forma geométrica do sensor, em que os perfis D em cascata, espaçados de

1 mm, funcionam como a graduação de uma régua. Logo, tem-se uma resolução de 1 mm. Já para o sensor de concentração, usou-se a definição de resolução da Equação (20) (SEQUEIRA et al., 2019), em que considera um instrumento óptico capaz de detectar com precisão uma variação relativa de 0,01 dB e S é a sensibilidade média do sensor. Essa sensibilidade pode ser calculada por regressão linear ou pela Equação (21).

$$R_{op} = \frac{0,01dB}{S} \quad (20)$$

Na Equação (21), $\Delta\beta$ representa uma variação no parâmetro mensurável na resposta do sensor, devido uma variação $\Delta\alpha$ na grandeza mensurada. Ou seja, para os sensores ópticos modelados, $\Delta\beta$ representa uma variação na transmitância em dB e $\Delta\alpha$ representa uma variação na concentração ou nível de eletrólito. Já para a simulação do sensor inserido na instrumentação optoeletrônica, $\Delta\beta$ representa uma variação na tensão do sinal de saída, devido às variações nas grandezas sensoriadas.

$$S = \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} \quad (21)$$

A resolução calculada para o sistema eletrônico simulado é definida na equação (22), em que S_{el} representa a sensibilidade calculada para as grandezas de natureza eletrônica, com unidade de medida de V/% e V/mm, para os sensores de concentração e nível, respectivamente. Já δV é a variação de tensão mínima detectável pelo sistema modelado. Considerando que o amostrador foi projetado com base em um conversor analógico-digital de 10 bits, com tensão lógica de 5 V, tem-se que $\delta V \approx 5mV$.

$$R_{el} = \frac{\delta V}{S_{el}} \quad (22)$$

Em relação ao cálculo da SNR, considerou-se a definição exibida na equação (23), em que P_{sinal} é a potência do sinal eletrônico de saída e $P_{ruído}$ é a potência do ruído, fixada em -90 dB nas simulações realizadas com uma fonte de ruído de banda larga (ruído branco).

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \quad (23)$$

Na Tabela 4, são apresentadas as figuras de mérito dos sensores de nível e de concentração modelados, considerando a distinção da caracterização óptica e eletrônico do sistema de aquisição de dados. Nessa tabela, deve-se notar que a SNR é melhor para o sensor de concentração. Trata-se de um resultado esperado, considerando que ele exibe maior sensibilidade (em valor absoluto, adimensional). Além disso, tem-se um comparativo da resolução na detecção de concentração, calculada para a caracterização óptica e eletrônica. Como pode ser observado, considerando apenas a caracterização óptica, a resolução de 0,001 % é melhor. Contudo, a resolução da caracterização eletrônica se aproxima melhor de uma situação prática, com o elemento sensor inserido em um link sensor. Ou seja, a resolução

de 0,07 % é mais realística. Para o sensor de nível, considerando sua graduação natural, devido sua estrutura física, a resolução de 1 mm foi mantida para as duas caracterizações. Por fim, esses comparativos entre as figuras de mérito indicam a importância da simulação da instrumentação, que permitiu analisar além das características ópticas os sensores modelados.

Tabela 4 – Figuras de mérito dos sensores propostos.

Natureza	Figuras de Mérito	Sensor de Nível	Sensor de Concentração
Óptica	Sensibilidade	0,33 dB/mm	9,11 dB/%
	Resolução	1 mm	0,001%
	Faixa de medição	0 - 10 mm	90% - 100%
Eletrônica	SNR	30 dB	40 dB
	Sensibilidade do sist. eletrônico	0,28 V/mm	0,07 V/%
	Resolução do sist. eletrônico	1 mm	0,07 %
	Faixa dinâmica de operação	1,0 V - 4,0 V	3,2 V - 4,0 V

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5 CONCLUSÕES

5.1 Contribuições do Trabalho

Neste trabalho, foi apresentada a modelagem computacional de sensores à fibra óptica de plástico utilizando o COMSOL *Multiphysics*, com o objetivo de monitorar as condições internas de baterias de chumbo-ácido a partir da aferição da altura da coluna de nível líquido de eletrólito e em etapas de reutilização do do ácido presente no eletrólito, verificando a variação de sua concentração. Tratam-se de parâmetros críticos dos processos de produção e utilização de baterias de chumbo-ácido e em etapas associadas à reciclagem desses dispositivos, especialmente nos processos de recuperação, a reconcentração do ácido sulfúrico e utilização no dia-a-dia. Além da modelagem dos dispositivos, foi desenvolvido uma instrumentação optoeletrônica virtual no Simulink/MATLAB, responsável pelo condicionamento e processamentos dos sinais obtidos e da resposta desses sensores modelados. Isso permitiu a caracterização do desempenho óptico dos sensores, via COMSOL *Multiphysics*, em sistemas de aquisição de dados em um link sensor, via Simulink/MATLAB.

Embora os resultados obtidos demonstrem o potencial da abordagem proposta, eles devem ser analisados considerando as hipóteses e simplificações adotadas durante a modelagem computacional. As simulações desenvolvidas não contemplam diversos efeitos presentes em aplicações reais. Entre esses efeitos, destacam-se a temperatura, que altera tanto o índice de refração do eletrólito quanto o da fibra óptica; impurezas ou alterações químicas decorrentes dos processos de carga e descarga; deformações que podem ocorrer durante a fabricação da fibra óptica ou em seu uso prolongado; e alterações na composição química do eletrólito ao longo do tempo, as quais também não foram consideradas. Dessa forma, os resultados representam uma condição idealizada de operação, sendo necessária a validação experimental e a incorporação desses efeitos em estudos futuros, a fim de obter uma representação mais próxima das condições reais de funcionamento do sensor.

O primeiro dispositivo foi projetado de forma objetiva para atuar como um sensor multiponto, usando apenas uma única fibra óptica, com perfis D inseridos em cascata ao longo de seu comprimento, para funcionarem como os elementos sensores de nível de eletrólito. Os resultados destacam a viabilidade de utilização desse tipo de sensor para que atue como uma "régua de nível", alcançando uma resolução de 1 mm, que foi obtida e validada por meio de testes experimentais, dentro de uma faixa de medição inicial de 10 mm. Dada a simplicidade do dispositivo proposto, sua fabricação é potencialmente viável, dada a precisão de técnicas modernas, como a ablação a laser, que são ideais para criar perfis D com as dimensões modeladas na fibra óptica plástica deste trabalho, apresentando uma resposta linear, boa sensibilidade e resolução.

O segundo sensor modelado apresentou um comportamento linear para a transmitância em função da concentração do eletrólito, com uma sensibilidade média de 9,11 dB/%, para a faixa de operação de 90% a 100%, com linearidade $R^2 \approx 1$. Esse comportamento demonstra a viabilidade da utilização da fibra óptica de plástico com perfil D para sistemas de monitoramento relacionados a processos químicos e à reciclagem de baterias de chumbo-ácido. Embora a maioria das baterias utilize uma faixa menor de concentração, o modelo apresenta potencial para aplicações a níveis industriais, associados principalmente à reciclagem de baterias, visto que o ácido presente no eletrólito passa por processo de reconcentração, nas quais o monitoramento da concentração é essencial para garantir a eficiência operacional.

Considerando a análise da instrumentação obtidos via MATLAB/Simulink, os resultados indicam que o sinal obtido na saída do sistema apresentou um baixo nível de ruído e uma boa estabilidade, o que demonstra a eficiência do circuito de condicionamento de sinais implementado. O amplificador de transimpedância se mostrou eficiente ao converter a corrente proveniente do fotodetector em tensão, que junto ao filtro passa-baixa foi capaz de cortar os componentes indesejados de alta frequência. Além disso, o processamento realizado comprovou uma resposta aproximadamente linear e com maior sensibilidade. Esses resultados indicam que a instrumentação optoeletrônica é consistente. Dessa forma, a etapa de instrumentação virtual não apenas validou o funcionamento dos blocos eletrônicos, como também comprovou a viabilidade técnica de integrar o sensor proposto em sistemas reais de controle e supervisão de processos industriais.

Por fim, vale destacar que a modelagem computacional do sensor proposto foi realizada por meio de simulações numéricas aplicadas à interação óptica entre a fibra óptica polimérica com perfil D e o eletrólito de ácido sulfúrico. A abordagem utilizada permitiu investigar os mecanismos físicos responsáveis pela modulação da luz na fibra óptica. A utilização do COMSOL *Multiphysics* possibilitou uma melhor avaliação desses fenômenos de interação da luz com o meio material, permitindo a identificação dos parâmetros geométricos e ópticos que definiram a arquitetura dos sensores propostos. Adicionalmente, a implementação da instrumentação permitiu analisar o desempenho do dispositivo em um sistema optoeletrônico. Em resumo, este estudo estabelece uma boa base teórica e metodológica para o desenvolvimento de sensores ópticos aplicados ao monitoramento de processos envolvendo baterias chumbo-ácido, com aplicabilidade direta no monitoramento industrial, abrangendo as etapas de produção, reciclagem e dinâmica de funcionamento interno.

5.2 Perspectivas de Trabalhos Futuros

Como propostas de trabalhos e estudos futuros, destacam-se:

- Investigar o comportamento óptico em novos cenários: inserir mais perfis D ou alterar

a geometria deles, especialmente diminuir o espaço entre cada elemento sensor, ou em configurações mais densas. A estrutura pode se comportar como uma rede de difração de longo período, exigindo comportamento interferométrico e, consequentemente, alta sensibilidade. Além disso, realizar testes considerando a estrutura da fibra em 3D, a fim de validar o modelo e os resultados apresentados na figura em 2D.

- Avaliar os efeitos da variação de temperatura no eletrólito sobre a resposta óptica do sensor, inserindo parâmetros termo-ópticos na simulação do COMSOL. Além disso, analisar possíveis variações na resposta do modelo implementado, diante dessas variações de temperatura, verificando a estabilidade do dispositivo em diferentes condições térmicas de operação.
- Realizar a fabricação e a caracterização experimental dos sensores propostos, nível e concentração, permitindo assim, realizar a comparação entre os resultados simulados e os dados obtidos em laboratório, de forma a validar os modelos desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, H. P. **Modelagem da dinâmica de rugosidade de superfície metálica devido à corrosão em sensor óptico**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/12345679/18275>>. Citado na página 29.
- ALVES, H. P. **Fibra Óptica com Perfil D: fabricação e aplicações em sensoramento**. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- ALVES, H. P.; BARROS, T. H. C. de; SILVA, A. A. D. da; MIRANDA, L. S. C. de; FONTANA, E.; MARTINS-FILHO, J. F. Influence of surface roughness on the sensitivity of a d-shaped optical fiber-based refractive index sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 158, p. 108865, 2023. Citado na página 23.
- Avago Technologies. **HFBR-0500Z Series: Versatile Link – The Versatile Fiber Optic Connection**. [S.l.], 2020. Datasheet, 18 pages. Disponível em: <https://www.mouser.com/datasheet/2/678/AV02-1501EN_DS_HFBR-0500Z_2020-03-12-1827987.pdf>. Citado na página 37.
- BARROS, T. H. C.; MOREIRA, B. P. M.; MOURA, A. S.; OLIVEIRA, H. J. B.; MARTINS-FILHO, J. F. Lead-acid battery electrolyte density sensor using heterocore optical fiber. In: IEEE. **2024 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)**. [S.l.], 2024. p. 1–3. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 22.
- BARROS, T. H. C. de; ALVES, H. P.; MIRANDA, L. S. C. de; SILVA, A. A. D. da; FONTANA, E.; MARTINS-FILHO, J. F. D-shaped optical fiber-based refractometer for olive oil adulteration detection. **Food Control**, v. 166, p. 110741, 2024. Citado na página 15.
- BARROS, T. H. C. de; SILVA, A. A. D. da; FONTANA, E.; MARTINS-FILHO, J. F. D-shaped plastic optical fiber sensor for detection of ethanol fuel adulteration. IEEE, p. 1–3, 2021. Citado na página 15.
- BARROS, T. H. C. de; SILVA, A. A. D. da; FONTANA, E.; MARTINS-FILHO, J. F. D-shaped optical fiber refractive index sensor for application in fuel oil mixtures and leakage detection. **Optical Fiber Technology**, Elsevier, v. 74, p. 103099, 2022. Citado na página 15.
- BEZERRA, L. G.; MOURA, A. de S.; BARROS, T. H. C. de; NASCIMENTO, J. F. do; MARTINS-FILHO, J. F. Performance analysis of a hetero-core mm fiber-optic sensor for monitoring the electrolyte density of lead-acid batteries. In: **2025 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**. Campina Grande, Brazil: [s.n.], 2025. p. 311–315. Citado na página 15.
- BOCCHI, N. **Baterias**. 2000. Disponível em: <<https://qnint.s bq.org.br/qni/popup-visualizarConceito.php?idConceito=45&semFrame=1>>. Acesso em: 14 jul. 2026. Citado na página 18.

CAO-PAZ, A. M. et al. A multi-point sensor based on optical fiber for the measurement of electrolyte density in lead-acid batteries. **Sensors**, Molecular Diversity Preservation International, v. 10, n. 4, p. 2587–2608, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 15, 21, 22 e 38.

COMSOL AB. **COMSOL Multiphysics Reference Manual**. Stockholm, Sweden, 2023. Disponível em: <www.comsol.com>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.

CONRADT, R.; SCHRÖER, P.; SCHULTE, D.; WIRTH, J.; JÖRIS, F.; BIRKE, K. Electrical non-invasive determination of aging progress and failure mechanisms of field aged automotive lead batteries. **Journal of Energy Storage**, Elsevier, v. 68, p. 107571, 2023. Citado na página 19.

CULSHAW, B.; DAKIN, J. **Optical Fiber Sensors: Systems and Applications**. [S.l.]: Artech House, 1989. v. 2. Citado na página 24.

FRANCO, S. **Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, 2014. ISBN 978-0073529585. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

HAUS, J. **Optical sensors: basics and applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 15, 21 e 22.

HOSSAIN, E.; FARUQUE, H.; SUNNY, M.; MOHAMMAD, N.; NAWAR, N. A comprehensive review on energy storage systems: Types, comparison, current scenario, applications, barriers, and potential solutions, policies, and future prospects. v. 13, n. 14, jul. 2020. Publisher Copyright: © 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. Citado na página 14.

JIN, J.-M. **The finite element method in electromagnetics**. New York: John Wiley & Sons, 2015. Citado na página 28.

KEISER, G. **Optical Fiber Communications**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-0073380711. Citado na página 27.

LI, X.; ZHANG, Y.; LIU, Z.; WANG, J. Recent advances in optical fiber sensors for structural health monitoring: A review. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 24, n. 4, p. 4110–4125, 2024. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of batteries**. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2001. Citado na página 19.

MAJCHRZYCKI, W.; ŚWIERCZYŃSKI, M. et al. Electrochemical impedance spectroscopy and determination of the internal resistance as a way to estimate lead-acid batteries condition. **Batteries**, MDPI, v. 70, n. 4, p. 1–13, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 20.

MIRANDA, L. S. C. de; BARROS, T. H. C. de; MOURA, A. de S.; MARTINS-FILHO, J. F. Simulation and experiment of a smf-ncf-smf hetero-core fiber refractive index sensor with discrete interrogation. In: **2025 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**. [S.l.: s.n.], 2025. p. 386–390. Citado na página 15.

OLIVEIRA, H. J. B. D.; BARROS, T. H. C. D.; SILVA, A. A. D. D.; NASCIMENTO, J. F. D.; MARTINS-FILHO, J. F. Refractive index sensor based on hetero-core fiber interrogated by a laser/photodetector at 1550 nm. In: **2023 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN) and SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–2. Citado na página 15.

PAVLOV, D. **Lead-acid batteries: science and technology**. [S.l.]: Elsevier, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.

REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

REZENDE, S. M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004. ISBN 9788588325272. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.

SADIKU, M. N. O. **Numerical Techniques in Electromagnetics**. 2. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. ISBN 9780849321398. Citado na página 28.

SEQUEIRA, F.; CENNAMO, N.; RUDNITSKAYA, A.; NOGUEIRA, R.; ZENI, L.; BILRO, L. D-shaped pof sensors for refractive index sensing—the importance of surface roughness. **Sensors**, MDPI, v. 19, n. 11, p. 2476, 2019. Citado na página 48.

SILVA, M. S. P. e.; ALVES, H. P.; OLIVEIRA, H. J. B. de; LEÃO, L. H. V.; NASCIMENTO, J. F. d.; MARTINS-FILHO, J. F. Temperature, refractive index, and corrosion simultaneous monitoring using raman anti-stokes reflectometric optical fiber sensor. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 1–8, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 21.

SIQUEIRA NETO, P.; de Barros, T. H. C.; MARTINS-FILHO, J. F.; ALVES, H. P. Electrolyte level sensor based on plastic optical fiber for lead-acid batteries applications. In: IEEE. **2025 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**. [S.l.], 2025. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 32.

TEICH, M. C.; SALEH, B. **Fundamentals of photonics**. [S.l.]: Wiley New Jersey, 2007. v. 2. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

The MathWorks Inc. **MATLAB and Simulink**. Natick, Massachusetts, United States, 2023. Software de simulação multidomínio e modelagem baseada em projetos. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>>. Citado na página 36.

UDD, E. **Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1991. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.

VIEIRA, A. **Refração da luz: por que a fibra óptica e o arco-íris são “parentes”?** 2021. Disponível em: <<https://descomplica.com.br/blog/fisica/refracao-da-luz-por-que-a-fibra-optica-e-o-arco-iris-sao-parentes/>>. Acesso em: 14 jul. 2026. Citado na página 21.

YANG, Y.; BREMNER, S.; MENICTAS, C.; KAY, M. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 91, p. 109–125, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

YE, Y. et al. Portable multihole plastic optical fiber sensor for liquid-level and refractive index monitoring. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 23, n. 3, p. 2161–2168, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 15, 22 e 31.

ZHAO, Y. et al. Research on the internal information monitoring of reflective optical fiber spr sensor in lead acid battery. In: IEEE. **2024 IEEE Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology**. [S.l.], 2024. p. 1–5. Citado 3 vezes nas páginas 15, 24 e 38.

APÊNDICE A – Lista de publicações

Artigos Publicados em Conferência Internacional

- P. Siqueira Neto, T. H. C. de Barros, J. F. Martins-Filho and H. P. Alves, “Electrolyte Level Sensor Based on Plastic Optical Fiber for Lead-Acid Batteries Applications,” *2025 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Campina Grande, Brazil, 2025, pp. 602-604. DOI: <10.1109/IMOC65414.2025.11365697>

Artigos Publicados em Conferência Nacional

- P. Siqueira Neto, T. H. C. de Barros, J. F. Nascimento, J. F. Martins-Filho and H. P. Alves, “Modelagem Computacional de um Sensor a Fibra Óptica de Diâmetro Reduzido para Detecção de Hidrogênio,” *XXI Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO)*, Bento Gonçalves, Brazil, 2024, pp. 1-3.
- P. Siqueira Neto, H. P. Alves, T. H. C. de Barros and J. F. Martins-Filho, “Modelagem de Sensor a Fibra Óptica com Perfil D para Monitoramento de Eletrólito em Baterias de Chumbo-Ácido,” *XXII Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO)*, Gravatá, Brazil, 2026.