

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso

**Estudo e simulação de sensores fotônicos para
monitoramento de baterias de Lítio recarregáveis**

Moisés de Araújo Oliveira

Campina Grande - PB

Outubro de 2024

Moisés de Araújo Oliveira

Estudo e simulação de sensores fotônicos para monitoramento de baterias de Lítio recarregáveis

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI

Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica - CGEE

Adolfo Fernandes Herbster, D.Sc.

(Orientador)

Campina Grande - PB

Outubro de 2024

Moisés de Araújo Oliveira

Estudo e simulação de sensores fotônicos para monitoramento de baterias de Lítio recarregáveis

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em ____ / ____ / ____

Antonio Marcus Nogueira Lima
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Adolfo Fernandes Herbster
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Campina Grande - PB
Outubro de 2024

Dedico este trabalho a meus pais, Francisco Nane de Oliveira Filho e Idivânia Campos de Araújo Oliveira, por todo o amor.

Agradecimentos

Dedico este trabalho à minha família, especialmente a meus pais, que sempre me apoiaram nos estudos e nas minhas decisões. Agradeço também a meu irmão, Miguel de Araújo Oliveira, por toda a paciência, amor e inúmeros momentos de paz e descontração.

Agradeço aos meus primos, Rubens, Myller, Misael, Ribamar Filho, Kevin, Jessica, Milleny, Rebeca e Thayssa, que são como irmãos para mim e que me ajudaram com momentos divertidos quando eu estava precisando. Agradeço também a meus tios, pelos bons momentos de descontração. Não posso deixar de expressar minha gratidão aos meus avós, por serem uma das minhas fontes de refúgio e, além de tudo, por todo o amor que me proporcionaram durante a execução deste trabalho.

Agradeço muito a meus grandes amigos que fiz na época do colégio, Felipe, Forlán, Guilherme, Johnatan, Jennifer, Leticia e Carol, por sempre terem me apoiado, me ajudado e me proporcionarem momentos únicos e inesquecíveis que levarei comigo durante toda a vida.

Não poderia deixar de agradecer aos bons amigos que fiz durante a graduação, Tayrone, Yuri, Airon, Bruno, Micael, Léo, Lucas Lobo, Victor Hugo, Jan Paulo, Caio, Dhara, Leiry, Sabrina, Débora e Julia, por terem feito da minha graduação um processo mais leve, além das inúmeras ajudas e companheirismo que me deram nos momentos difíceis.

Gostaria de agradecer também ao professor Adolfo Herbster, por ter me orientado e me dado a oportunidade de trabalhar no projeto de fotônica, além de ter tido muita paciência comigo nos últimos anos e me ouvido nos momentos complicados que tive durante a graduação.

“Daria tudo que sei pela metade do que ignoro.”
(René Descartes)

Resumo

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica de componentes ópticos e fotônicos que têm aplicações em sensoriamento. Serão estudadas a aplicação de anéis de ressonância em biosensores e também a aplicação de FBG (*Fiber Bragg Grating*) em sensoriamento de baterias de Lítio recarregáveis, que podem ter aplicações em carros elétricos e sistemas de armazenamento de energia.

Palavras-chave: FBG; Fotônica; Veículos elétricos; Baterias de Lítio.

Abstract

This work consists of a literature review on optical and photonic components with sensing applications. It will investigate the application of resonance rings in biosensors, as well as the use of Fiber Bragg Grating (FBG) in the sensing of rechargeable lithium-ion batteries, which could have applications in electric vehicles and energy storage systems.

Keywords: FBG; Photonics; Sensing; Lithium-ion batteries;

Lista de ilustrações

Figura 1 – Anel de ressonância genérico	4
Figura 2 – Espectro do anel de ressonância na condição crítica	5
Figura 3 – Princípio de funcionamento de um biosensor	6
Figura 4 – Distribuições de campo do modo TE.	9
Figura 5 – Curvas de sensitividades e profundidade de penetração	10
Figura 6 – Curvas de sensibilidade em relação a variação de temperatura	10
Figura 7 – Sensibilidade do guia de dimensão 220x500 nm	11
Figura 8 – Parâmetros de Projeto da Grade de Bragg.	11
Figura 9 – Visão esquemática de uma grade de Bragg em fibra Óptica com período Λ_G	12
Figura 10 – Refletividade de uma FBG com $\lambda_B = 1550$ nm e diferentes valores de κ_L	14
Figura 11 – Diagrama da integração das FBGs em células do tipo moeda.	17
Figura 12 – Mudança do comprimento de onda de Bragg em função da mudança de temperatura.	17
Figura 13 – Variação da temperatura em função do tempo para o cátodo (a) e o ânodo (b) durante a descarga sob uma corrente de 30 mA. O período de tempo entre "start" e "end" corresponde ao processo de descarga.	18
Figura 14 – Diagrama da integração das FBGs em células cilíndricas.	18
Figura 15 – Variação de temperatura no cátodo em função do tempo para várias correntes.	19
Figura 16 – Esquematização do sensor implatado e do fixado na bateria.	20
Figura 17 – Variação do comprimento de Bragg do sensor implantado e do sensor fixado da superfície no ânodo em função da quantidade de carga da bateria.	20
Figura 18 – Esquematização da pressão sofrida pelo sensor implatado e pelo fixado na superfície do ânodo.	21
Figura 19 – Distribuição do campo elétrico na entrada da fibra.	21
Figura 20 – Resultado da simulação da FBG.	22
Figura 21 – Simulação do comprimento de onda de bragg em função da temperatura.	22
Figura 22 – Reta de sensibilidade da FBG simulada.	22
Figura 23 – Variação do comprimento de onda em função do período da grade.	23
Figura 24 – Variação do comprimento de onda em função da mudança do período e estimação da pressão pela lei de Hooke.	23

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre os sensores tradicionais e os sensores ópticos	16
Tabela 2 – Comparação entre os sensores de pressão tradicionais e os sensores baseados em FBG.	19

Lista de abreviaturas e siglas

FSR	<i>Free Spectral Range</i>
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
TE	<i>Transverse Electric</i>
TM	<i>Transverse Magnetic</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
2	METODOLOGIA	3
2.1	Organização do trabalho	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1	Sensores baseados em anéis de ressonância	4
3.1.1	Aplicação de anéis de ressonância: Biosensores	6
3.2	Grades de Bragg	10
3.3	FBG (<i>Fiber Bragg Grating</i>)	12
4	DESENVOLVIMENTO	16
4.1	Revisão na Literatura	16
4.2	Simulações	20
4.2.1	Temperatura	20
4.2.2	Deformação/Pressão	21
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
5.1	Trabalhos futuros	24
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1 Introdução

Nos últimos anos, a busca por fontes de energias renováveis e limpas se tornou uma questão de extrema importância e um tópico amplamente discutido na comunidade global. Um exemplo das diversas tentativas da busca de fontes renováveis de energia, com o intuito de reduzir a emissão de CO_2 , é a transição dos combustíveis fósseis para a adoção de baterias nos automóveis, por exemplo. Nesse contexto, a produção de carros elétricos movidos a baterias de lítio recarregáveis já está sendo desenvolvida e apresenta um mercado ativo e em crescimento (XIA et al., 2022). Em 2021, estima-se que foram vendidos 6,6 milhões de carros elétricos, e esse número tende a dobrar nos próximos anos (XIA et al., 2022).

Quando a aplicação das baterias mudam da eletrônica para carros elétricos, sua capacidade requisitada cresce exponencialmente e, portanto, a qualidade, confiabilidade e vida útil devem ser tratadas de forma mais atenciosa (TIAN et al., 2021). Dessa forma, é fundamental ter um sistema de monitoramento para as baterias de lítio recarregáveis, que são a fonte de energia para o funcionamento do carro elétrico, a fim de manter o bom funcionamento e prover um tempo de vida útil longo.

Atualmente, um sistema de monitoramento de bateria tradicional é capaz de monitorar apenas a tensão, a corrente e a temperatura na superfície da bateria/célula, o que é insuficiente para atender às crescentes exigências de saúde e segurança das baterias (LU et al., 2013), além desses parâmetros externos serem limitados e não refletirem precisamente o que ocorre dentro da bateria. Portanto, os pesquisadores vêm se preocupando com outros parâmetros, além dos já citados, que podem de alguma forma monitorar o estado da bateria. Esses parâmetros incluem o índice de refração dos eletrólitos, a pressão na bateria, a deformação sofrida pela bateria e o espectrograma dos materiais (WEI et al., 2021).

Recentemente, sensores de fibra óptica vêm atraindo muita atenção devido as suas vantagens, pois diferentemente dos sensores elétricos/eletrônicos usuais, a fibra óptica é compacta, quimicamente inerte e apta a ser inserida dentro ou na superfície da célula/bateria (ZHANG et al., 2024). Além disso, possui uma alta sensibilidade, permitindo a medição de vários parâmetros, como a temperatura, pressão e até mesmo o índice de refração. (ZHANG et al., 2024).

Nesse contexto, a fim de continuar com o estudo e desenvolvimento da óptica em sistemas de monitoramento de bateria, circuitos fotônicos em silício podem ser uma boa solução, devido às várias vantagens que apresentam, como o *footprint* compacto, a facilidade de integração com circuitos eletrônicos e o fato de serem fabricados com o processo de fabricação CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de estudar e simular sensores ópticos e fotônicos para monitoramento de baterias de lítio recarregáveis, a fim de coletar equações e resultados presentes na literatura e comparar com as simulações que vão ser feitas. Mais especificamente, será feito um estudo, revisão e simulação da aplicação de alguns componentes ópticos e fotônicos para sensoriamento da temperatura e da pressão (deformação) que a bateria pode estar submetida.

2 Metodologia

Este trabalho será feito com o intuito de fazer uma revisão da teoria e aplicação de componentes ópticos e fotônicos em sensoriamento. Será feito a leitura de artigos e livros presentes na literatura, a fim de obter o material teórico. Por fim, serão realizadas simulações utilizando o software *Lumerical* da empresa *ANSYS* a fim de comparar com resultados presentes na literatura.

2.1 Organização do trabalho

O capítulo 3 se dedica a fazer a revisão bibliográfica de alguns componentes ópticos, como o anel de ressonância, a grade de Bragg e grade de Bragg em fibra (FBG). Inicialmente, será mostrado a aplicação na área de biosensores do anel de ressonância e seu princípio de funcionamento. Por fim, será tratada a teoria das FBGs e seu comportamento ao variar a temperatura e a pressão.

O capítulo 4 se dedica a mostrar e investigar resultados experimentais da implementação de sensores baseados em FBG's em baterias de Lítio recarregáveis. Serão feitas simulações utilizando o software *Lumerical MODE*, a fim de gerar os resultados da variação do comprimento de onda de Bragg em relação á temperatura e pressão.

O capítulo 5 irá tratar das conclusões e de algumas considerações finais obtidas ao término deste trabalho, além de apresentar algumas propostas de possíveis trabalhos futuros.

3 Fundamentação Teórica

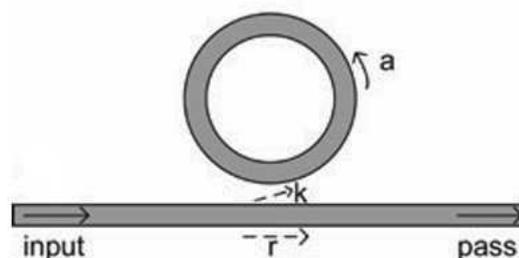
Este capítulo faz uma revisão teórica dos dispositivos ópticos e fotônicos que serão utilizados neste trabalho. Inicialmente, trataremos do anel de ressonância, um dispositivo que tem aplicação na área de biosensores, mas ainda não é muito estudado para aplicação de sensoriamento em baterias. Além disso, será feita uma revisão teórica a respeito das grades de Bragg em fibra, que já são bem estudadas para sensoriamento em baterias de Lítio recarregáveis.

3.1 Sensores baseados em anéis de ressonância

Os dispositivos fotônicos de Silício vêm sendo bastante utilizados e desenvolvidos nos últimos anos, devido às várias vantagens que apresentam. Dentre essas vantagens, podemos citar o *footprint* compacto, a facilidade de integração com circuitos eletrônicos e o fato de serem manufacturados com o processo de fabricação CMOS (*complementary metal-oxid-semiconductor*), que é um dos mais utilizados. Além disso, devido ao alto contraste entre o índice de refração do Silício e do Dióxido de Silício, é permitido um alto confinamento da luz nos guias.

Dentre esses dispositivos, está o anel de ressonância, que é um dispositivo passivo e atua como um filtro periódico. Um anel de ressonância consiste em um guia óptico que apresenta um loop voltado para si mesmo, através de um acoplador direcional. A ressonância ocorre quando o comprimento do caminho óptico percorrido é exatamente um número inteiro do comprimento de onda. Dessa forma, um anel de ressonância tem múltiplas ressonâncias, e a distância entre essas ressonâncias é denominada de *Free Spectral Range* (FSR) (BOGAERTS et al., 2012a). A Figura 1 ilustra um anel de ressonância genérico.

Figura 1 – Anel de ressonância genérico



Fonte: (BOGAERTS et al., 2012b)

Os parâmetros r e k são os coeficientes de acoplamento do acoplador direcional, e

a está relacionado com o coeficiente de atenuação α [1/cm] pela forma $a^2 = \exp(-\alpha L)$. Os comprimentos de onda onde ocorrem as ressonâncias são dados pela equação abaixo:

$$\lambda_{res} = \frac{n_{eff}L}{m}, m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

em que n_{eff} é o índice efetivo do modo e L é o comprimento do ressonador.

A razão entre o campo de entrada e de saída é dada por (HEEBNER; GROVER; IBRAHIM, 2008):

$$\frac{E_{pass}}{E_{input}} = e^{i(\pi+\phi)} \frac{a - re^{-i\phi}}{1 - ra e^{i\phi}} \quad (3.2)$$

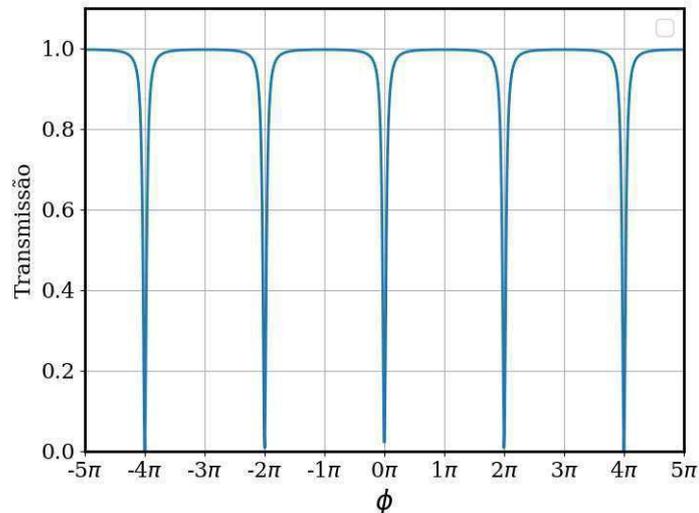
em que $\phi = \beta L$ é o deslocamento de fase e β é a constante de propagação do modo propagante. Ao elevar ao quadrado a equação acima, obtemos a potência transmitida, que é a razão entre a intensidade dos campos:

$$T = \frac{|E_{pass}|^2}{|E_{input}|^2} = \frac{|a - r \cos \phi + ri \sin \phi|^2}{|a - ra \cos \phi + rai \sin \phi|^2} = \frac{a^2 - 2ra \cos \phi + r^2}{1 - 2ra \cos \phi + r^2 a^2} \quad (3.3)$$

A ressonância ocorre quando ϕ é um múltiplo de 2π . Quando $r = a$, ou seja, quando a potência de acoplamento é igual a potência perdida no anel, a transmitância cai pra zero na ressonância. Esse caso é conhecido como acoplamento crítico e está mostrado na Figura 2. Outro parâmetro importante, que é a FSR, é dado pela equação abaixo (BOGAERTS et al., 2012a), onde n_g é o índice de grupo do modo propagante.

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L} \quad (3.4)$$

Figura 2 – Espectro do anel de ressonância na condição crítica



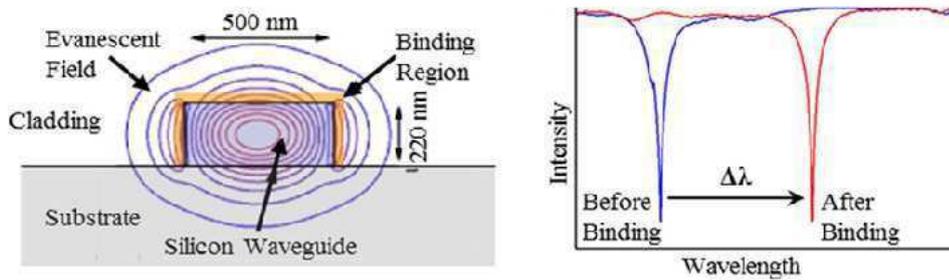
Fonte: Elaborada pelo autor

3.1.1 Aplicação de anéis de ressonância: Biosensores

Os anéis de ressonância em fotônica de Silício têm várias aplicações, podendo atuar como moduladores e filtros ópticos, por exemplo. Além desses casos de aplicação, podem ainda servir como componentes para sensoriamento, tendo espaço na área de biosensores. O princípio de funcionamento desses dispositivos está baseado no campo evanescente que se propaga fora do núcleo do guia, podendo interagir com moléculas e mudando as características ópticas desse meio.

A interação de moléculas com o campo evanescente que se propaga fora do guia, mais especificamente no *cladding*, muda o índice de refração desse meio e altera, consequentemente, o índice efetivo do modo propagante. Essa mudança resulta no deslocamento do comprimento de onda de ressonância, mais mencionado na literatura como *resonant wavelength shift* (FARD et al., 2014). A Figura 3 ilustra o princípio de funcionamento desse dispositivo. A taxa de variação do índice efetivo em relação ao índice de refração do *cladding* é definido como a sensibilidade do modo S_{mode} (FARD et al., 2014):

Figura 3 – Princípio de funcionamento de um biosensor



Fonte: (SCHMIDT et al., 2014)

$$S_{mode} = \frac{\delta_{neff}(n_{cl}, n_{co}, n_{sub}, \omega)}{\delta_{n_{cl}}} \quad (3.5)$$

em que n_{cl} é o índice de refração do *cladding*, n_{co} o índice de refração do núcleo, n_{sub} o índice de refração do substrato e ω é a frequência óptica. Como já foi mencionado, a mudança no índice efetivo do guia tem como consequência o deslocamento do comprimento de onda ressonante (*resonant wavelength shift*), e essa alteração pode ser medida. A sensibilidade do índice de refração é definida como a variação do comprimento de onda ressonante em função da variação do índice de refração do *cladding* (FARD et al., 2013):

$$S = \frac{\Delta\lambda_{res}}{\Delta n_{cl}} = \frac{\lambda_{res}}{n_g} \frac{\delta_{neff}}{\delta_{n_{cl}}} \quad (3.6)$$

em que λ_{res} é o comprimento de onda ressonante. Outro parâmetro importante para os sensores baseados em ressonadores é o fator de qualidade Q . O fator de qualidade pode

ser entendido como o número de oscilações ópticas até que a energia ressonante decaia para $1/e$ (aproximadamente 37%) do seu valor máximo. Matematicamente, Q pode ser expresso e aproximado como (CHROSTOWSKI et al., 2012; FARD et al., 2013):

$$Q = \omega_{res} \frac{E}{\partial E / \partial t} = \frac{2\pi n_g \cdot 4,34}{\lambda_{res} \alpha_{[db/cm]}} \approx \frac{\lambda_{res}}{\Delta\lambda_{3dB}} \quad (3.7)$$

em que $\omega_{res} = 2\pi f_{res}$ é a frequência de ressonância, α é a perda e $\Delta\lambda_{3dB}$ é a banda de 3dB do ressonador, também conhecida como FWHM (*Full Width at Half Maximum*). Pela equação acima, é fácil ver que quanto maior for o fator de qualidade, menor será o FWHM, fazendo com que a ressonância fique mais aguda. Além disso, quanto maior for o fator de qualidade, a mudança no comprimento de onda ressonante fica mais fácil de ser detectada. Dessa forma, tanto o fator de qualidade Q quanto a sensibilidade S impactam na performance do sensor. Outro parâmetro importante a ser destacado é o limite absoluto de detecção, que é definido como sendo a mudança mínima no índice de refração do *cladding* para se ter uma mudança detectável no sinal de saída. Esse parâmetro depende tanto das características intrínsecas do dispositivo, quanto dos fatores que afetam os instrumentos de medição (estabilidade térmica, ruído do laser de entrada, etc) (FARD et al., 2014). Dessa forma, fica inviável comparar dispositivos que passaram por sistemas diferentes. Portanto, para razão de comparação entre sensores, utilizamos o parâmetro *ILOD* (Intrinsic Limit of Detection), que depende apenas das características intrínsecas do anel de ressonância (YOSHIE; TANG; SU, 2011):

$$ILOD = \frac{\lambda_{res}}{QS} \quad (3.8)$$

Uma maneira de diminuir o *ILOD*, ou seja, de deixar o sensor mais sensível, é aumentando a sensibilidade S . Isso pode ser feito aumentando a interação do campo elétrico propagante com as moléculas do *cladding*. No entanto, ao fazer isso, as perdas do modo aumentam devido a absorção das moléculas presentes no *cladding*, de tal forma que o fator de qualidade Q diminui.

Pesquisadores tentaram aumentar a interação do campo elétrico do modo propagante com o *cladding* ao aplicaram o modo TM (*Transverse Magnetic*). Embora esses modos apresentaram uma melhora na sensibilidade, foi visto que os modos TM tendem a ter uma alta perda, fazendo com que diminua o fator de qualidade Q e diminua o *ILOD*. Uma outra maneira de aumentar essa interação do campo mencionada anteriormente é utilizar o modo TE com a altura do núcleo do guia menor, fazendo com que a porção do campo elétrico fora do núcleo seja maior. Quanto menor for a altura do guia, menos confinado é o modo propagante e maior a interação do campo evanescente com o *cladding*. A equação do campo elétrico evanescente fora do núcleo do guia pode ser aproximada por:

$$E(d) \approx E_0 e^{-d \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{n_{eff}^2 - n_{cl}^2}} \quad (3.9)$$

em que E_0 é a intensidade do campo elétrico na superfície do núcleo, d é a distância perpendicular à superfície e λ_0 é o comprimento de onda. Outro parâmetro importante é a profundidade de penetração (*penetration depth*), que é definido como sendo a distância em que o campo elétrico decai de E_0 para E_0/e . Assim, pela equação acima, a profundidade de penetração d_e pode ser dada por (FARD et al., 2014):

$$d_e = \frac{\lambda_{res}}{2\pi \sqrt{n_{eff}^2 - n_{cl}^2}} \quad (3.10)$$

Para fins de estudo, foi utilizado o *software LUMERICAL MODE* para realizar a simulação das secções transversais dos guias, a fim de extrair os resultados necessários, que são o índice efetivo e o índice de grupo dos modos propagantes, e utilizar as equações mencionadas para plotar as curvas de sensibilidade. No *cladding*, o material utilizado foi a água, no núcleo o Silício e no substrato o Dióxido de Silício.

A Figura 4 mostra a distribuição de campo do modo TE (*Transverse Electric*) para o caso em que os guias apresentem altura de 90 nm, 150 nm e 220 nm, respectivamente. Já a figura 5 mostra os gráficos de sensibilidade.

Outro parâmetro muito importante e objetivo deste trabalho é a a variação do comprimento de onda de ressonância em função da variação de temperatura. Quando a temperatura varia, os índices de refração dos materiais variam devido ao efeito termo óptico, e a circunferência do anel muda devido a expansão térmica. O deslocamento do comprimento de onda de ressonância é dado, então, pela contribuição do efeito termo-óptico $\Delta\lambda_T$ e pela contribuição da expansão térmica $\Delta\lambda_L$ (KIM et al., 2010)

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_L + \Delta\lambda_T = \alpha_w \frac{n_{eff}}{n_g} \lambda \Delta T + \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \lambda \frac{\Delta T}{n_g} \quad (3.11)$$

em que α_w é o coeficiente de expansão térmica, ΔT é a variação de temperatura. Na simulação feita, foi utilizado $\alpha_w = 2,5 \times 10^{-6}/^\circ C$ (OKADA; TOKUMARU, 1984) para o Silício, e o coeficiente de expansão térmica do Dióxido de Silício foi desconsiderado, tendo em vista que a espessura da camada de substrato de Silício é muito maior do que a do Dióxido. Além disso, para λ igual a $1,5 \mu$ e T próximo a $295K$, o coeficiente termo óptico do Silício usado foi $1,8 \times 10^{-4}/^\circ C$ (FREY; LEVITON; MADISON, 2006), do Dióxido de Silício foi $2,8 \times 10^{-5}/^\circ C$ (CHROSTOWSKI; HOCHBERG, 2015), e o da água $-9,9 \times 10^{-5}/^\circ C$ (BASHKATOV; GENINA, 2003). Foi utilizado o *software LUMERICAL MODE* para calcular a variação do índice efetivo em relação à temperatura dos guias e seus respectivos índices de grupo. Ao calcular tais parâmetros, foi utilizado a Equação 3.11

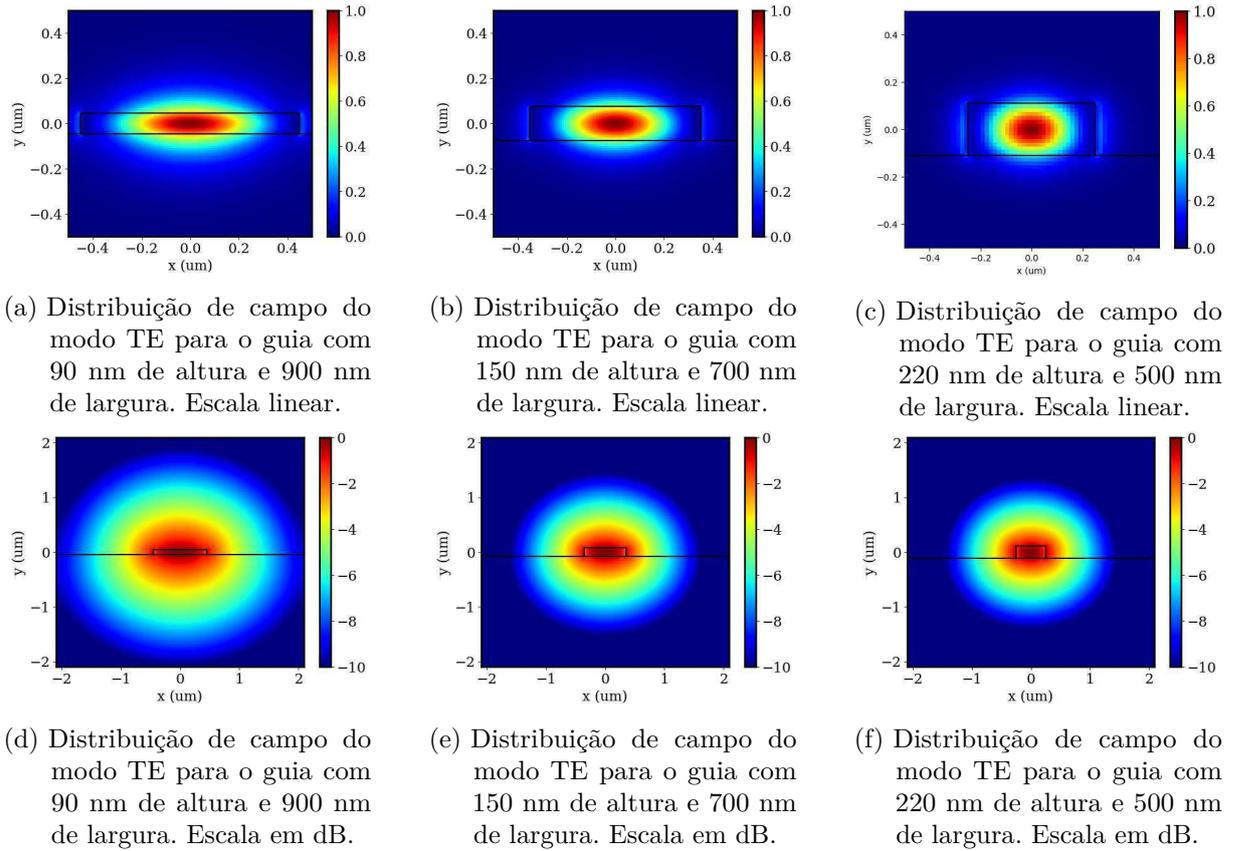


Figura 4 – Distribuições de campo do modo TE.

Fonte: Elaborada pelo autor

para calcular a variação do comprimento de onda em relação a variação de temperatura. A Figura 6 mostra os resultados obtidos.

Uma outra simulação foi feita com o guia de dimensões 220x500 nm (220 nm de espessura e 500 nm de largura), dessa vez utilizando a ferramenta *INTERCONNECT* do software *LUMERICAL* a fim de obter os gráficos da resposta do anel de ressonância para várias temperaturas. Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 7. Para realizar essa simulação, é feito o seguinte procedimento: Inicialmente, simulamos a seção transversal do guia utilizando o *LUMERICAL MODE*, e os dados foram exportados para o *INTERCONNECT*. Feito isso, utilizou-se o modelo compacto do anel de ressonância, que consiste de um acoplador direcional (disponível na biblioteca de elementos do *INTERCONNECT* e o guia cujos dados foram exportados. Pelo resultado mostrado na Figura 7, observa-se um comportamento do deslocamento do comprimento de onda ressonante em função da variação de temperatura.

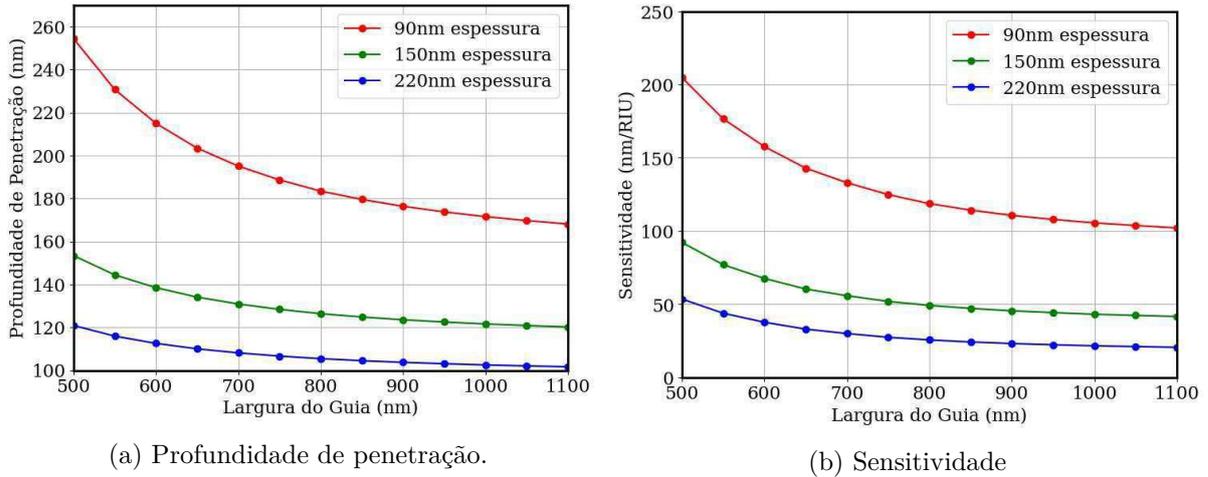


Figura 5 – Curvas de sensibilidade e profundidade de penetração

Fonte: Elaborada pelo autor

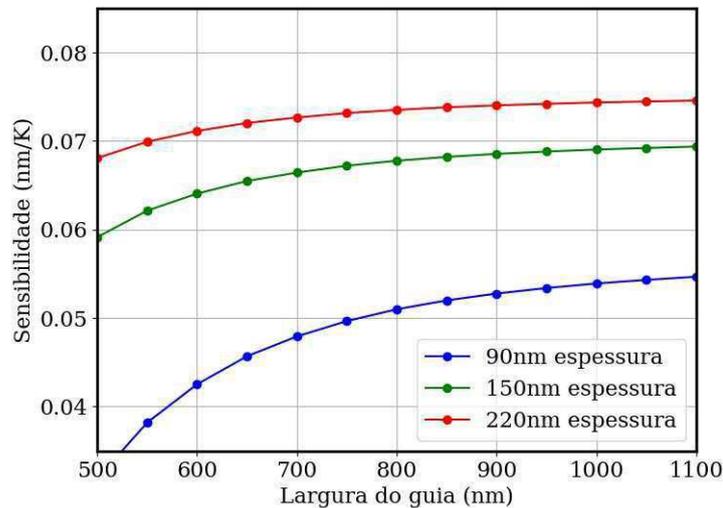


Figura 6 – Curvas de sensibilidade em relação a variação de temperatura

Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 Grades de Bragg

A Grade de Bragg (*Bragg Grating*) é um dispositivo óptico que vem sendo estudado e desenvolvido para aplicações em *lasers*, filtros e biosensores. Esse dispositivo realiza a modulação do índice efetivo do guia óptico, obtendo características de um filtro no seu espectro (ERDOGAN, 1997). Comparado com os anéis de ressonância, as grades oferecem vantagens como a perda reduzida, maior fator de qualidade e menor custo por sensor (SCHMIDT et al., 2014). A Figura 8 ilustra os parâmetros de projeto para uma Grade de Bragg.

Pela Figura 8, d é a distância de penetração do guia, Λ é o período, Λ_p é o deslocamento de fase, W é a largura média do guia, a e b são os segmentos individuais e L é comprimento total da Grade. O período Λ cria a modulação do índice de refração do

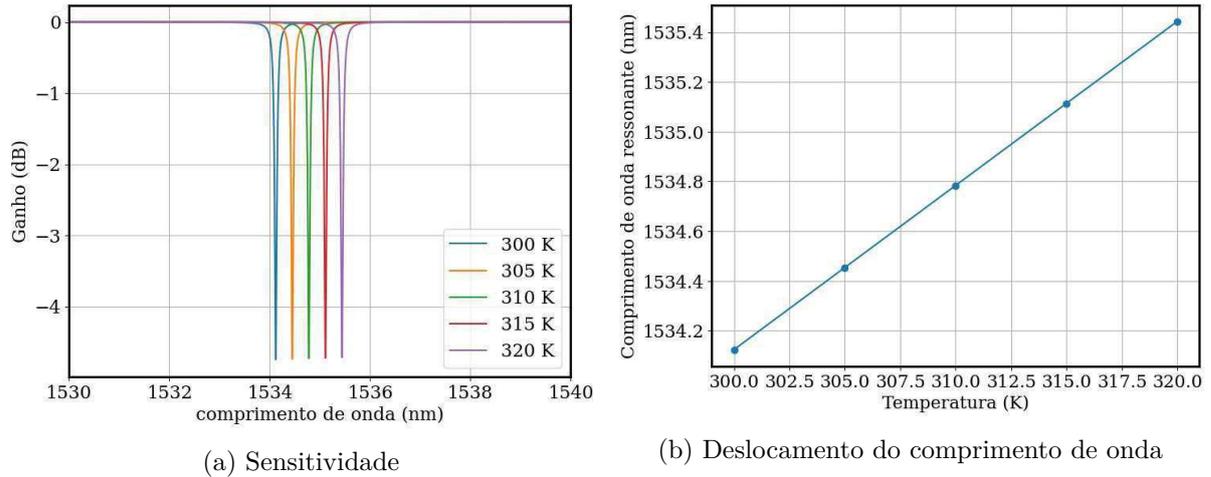


Figura 7 – Sensibilidade do guia de dimensão 220x500 nm

Fonte: Elaborada pelo autor

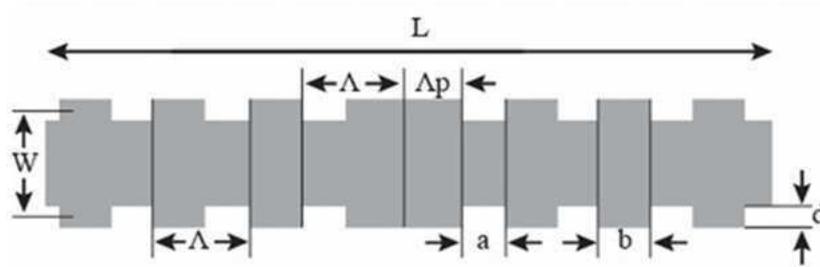


Figura 8 – Parâmetros de Projeto da Grade de Bragg.

Fonte: (SCHMIDT et al., 2014)

guia, resultando em uma banda de rejeição na transmissão da potência óptica. Além disso, o deslocamento de fase Δp cria uma cavidade *Fabry-Perot* de primeira ordem, originando um fator de qualidade Q maior. (SCHMIDT et al., 2014; YARIV; YEH, 2023). A condição de Bragg é dada por:

$$an_1 + bn_2 = \frac{m\lambda_B}{2} \quad (3.12)$$

em que n_1 é o índice de refração do guia de comprimento a , n_2 o índice de refração do guia de comprimento b , m é a ordem da grade e λ_B é o comprimento de onda de Bragg (O comprimento de onda central onde ocorre a banda de rejeição da transmissão).

Foram feitas simulações de uma grade de Bragg simétrica ($a = b$), a fim de obter um espectro com um FWHM entre 0.05 e 0.3 nm, que é geralmente a banda de aplicação para sensoriamento (WERNECK et al., 2013). Desse modo, foi optado por seguir o estudo com as grades de bragg em fibra, devido a maior quantidade de artigos na literatura e da praticidade de conseguir uma banda menor.

3.3 FBG (*Fiber Bragg Grating*)

A grade de bragg em Fibra óptica (FBG) é um dispositivo óptico que é obtido através da modulação do índice de refração do núcleo da fibra óptica, refletindo um comprimento de onda específico, atuando como um filtro rejeita faixa. A Figura 9 ilustra uma FBG simples.

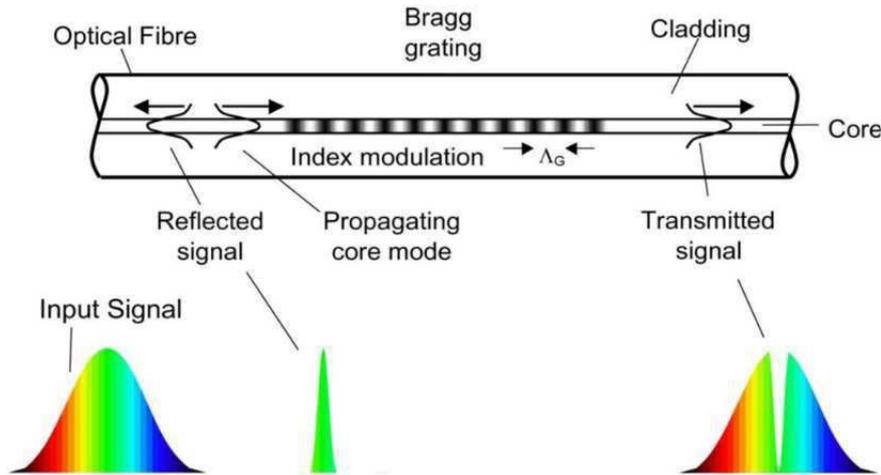


Figura 9 – Visão esquemática de uma grade de Bragg em fibra Óptica com período Λ_G

Fonte: (MIHAILOV, 2012)

Uma parte da luz que se propaga no guia é refletida devido à descontinuidade nas interfaces das camadas, enquanto a parte restante continua a se propagar. Dessa forma, o feixe é dividido em duas componentes que viajam em direções opostas, causando o acoplamento da onda incidente com a onda que se propaga na direção contrária. Em um comprimento de onda específico, as reflexões se interferem construtivamente, causando um pico no espectro da reflexão e um vale no espectro da transmissão. Esse comprimento de onda específico é o comprimento de onda de Bragg e é dado por

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (3.13)$$

em que n_{eff} é o índice efetivo e Λ é o período da grade. O espectro da refletividade e transmitância podem ser precisamente calculados utilizando a teoria dos modos acoplados. A variação periódica do índice efetivo é dada por (ERDOGAN, 1997)

$$\delta_{n_{eff}}(z) = \overline{\delta_{n_{eff}}} \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (3.14)$$

em que $\overline{\delta_{n_{eff}}}$ é a variação DC espacial média sobre um período da grade, v é a ordem da grade (unitário para uma grade uniforme (CAMPANELLA et al., 2018)), e $\phi(z)$ é o *chirp* da grade. Para uma grade geral, tem-se que o coeficiente de autoacoplamento DC $\hat{\sigma}$ é dado por (ERDOGAN, 1997):

$$\hat{\sigma} = \delta + \sigma + \frac{d\phi}{dz} \quad (3.15)$$

em que σ é o coeficiente de acomplamento DC e o desvio δ é calculado como (ERDOGAN, 1997):

$$\delta = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (3.16)$$

em que λ_B é o comprimento de onda de projeto quando $\delta_{neff} \rightarrow 0$ e é dado pela equação 13. é importante observar que quando $\delta = 0$, encontramos que $\lambda = 2n_{eff}\Lambda$. Para uma grade em operação monomodo, tem-se as seguintes relações (ERDOGAN, 1997)

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta_{neff}} \quad (3.17)$$

$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\delta_{neff}} \quad (3.18)$$

$$L = N\Lambda \quad (3.19)$$

em que κ é o coeficiente de acoplamento AC, Λ é o período da grade e L é o comprimento total da grade. Se a grade é uniforme ao longo de z , então $\overline{\delta_{neff}}$ é constante e $d\phi/dz = 0$, fazendo com que κ , σ e $\hat{\sigma}$ também sejam constantes. A amplitude ρ da reflexão e sua potência r são calculadas por (ERDOGAN, 1997):

$$\rho = \frac{-\kappa \sinh\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right)}{\hat{\sigma} \sinh\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right) + i\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right)} \quad (3.20)$$

$$r = |\rho|^2 = \frac{\sinh^2\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right)}{\cosh^2\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right) - \frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}} \quad (3.21)$$

A banda ou FWHM (*Full Width at Half Maximum*) é dada por (RUSSELL; ARCHAMBAULT; REEKIE, 1993):

$$\text{FWHM} = \lambda_B S \left(\left(\frac{\Delta n}{2n_c} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

em que n_c é o índice de refração do núcleo da fibra, S é igual a 1 para uma grade com alta refletividade e 0.5 para uma grade com baixa refletividade. Na Figura 10. é ilustrada a refletividade para uma grade com $n_{eff} = 1.457$ e $L = 1$ cm. Observamos que a banda aumenta quando κL aumenta, porém diminui a supressão dos lóbulos laterais.

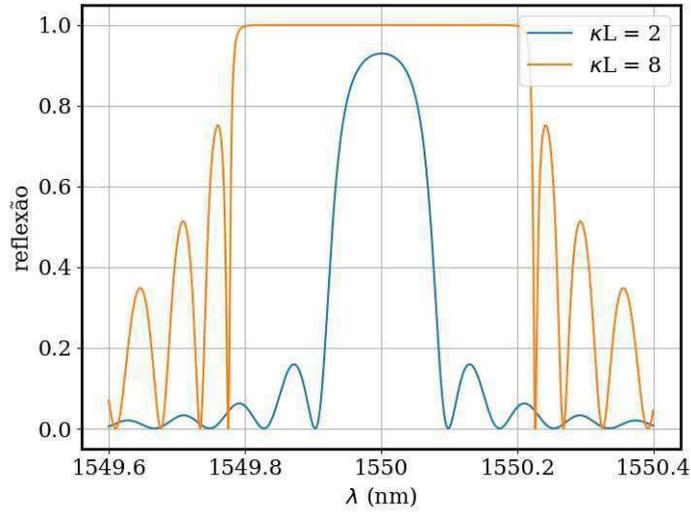


Figura 10 – Refletividade de uma FBG com $\lambda_B = 1550$ nm e diferentes valores de κ_L

Fonte: Elaborada pelo autor

Sob fatores externos, como temperatura e tração, a grade sofre alteração no seu índice efetivo e no comprimento do seu período, causando uma mudança no seu comprimento de onda de Bragg. Essa mudança é expressa como:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{eff}\Lambda \quad (3.23)$$

Ao variar a temperatura, temos que a expressão que relaciona a variação no comprimento de onda de Bragg $\Delta\lambda_B$ com a variação de temperatura ΔT é expressa por (ZHU; QI; WANG, 2011):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \Delta T + (\Delta n_{eff})_{ep} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial a} \Delta a \right] \Lambda + 2n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Delta T \quad (3.24)$$

em que $\alpha_n = (1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$ é o coeficiente termo óptico da FBG, $(\Delta n_{eff})_{ep}$ representa o coeficiente elasto óptico devido a expansão térmica e $\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \partial \Lambda / \partial T$ é o coeficiente linear da expansão térmica. Como o diâmetro da fibra muda devido ao efeito térmico, o termo $\partial n_{eff}/\partial a$ representa esse efeito, mas pode ser desconsiderado (ZHANG et al., 2024). A equação 24 pode, então, ser reescrita como (ZHANG et al., 2024):

$$\frac{\Delta\lambda_{BT}}{\lambda_B \Delta T} = \alpha_n + \alpha_\Lambda + \frac{(\Delta n_{eff})_{ep}}{n_{eff} \Delta T} \quad (3.25)$$

Para a fibra em Sílica, o termo dominante na equação acima é o coeficiente termo óptico α_n , fazendo com que a variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura seja uma dependência linear. De modo geral, podemos escrever a sensibilidade da grade de Bragg em Fibra como sendo (ZHU; QI; WANG, 2011):

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_b}{\Delta T} = \alpha_n + \alpha_\Lambda \quad (3.26)$$

Além da temperatura, sensores baseados em grades de Bragg em fibra também podem medir tração e deformação. Quando a grade é comprimida ou alongada, o período muda, causando um deslocamento no comprimento de onda de Bragg. O deslocamento é dado por (ZHANG et al., 2024):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon \quad (3.27)$$

em que p_e é o coeficiente elasto óptico e ε representa a deformação da grade. A equação pode ser reescrita como (ZHANG et al., 2024):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n_{eff}^2 [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]}{2} \right) \varepsilon \quad (3.28)$$

em que p_{11} e p_{12} representam as constantes ópticas de deformação ópticas e ν é o coeficiente de Poisson. Para a Fibra em Sílica, os valores dessas constantes e coeficientes são bem conhecidos, sendo $n_{eff} = 1.45$, $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.17$. Além disso, através da lei de Hooke ($\sigma = \varepsilon E$, conseguimos relacionar a deformação com a pressão correspondente, onde $E = 69.9 \text{ GPa}$, que é o módulo de Young do sensor óptico em sílica (BLANQUER et al., 2022)).

4 Desenvolvimento

Este capítulo tem o objetivo de revisar os resultados presentes na literatura a respeito da aplicação de FBG em sensoriamento de baterias de lítio recarregáveis para monitoramento da temperatura e da pressão/deformação. Além disso, serão feitas simulações utilizando o software *Lumerical MODE*. Todas as simulações serão feitas utilizando o solver EME (*Eigen Mode Expansion*).

4.1 Revisão na Literatura

A temperatura é um parâmetro crucial para a segurança, monitoramento e estado de saúde, tanto para uma única bateria, como para *packs* de várias baterias juntas (ZHANG et al., 2024). Os atuais sensores de temperatura utilizados nos sistemas de gerenciamento de Bateria (BMS - *Battery Management System*) são, na sua maioria, termorresistivos, e são posicionados na superfície da bateria. A diferença de temperatura entre o interior e o exterior pode atingir 15 °C, subindo para mais de 20 °C em situações de fuga térmica. Dessa forma, para aplicações e situações práticas, o monitoramento interno da temperatura é muito importante para avaliar a saúde da bateria. A temperatura na superfície, não consegue, então, indicar o real estado de saúde e eventos térmicos que ocorrem durante os ciclos de funcionamento. Para resolver esse problema, sensores pequenos com alta complexidade e que possam ser colocados dentro da bateria sem alterar seu desempenho são a solução. O sensor de fibra óptica pode ser escolhido, devido a sua flexibilidade, tamanho pequeno, quimicamente inerte, alta sensibilidade e ser imune a interferência eletromagnética (MEI et al., 2023; CULSHAW, 2004). A tabela abaixo mostra as vantagens ao se utilizar sensores em fibra em relação aos sensores tradicionais.

	Sensor tradicional	Sensor óptico
Tamanho (mm)	0.1–10	10^{-3} –1
Imunidade a interferência EM.	Fraca	Forte
Durabilidade Química	Fraca	Forte
Durabilidade (anos)	>10	>20
Implementação	Interna e externa	Interna e externa
Queda de capacidade	Redução de ~2% to 10%	Sem diferença significativa
Custo(US\$)	1–100	1–10

Tabela 1 – Comparação entre os sensores tradicionais e os sensores ópticos

Fonte: Adaptado de (ZHANG et al., 2024).

Em 2013, Yang *et al* integrou sensores FBG em baterias de lítio para medir a variação de temperatura em várias condições durante os períodos de carga e descarga, como alta densidade de corrente, curto circuito e sobrecarga (YANG et al., 2013). Durante o

experimento, o sensor mostrou uma sensibilidade de aproximadamente $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (YANG et al., 2013), e o resultado obtido está mostrado na Figura 12. Para esse caso, foram utilizadas células de lítio com capacidade teórica de 40 mAh , como está mostrado na Figura 11. O gráfico da esquerda da Figura 12 é obtido com uma mudança discreta de temperatura e o gráfico da esquerda é obtido por meio de uma mudança contínua na temperatura. Esse resultado foi obtido para calibrar o sensor (YANG et al., 2013). Após a calibragem, foi feito o monitoramento da variação de temperatura durante o período de descarga tanto para o sensor localizado no cátodo, como para o sensor localizado no ânodo da bateria. Durante o processo de descarga, a temperatura da bateria aumenta rapidamente, e o resultado está mostrado na Figura 13. Além disso, foi realizado o mesmo experimento para correntes diferentes. A Figura 14 mostra que para valores maiores de corrente, a temperatura aumenta mais rapidamente (YANG et al., 2013). Para a corrente de 20 mA , a temperatura subiu $1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ em 1200 ms , enquanto que para a corrente de 30 mA , a temperatura subiu $1.7 \text{ }^\circ\text{C}$ em 450 s .

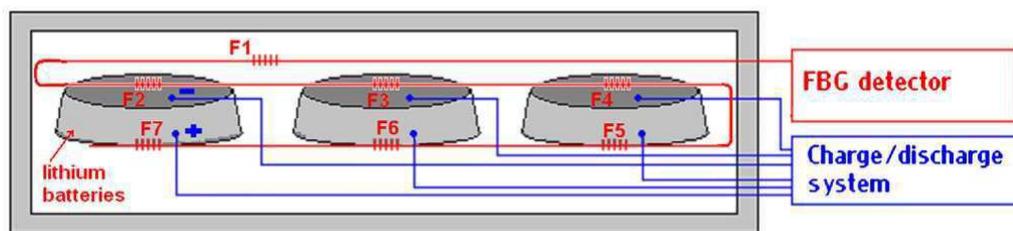


Figura 11 – Diagrama da integração das FBGs em células do tipo moeda.

Fonte: (YANG et al., 2013)

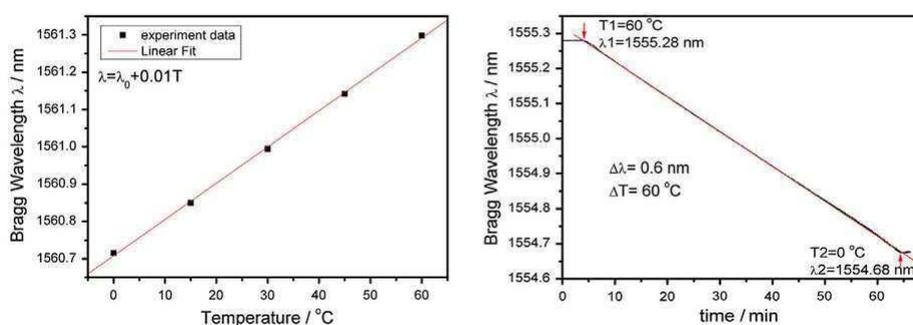


Figura 12 – Mudança do comprimento de onda de Bragg em função da mudança de temperatura.

Fonte: (YANG et al., 2013)

Além de fazer o monitoramento nas condições de descarga, também foi analisado o que acontece em situações anormais, como de curto circuito e sobrecarga. Durante o experimento, a bateria foi colocada em processo de sobrecarga até se quebrar, e a variação de temperatura chegou a $11.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (YANG et al., 2013). Utilizando, agora, uma bateria de formato cilíndrico como mostra a Figura 14, os eletrodos foram curto circuitados, e a

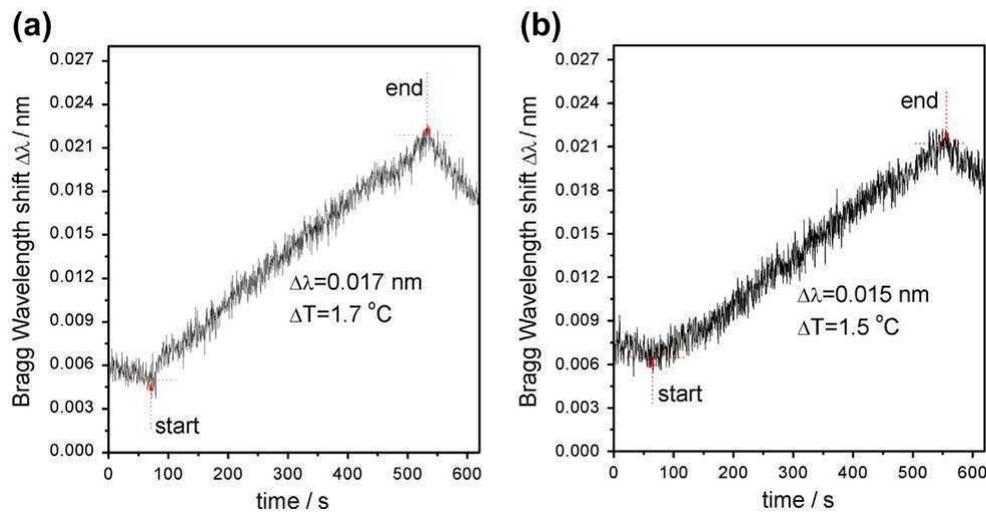


Figura 13 – Variação da temperatura em função do tempo para o cátodo (a) e o ânodo (b) durante a descarga sob uma corrente de 30 mA. O período de tempo entre "start" e "end" corresponde ao processo de descarga.

Fonte: (YANG et al., 2013)

temperatura chegou a aumentar mais de 70,0 °C (YANG et al., 2013). Algumas conclusões serão discutidas nas considerações finais deste trabalho.

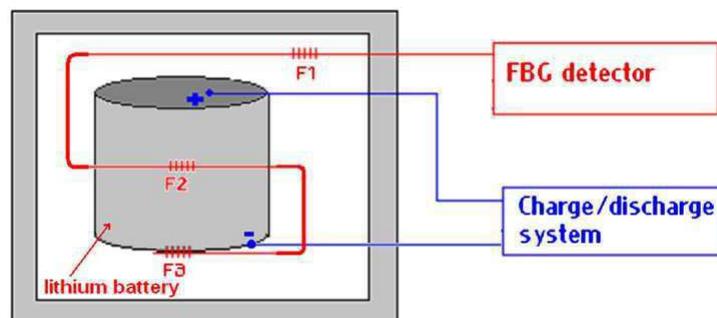


Figura 14 – Diagrama da integração das FBGs em células cilíndricas.

Fonte: (YANG et al., 2013)

Sabe-se que a bateria sofre expansão ou contração durante os seus ciclos de carga e descarga (LOULI; ELLIS; DAHN, 2019). Até o momento, alguns parâmetros foram estudados para estudar a reação dos materiais e expansão volumétrica, como pressão, deformação e espessura. Esses estudos mostraram que, em termos de monitoramento, a deformação é tão importante quanto a temperatura, podendo levar à melhoria no desempenho ou a degradação mecânica (LI et al., 2022). No entanto, devido a falta de tecnologias de sensoriamento que podem ser integradas nas baterias, esses parâmetros ainda não foram coletados de forma eficiente. Todavia, com a aplicação de FBGs, essa situação pode mudar.

Uma vantagem única dos sensores baseados em FBGs, é sua capacidade de multiple-

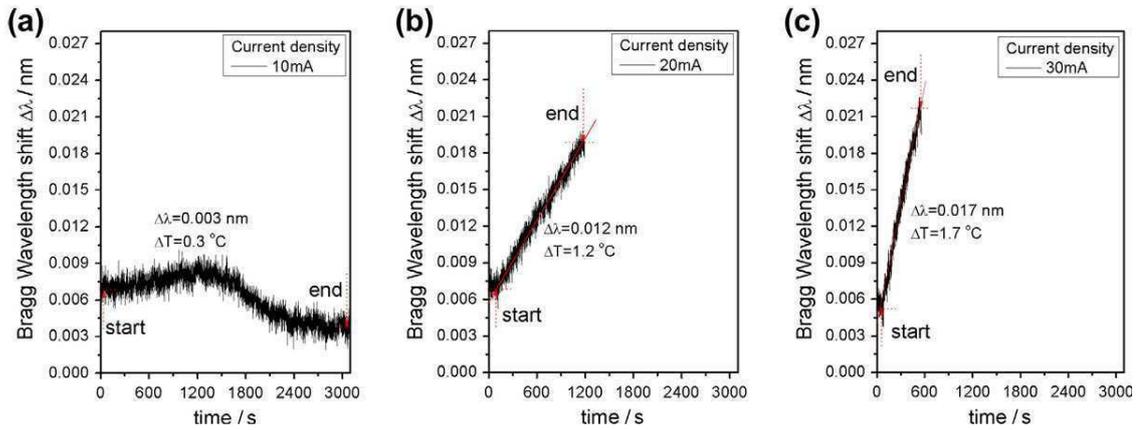


Figura 15 – Variação de temperatura no cátodo em função do tempo para várias correntes.

Fonte: (YANG et al., 2013)

xação, podendo monitorar várias baterias de uma vez com uma única fibra, que simplifica a complexidade e capacidade de monitoramento. Outro ponto importante a se destacar é que esse tipo de sensor pode ser implantado dentro ou na superfície da bateria, porém, para medições internas, os resultados variam de acordo com o tipo de encapsulamento. A Tabela 2 mostra a comparação entre os sensores de pressão baseados em FBG e os sensores tradicionais. Em 2016, os resultados para sensores inseridos e colocados na superfície foram comparados pela primeira vez, conseguindo, ainda, estimar a pressão por meio da lei de Hook (BAE et al., 2016). Também foi possível observar que nenhum impacto foi causado no funcionamento da bateria. A Figura 16 mostra a esquematização da fibra inserida dentro da bateria e da outra fixada em sua superfície. A variação do comprimento de onda de Bragg durante o processo de carga e descarga é mostrado na Figura 17. Durante o processo de carga, há uma expansão no volume da bateria, fazendo com que o comprimento de onda aumente. No processo de descarga, ocorre o contrário.

	Sensor Tradicional	Sensor FBG
Tamanho(mm)	1–10	10^{-2} –1
Implementação	Principalmente externa	Externa e interna
Complexidade operacional	Fácil	Depende da implementação
Destrutividade	Não destrutivo	Não destrutivo
Resistência mecânica	Forte	Fraca
Monitoramento operando	Capaz	Capaz

Tabela 2 – Comparação entre os sensores de pressão tradicionais e os sensores baseados em FBG.

Fonte: Adaptado de (ZHANG et al., 2024)

Para calcular a pressão, primeiramente é necessário calcular a deformação total sofrida pela grade por meio da Equação (3.28), onde conhecemos o deslocamento do comprimento de onda e os parâmetros da equação ($n_{eff} = 1.45$, $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.17$). Logo em seguida, usa-se a lei de Hooke para estimar a pressão. O resultado

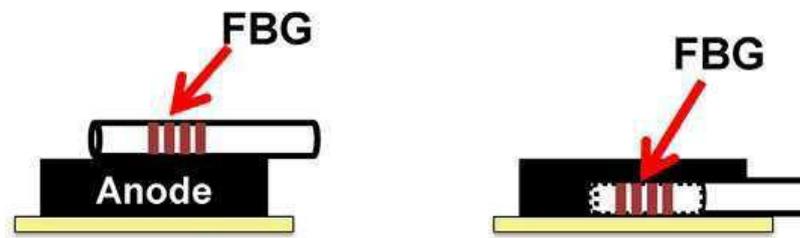


Figura 16 – Esquemática do sensor implantado e do fixado na bateria.

Fonte: (BAE et al., 2016)

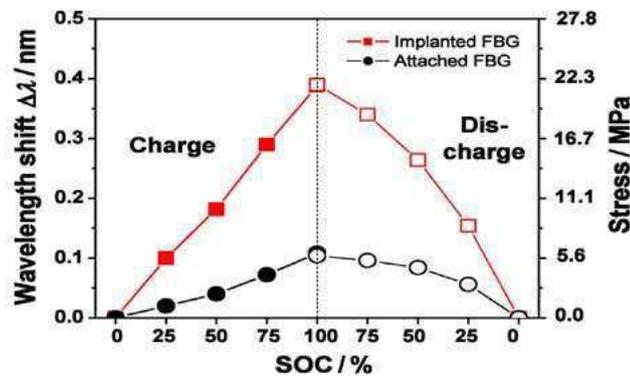


Figura 17 – Variação do comprimento de Bragg do sensor implantado e do sensor fixado da superfície no ânodo em função da quantidade de carga da bateria.

Fonte: (BAE et al., 2016)

está mostrado na Figura 17.

A importante diferença a se destacar entre o sensor implantado e o fixado na superfície está no tipo de pressão que elas estão submetidas. No sensor implantado no ânodo da bateria, há tanto uma tração transversal como longitudinal, enquanto que no fixado há apenas uma tração longitudinal. A Figura 18 ilustra isso. Algumas conclusões serão tratadas na seção de de considerações finais.

4.2 Simulações

4.2.1 Temperatura

Foi simulado uma FBG utilizando o *solver* EME (*EigenMode Expansion*) do software *Lumerical MODE* com os seguintes parâmetros: $n_c = 1.451$, $n_{eff} = 1.45$, $n_{cladding} = 1.446$, $N = 10000$, $\Lambda = 534,483$ nm, $L \approx 10$ mm, raio do núcleo igual a $4,8 \mu\text{m}$ e raio da casca igual a $62 \mu\text{m}$. A condição de fronteira periódica foi utilizada para poupar processamento e tempo de simulação. O perfil de campo da seção transversal da fibra é mostrado na Figura 19 e o resultado da simulação da grade está mostrado na Figura 20. Após a simulação, verificamos que a grade tem uma banda de aproximadamente 0.35 nm e $\lambda_B \approx 1549,03$ nm.

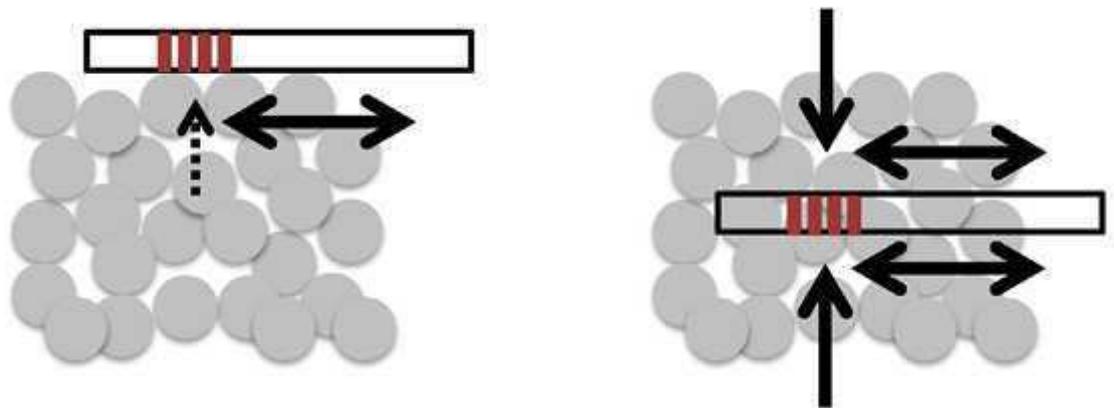
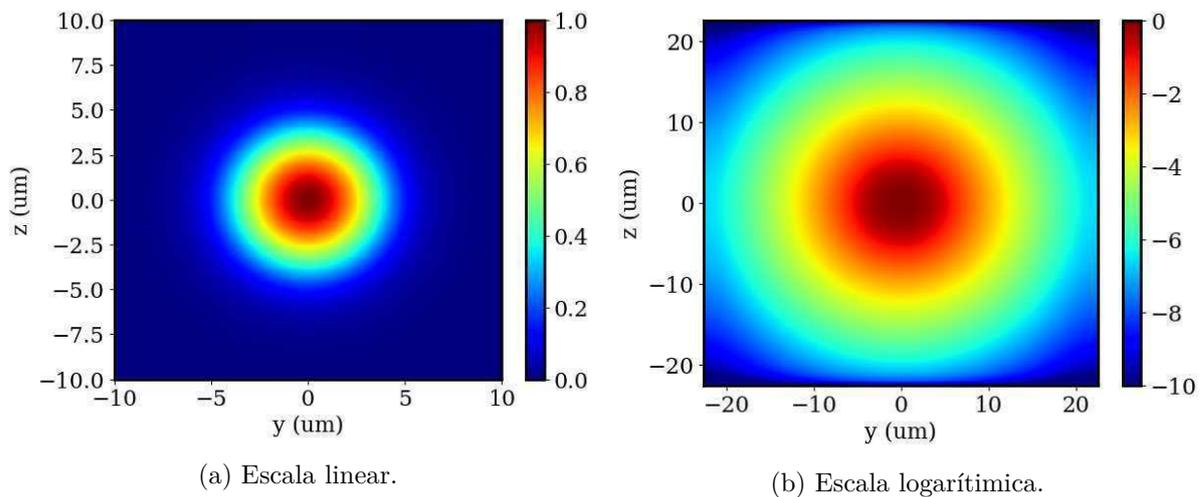


Figura 18 – Esquematização da pressão sofrida pelo sensor implantado e pelo fixado na superfície do ânodo.

Fonte: (BAE et al., 2016)



(a) Escala linear.

(b) Escala logarítmica.

Figura 19 – Distribuição do campo elétrico na entrada da fibra.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para simular a variação do comprimento de Bragg em função da variação de temperatura, o coeficiente termo óptico da sílica usado na simulação foi de $8,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Assim como em (YANG et al., 2013), o passo de temperatura escolhida foi de 15°C . A sensibilidade obtida foi de $13.31 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. A reta de sensibilidade está ilustrada na Figura 22.

4.2.2 Deformação/Pressão

Para simular a variação do comprimento de bragg em função da pressão/deformação, foi suposto uma tração uniforme em toda a grade. Para isso, foi suposto que a tração em questão deslocasse o período em 0.13 nm . Logo, foram feitas 5 simulações com essa variação de período. A Figura 22 ilustra o espectro para vários períodos.

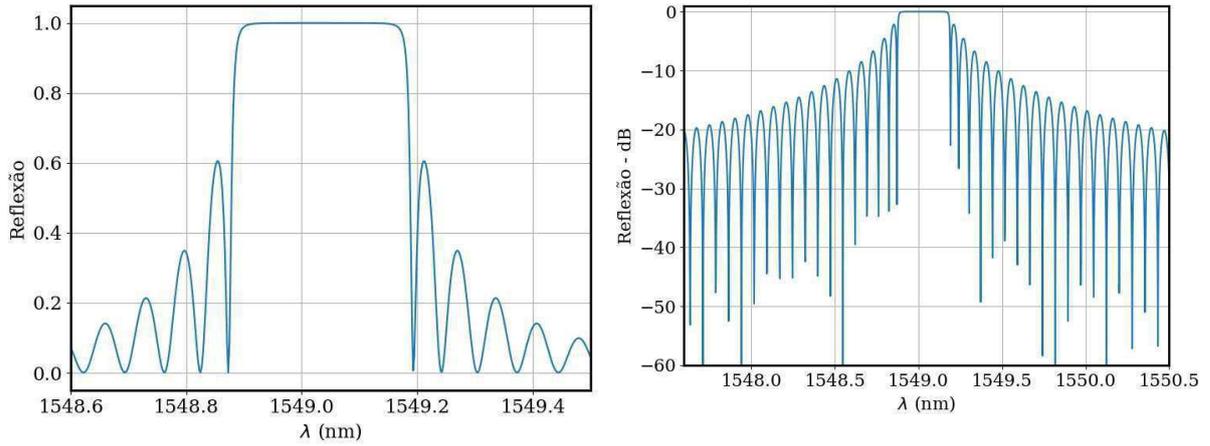


Figura 20 – Resultado da simulação da FBG.

Fonte: Elaborada pelo autor.

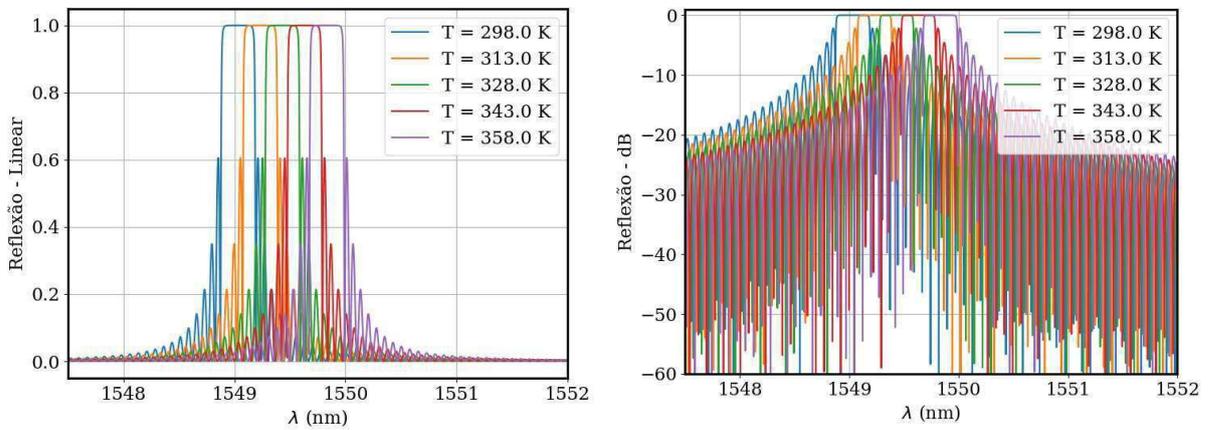


Figura 21 – Simulação do comprimento de onda de bragg em função da temperatura.

Fonte: Elaborada pelo autor.

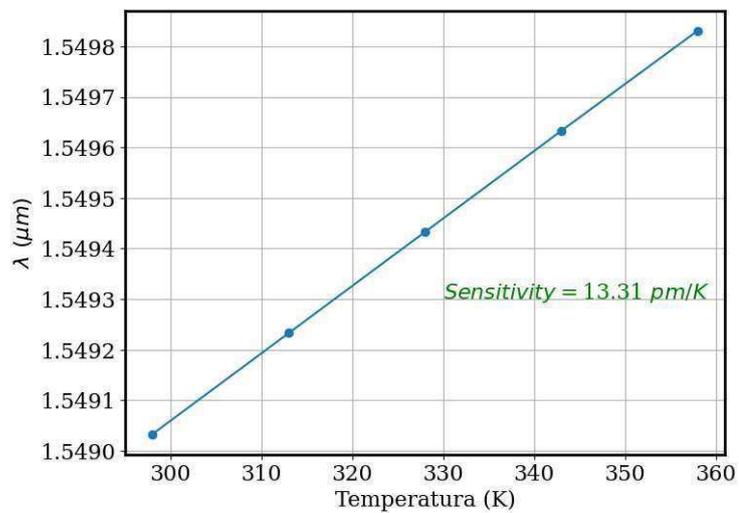


Figura 22 – Reta de sensibilidade da FBG simulada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

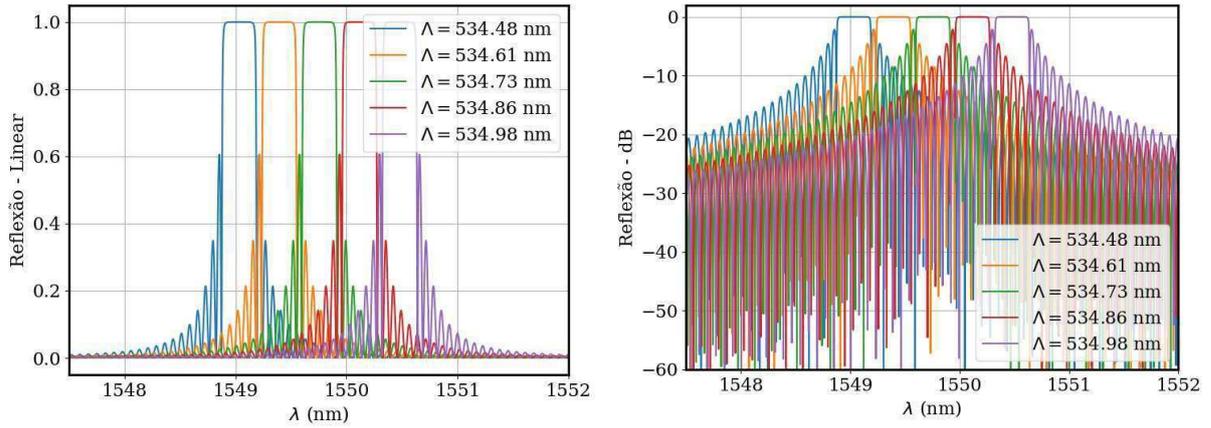


Figura 23 – Variação do comprimento de onda em função do período da grade.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado da variação do comprimento de onda em função do período e o cálculo da pressão está mostrado no gráfico da Figura 24. A pressão foi estimada utilizando a Equação (3.28) e a lei de Hooke.

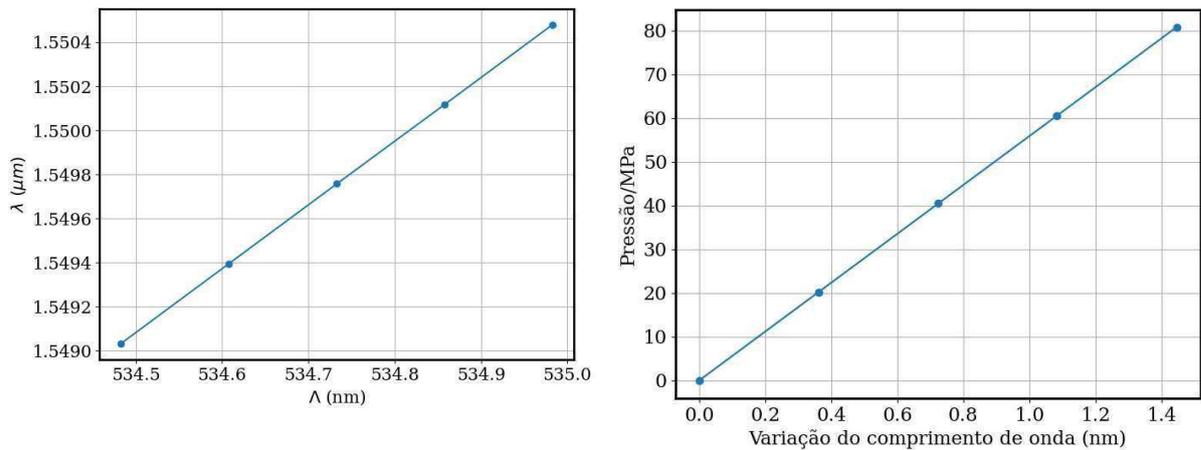


Figura 24 – Variação do comprimento de onda em função da mudança do período e estimativa da pressão pela lei de Hooke.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 Considerações Finais

Diante da revisão literária e das simulações feitas, observa-se um forte interesse e crescimento do estudo da implementação de sensores ópticos para monitoramento de baterias de lítio recarregáveis. Além disso, o estudo da física desses dispositivos já são bem investigados, mostrando uma vasta densidade de artigos e trabalhos presentes na literatura.

Quanto aos sensores de temperatura, investigamos que eles apresentam uma resposta linear e que conseguem fazer medições em tempo real, até mesmo sob as situações críticas (curto circuito, sobrecarga e alta densidade de corrente). Quanto aos sensores de pressão, também foi observado que são viáveis, uma vez que conseguem estimar a pressão e deformação e isso pode indicar o estado de carga da bateria.

No entanto, ainda há alguns desafios na implementação prática desses sensores nas baterias de lítio para aplicações práticas. Primeiramente, a fibra é feita de sílica, que é um material frágil e fácil de se quebrar. Dessa forma, em aplicações práticas, como em carros elétricos, os sensores estarão sob condições mais extremas, precisando, assim, de uma proteção adequada.

Além disso, observa-se que quando o sensor óptico é implantado na bateria, faz-se necessário minimizar sua influência no desempenho eletroquímico da bateria. Ainda, a inserção desses sensores irá mudar o processo de fabricação das baterias, criando dificuldade para os produtores existentes no mercado.

5.1 Trabalhos futuros

Como proposta de trabalho futuro, há o estudo da tentativa de implementar sensores baseados em anéis de ressonância em baterias de lítio recarregáveis e a tentativa de realizar o projeto de uma grade de bragg em um chip fotônico para sensoriamento, uma vez que não foi encontrado material suficiente disponível na literatura. Além disso, também pode ser possível fazer o estudo da medição do índice de refração do eletrólito e da realização do espectrograma dos materiais, ambos através de sensores baseados em fibras ópticas.

Referências Bibliográficas

- BAE, C. et al. Monitoring the strain evolution of lithium-ion battery electrodes using an optical fiber bragg grating sensor. *Energy Technology*, v. 4, p. 851–855, 07 2016. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21.
- BASHKATOV, A.; GENINA, E. Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: A simple approximation. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v. 5068, 10 2003. Citado na página 8.
- BLANQUER, L. A. et al. Optical sensors for operando stress monitoring in lithium-based batteries containing solid-state or liquid electrolytes. *Nature Communications*, v. 13, p. 1153, 03 2022. Citado na página 15.
- BOGAERTS, W. et al. Silicon microring resonators. *Laser & Photonics Reviews*, v. 6, n. 1, p. 47–73, 2012. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/lpor.201100017>>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- BOGAERTS, W. et al. Silicon microring resonators. *Laser & Photonics Reviews*, v. 6, n. 1, p. 47–73, 2012. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/lpor.201100017>>. Citado na página 4.
- CAMPANELLA, C. E. et al. Fibre bragg grating based strain sensors: Review of technology and applications. *Sensors*, v. 18, n. 9, 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/3115>>. Citado na página 12.
- CHROSTOWSKI, L. et al. Silicon photonic resonator sensors and devices. In: KUDRYASHOV, A. V.; PAXTON, A. H.; ILCHENKO, V. S. (Ed.). *Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIV*. SPIE, 2012. v. 8236, p. 823620. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.916860>>. Citado na página 7.
- CHROSTOWSKI, L.; HOCHBERG, M. *Silicon photonics design: from devices to systems*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015. Citado na página 8.
- CULSHAW, B. Optical fiber sensor technologies: opportunities and-perhaps-pitfalls. *Journal of Lightwave Technology*, v. 22, n. 1, p. 39–50, 2004. Citado na página 16.
- ERDOGAN, T. Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, v. 15, n. 8, p. 1277–1294, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 10, 12 e 13.
- FARD, S. T. et al. Performance of ultra-thin soi-based resonators for sensing applications. *Opt. Express*, Optica Publishing Group, v. 22, n. 12, p. 14166–14179, Jun 2014. Disponível em: <<https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-22-12-14166>>. Citado 3 vezes nas páginas 6, 7 e 8.
- FARD, S. T. et al. Label-free silicon photonic biosensors for use in clinical diagnostics. In: KUBBY, J.; REED, G. T. (Ed.). *Silicon Photonics VIII*. SPIE, 2013. v. 8629, p. 862909. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.2005832>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

FREY, B. J.; LEVITON, D. B.; MADISON, T. J. Temperature-dependent refractive index of silicon and germanium. In: ATAD-ETTEDGUI, E.; ANTEBI, J.; LEMKE, D. (Ed.). *Optomechanical Technologies for Astronomy*. SPIE, 2006. v. 6273, p. 62732J. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.672850>>. Citado na página 8.

HEEBNER, J.; GROVER, R.; IBRAHIM, T. *Optical Microresonators: Theory, Fabrication, and Applications*. Springer, 2008. (Optical Sciences, 138). ISBN 9780387730677. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bFMI7QYFfOwC>>. Citado na página 5.

KIM, G.-D. et al. Silicon photonic temperature sensor employing a ring resonator manufactured using a standard cmos process. *Optics express*, v. 18, p. 22215–21, 10 2010. Citado na página 8.

LI, R. et al. Effect of external pressure and internal stress on battery performance and lifespan. *Energy Storage Materials*, v. 52, 07 2022. Citado na página 18.

LOULI, A.; ELLIS, L.; DAHN, J. Operando pressure measurements reveal solid electrolyte interphase growth to rank li-ion cell performance. *Joule*, v. 3, 03 2019. Citado na página 18.

LU, L. et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, v. 226, p. 272–288, 2013. ISSN 0378-7753. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312016163>>. Citado na página 1.

MEI, W. et al. Operando monitoring of thermal runaway in commercial lithium-ion cells via advanced lab-on-fiber technologies. *Nature communications*, v. 14, p. 5251, 08 2023. Citado na página 16.

MIHAILOV, S. J. Fiber bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*, v. 12, n. 2, p. 1898–1918, 2012. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/12/2/1898>>. Citado na página 12.

OKADA, Y.; TOKUMARU, Y. Precise determination of lattice parameter and thermal expansion coefficient of silicon between 300 and 1500 K. *Journal of Applied Physics*, v. 56, n. 2, p. 314–320, 07 1984. Citado na página 8.

RUSSELL, P. S. J.; ARCHAMBAULT, J.-L.; REEKIE, L. Fibre gratings. *Physics World*, v. 6, n. 10, p. 41, oct 1993. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/2058-7058/6/10/25>>. Citado na página 13.

SCHMIDT, S. et al. Improving the performance of silicon photonic rings, disks, and bragg gratings for use in label-free biosensing. In: . [S.l.: s.n.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 6, 10 e 11.

TIAN, Y. et al. Promises and challenges of next-generation “beyond li-ion” batteries for electric vehicles and grid decarbonization. *Chemical Reviews*, v. 121, n. 3, p. 1623–1669, 2021. PMID: 33356176. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00767>>. Citado na página 1.

WEI, Z. et al. Future smart battery and management: Advanced sensing from external to embedded multi-dimensional measurement. *Journal of Power Sources*, v. 489, p. 229462, 2021. ISSN 0378-7753. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775321000148>>. Citado na página 1.

WERNECK, M. M. et al. A guide to fiber bragg grating sensors. In: CUADRADO-LABORDE, C. (Ed.). *Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings*. Rijeka: IntechOpen, 2013. cap. 1. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/54682>>. Citado na página 11.

XIA, X. et al. Life cycle carbon footprint of electric vehicles in different countries: A review. *Separation and Purification Technology*, v. 301, p. 122063, 2022. ISSN 1383-5866. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586622016185>>. Citado na página 1.

YANG, G. et al. Real-time temperature measurement with fiber bragg sensors in lithium batteries for safety usage. *Measurement*, v. 46, n. 9, p. 3166–3172, 2013. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224113002194>>. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19 e 21.

YARIV, A.; YEH, P. *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications*. [S.l.]: Oxford University Press, 2023. Citado na página 11.

YOSHIE, T.; TANG, L.; SU, S.-Y. Optical microcavity: Sensing down to single molecules and atoms. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 11, p. 1972–91, 12 2011. Citado na página 7.

ZHANG, Y. et al. Health monitoring by optical fiber sensing technology for rechargeable batteries. *eScience*, v. 4, n. 1, p. 100174, 2024. ISSN 2667-1417. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266714172300112X>>. Citado 5 vezes nas páginas 1, 14, 15, 16 e 19.

ZHU, Y.-h.; QI, H.; WANG, G.-x. Temperature characteristic of fiber bragg grating. In: . [S.l.: s.n.], 2011. p. 4020–4022. Citado na página 14.