

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



MARIANA LAMEGO KHOURI

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
INTERROGADOR DE SENSORES EM FIBRA ÓPTICA
BASEADOS EM COMPRIMENTO DE ONDA**

VITÓRIA

2022

MARIANA LAMEGO KHOURI

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
INTERROGADOR DE SENSORES EM FIBRA ÓPTICA
BASEADOS EM COMPRIMENTO DE ONDA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluna Mariana Lamego Khouri, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Camilo Arturo Rodríguez Díaz

Coorientador: Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva

VITÓRIA

2022

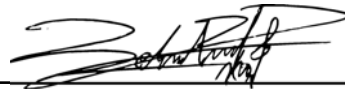
MARIANA LAMEGO KHOURI

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTERROGADOR DE SENSORES EM FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM COMPRIMENTO DE ONDA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluna Mariana Lamego Khouri, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 18 de agosto de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:



**Prof. Dr. Camilo Arturo Rodríguez
Díaz**

Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador



**Prof. Dr. Hans Jorg Andreas
Schneebeli**

Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Prof. Dr. Ricardo Carminati de Mello

Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

VITÓRIA

2022

AGRADECIMENTOS

Me sinto extremamente abençoada pelo o que tenho e pelas pessoas que me amam. Gostaria de agradecer a todos que apareceram (e estão) na minha vida e que permitem que eu continue com os meus estudos. A vocês, minha eterna gratidão. Em especial, aos meus pais, Samuel e Claudia, por sempre priorizarem minha educação e minha felicidade. Durante 23 anos tive o privilégio de absorver os ensinamentos transmitidos por vocês através de palavras e ações. Vocês são o maior exemplo de vida que eu tenho. Obrigada também por todos os abraços e beijos que me reconfortam tanto e por me amarem por quem eu sou.

À minha irmã Carolina, por todo o amor e por sempre me servir de inspiração. O orgulho que sinto de você está dentro de mim desde que somos crianças e, nesse momento em que você está longe de casa, estudando e trabalhando muito para concluir com excelência sua residência em oftalmologia, ele só aumenta. À minha querida avó Marlene, espero você vir buscar meu abraço todos os dias, sorrir para mim e dizer o quanto me ama. Obrigada por sempre cuidar de mim junto aos meus pais.

À minha querida Stefanie, seu amor e paciência foram essenciais para eu estar onde me encontro hoje. Junto a você nesses últimos cinco anos fui capaz de conquistar paz e felicidade novamente. Obrigada por ser meu porto seguro e minha companheira de vida. Ao meu melhor amigo Marcio, pelo carinho e por sempre me motivar e me ajudar. Com você eu não me assusto diante de desafios e me sinto preparada para encara-los. À minha amiga Rebeca e meus amigos Matheus, João, Tiago, Eduardo, Pedro, Thiago, Antonio, Marçal e Vinícius, por todo o bem que me proporcionam.

Ao meu orientador Camilo, pelas oportunidades e por todo o tempo que dedicou a mim. Graças a você sou feliz com o que trabalho e sei o que quero para o meu futuro. À professora Marcia, ao professor Jair, ao professor Domingos e ao professor Moisés, por todo o apoio que me deram durante minha formação. Aos membros do LabTel e do departamento de engenharia elétrica por todo conhecimento transmitido. À banca examinadora pela aceitação do convite e pelo tempo investido para leitura e avaliação desse trabalho. Finalmente, agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e à Petrobras pelo apoio financeiro.

RESUMO

Os sistemas de fibra óptica evoluíram consideravelmente nos últimos 40 anos. Com o amadurecimento da tecnologia, foram descobertas vantagens em outros campos além das telecomunicações. Algumas dessas vantagens são as encontradas em sensores de fibra óptica. Eles são pequenos, leves, resistentes à interferência eletromagnética, capazes de multiplexação, quimicamente estáveis e altamente sensíveis - tudo isso em operação passiva. Portanto, nos dias atuais, esses sensores podem ser alternativas para o sensoriamento remoto necessário na robótica, na medicina e na indústria em geral. No entanto, apesar dos benefícios que apresentam quando comparados às tecnologias convencionais, os interrogadores comerciais capazes de adquirir os dados necessários permanecem relativamente caros e não oferecem muita portabilidade. Como resultado, a usabilidade desta solução em vários campos é limitada, por exemplo, em robótica de reabilitação (próteses, órteses e exoesqueletos), sensores vestíveis ou têxteis inteligentes e em aplicações gerais em que os sensores e a unidade de interrogação estão em movimento constante e devem ser integrados na mesma estrutura. Este trabalho aborda esta questão e propõe um interrogador portátil de baixo custo para monitoramento dinâmico de sensores de fibra óptica baseados em comprimento de onda, como redes de Bragg e interferômetros de Fabry-Perrot. A escolha por desenvolvimento de *hardware* e *software* possibilita uma solução de baixo custo que permite monitoramento simultâneo de quatro canais, compatibilidade com os sistemas operacionais Windows e distribuições do Linux, entradas dinâmicas para processamento de sinal, comunicação sem fio e portabilidade. Em termos de *software*, isso é alcançado por meio de um programa com uma GUI desenvolvida em Python para realizar o processamento de sinal necessário, oferecer suporte ao monitoramento dinâmico dos espectros e a muitas outras funções para melhorar a experiência do usuário. Em termos de *hardware*, o *firmware* do microcontrolador foi programado e diferentes circuitos eletrônicos foram desenvolvidos para realizar as ações necessárias. Por fim, o sistema proposto foi testado em laboratório e foi obtida a comprovação do funcionamento esperado.

Palavras-chave: Interrogadores; grades de Bragg; interferômetros de Fabry-Perrot; sistemas embarcados.

ABSTRACT

Fiber optics systems have developed considerably in the last 40 years. As the technology matured, advantages in fields other than telecommunications were discovered. Some of these advantages are the ones found in fiber-optic sensors. They are small, lightweight, resistant to electromagnetic interference, capable of multiplexing, chemically stable, and highly sensitive — all while on passive operation. Therefore, in the present day, these sensors can be great alternatives for remote sensing needed in robotics, medicine, and the industry overall. However, despite the benefits they have when compared to conventional technologies, commercial interrogators capable of acquiring the needed data remain relatively expensive and do not offer much portability. As a result, the usability of this solution in several fields is limited, for instance, in rehabilitation robotics (prostheses, orthoses, and exoskeletons), wearable sensors or smart textiles, and in general applications in which the sensors and the interrogation unit are in constant movement and have to be integrated into the same structure. This paper addresses this issue and proposes a low-cost portable interrogator for dynamic monitoring of wavelength-based fiber-optic sensors such as fiber Bragg gratings and Fabry-Perrot interferometers. The choice for hardware and software development combined allows for a low-cost solution that supports monitoring of four channels simultaneously, compatibility with Windows and Linux-based operating systems, dynamic inputs for signal processing, wireless communication, and portability. Software-wise, this is achieved through a program with a GUI that was developed in Python to perform the necessary signal processing, support dynamic monitoring, and many other functions to improve user experience. Hardware-wise, the firmware of the microcontroller was programmed and different electronics circuits were developed to perform the necessary actions. Finally, the proposed system was tested at the laboratory, and proof of expected operation was obtained.

Keywords: Interrogators; fiber Bragg gratings; Fabry-Perrot interferometers; embedded systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura típica de uma fibra óptica	16
Figura 2 – Princípio de funcionamento de uma FBG	17
Figura 3 – Resposta de uma FBG em função de uma deformação aplicada na fibra	18
Figura 4 – Princípio de funcionamento de um FPI	18
Figura 5 – Padrão de interferência de um FPI de acordo com os parâmetros R e F	19
Figura 6 – Princípio de funcionamento de interrogadores ópticos	25
Figura 7 – Comparação entre versões do Perrogator	26
Figura 8 – CAD do encapsulamento proposto	27
Figura 9 – Esquemático do interrogador óptico	27
Figura 10 – Placa de circuito impresso do interrogador óptico	28
Figura 11 – Esquemático do circuito de conversão eletro-ótica	29
Figura 12 – Esquemático do drive do filtro	29
Figura 13 – Esquemático do estágio de potência	30
Figura 14 – Visualização dos espectros com a identificação dos picos	31
Figura 15 – Visualização dos espectros com a identificação dos picos	32
Figura 16 – Funcionalidade <i>Connections</i>	32
Figura 17 – Fluxograma do código do microcontrolador	33
Figura 18 – Espectros da BBS e dos FFP-TFs	35
Figura 19 – Zoom dos espectros dos FFP-TFs	36
Figura 20 – <i>Redshift wavelength</i> do filtro 2	36
Figura 21 – <i>Redshift wavelength</i> do filtro 1	37
Figura 22 – <i>Drive</i> do filtro montado em protoboard	38
Figura 23 – Resposta do <i>drive</i> do filtro	38
Figura 24 – Sensor FBG	39
Figura 25 – Visualização do espectro	40
Figura 26 – Visualização do espectro filtrado e com a identificação do pico	40
Figura 27 – Acompanhamento do pico pelo número de amostras	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características comparativas entre interrogadores comerciais	23
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
BBS	<i>Broad-band source</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DMA	<i>Direct Memory Access</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Gratings</i>
FFP-TF	<i>Fiber Fabry-Perot Tunable Filter</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Arrays</i>
FPI	<i>Fabry-Perot Intereferometers</i>
FSR	<i>Free Spectral Range</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HD	<i>High Definition</i>
LabTel	Laboratório de Telecomunicações
LED	<i>Light Emitting Diodes</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
POF	<i>Polymer Optical Fiber</i>
SBC	<i>Single Board Computer</i>
SD	<i>Standard Definition</i>

SLED	<i>Superluminescent Diode</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SSD	<i>Solid-state Drive</i>
SW	<i>Smart Walkers</i>
TIA	<i>Transimpedance Amplifier</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_{Bragg}	Comprimento de onda de Bragg (nm)
n	Índice de refração
Λ	Período da variação do índice de refração
d	Distância entre espelhos (m)
F	<i>Finesse</i>
R	Refletividade do espelho (%)
r	Coefficiente de reflexão
θ	Angulo de incidência
$\Delta\phi$	Diferença de fase
$R1$	Resistor 1 (Ω)
$R2$	Resistor 2 (Ω)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.2	Metodologia e etapas de desenvolvimento	13
1.3	Contribuições	14
1.4	Estrutura do Trabalho	14
2	SENSORES EM FIBRA ÓPTICA	16
2.1	Conceitos gerais de fibra óptica	16
2.2	Sensores FBGs	17
2.3	Interferômetros de Fabry-Perot	18
2.4	Aplicações	20
3	SISTEMA DE INTERROGAÇÃO	22
3.1	Analísadores de espectro óptico	22
3.2	Sistemas de interrogação comerciais	23
3.3	Estrutura geral de interrogadores	24
4	SOLUÇÃO PROPOSTA	26
4.1	<i>Hardware</i>	27
4.2	<i>Software</i>	29
4.3	<i>Firmware</i>	31
5	RESULTADOS	35
5.1	Caracterização do espectro ótico	35
5.2	Validação do <i>drive</i> do filtro	37
5.3	Validação do sistema com sensores reais	39
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

O campo de fibras ópticas sofreu um enorme crescimento nos últimos 40 anos. Inicialmente concebido como um meio para transportar luz e imagens para aplicações endoscópicas médicas, as fibras ópticas foram posteriormente propostas, em meados da década de 1960, como um meio de transporte de informações. À medida que essa tecnologia consolidava sua posição dominante no setor de telecomunicações, paralelamente, vários grupos de todo o mundo passaram a realizar pesquisas a fim de explorar os principais benefícios das fibras ópticas para outra aplicação muito importante: sensoriamento (CUSANO; CUTOLO; ALBERT, 2011).

Os sensores em fibra óptica são vantajosos em relação as tecnologias de sensores convencionais em muitos aspectos. Eles apresentam imunidade a interferência eletromagnética, tamanho pequeno, leveza, alta precisão, capacidade de multiplexação, estabilidade química e operação passiva. Podem ser usados para realizar medições químicas, biológicas, medições de rotação, aceleração, deslocamento espacial, temperatura, pressão, umidade, campo elétrico e campo magnético (KHANDELWAL, 2013). Dessa forma, possuem uso generalizado de monitoramento em engenharia civil (LOPEZ-HIGUERA et al., 2011), aeroespacial (KAHANDAWA et al., 2012), naval (DANDRIDGE; COGDELL, 1991), de óleo e gás (LEAL-JUNIOR et al., 2018), dispositivos biomédicos (LEAL-JUNIOR et al., 2019), medicina (MISHRA et al., 2011) e estruturas inteligentes ao todo.

O principal problema para a disseminação de sensores em fibra em novas aplicações são os sistemas de interrogação existentes. Os OSAs (do inglês *Optical Spectrum Analyzer*) são grandes, caros, lentos e mais adequados para ambientes laboratoriais. Os interrogadores comerciais também apresentam alto custo, não costumam ser portáteis e medem centenas de sensores, o que, dependendo da aplicação, não é vantajoso. Dessa forma, esse trabalho aborda o problema evidenciado e propõem evoluções do interrogador óptico de baixo custo portátil, primeiramente apresentado por Díaz et al. (2019), para monitoramento dinâmico de sensores baseados em comprimento de onda, como FBGs (do inglês *fiber Bragg gratings*) e FPIs (do inglês *Fabry-Perrot interferometers*).

Comparado à interrogadores comerciais (OPTICS, 2022a; IBSEN, 2022; LUNA, 2022; OPTICS, 2022b), o sistema proposto nesse documento se destaca principalmente nas qualidades de portabilidade e baixo custo. O quesito baixo custo é obtido através da escolha do *hardware* e *software* dedicados a aquisição, processamento e visualização dos espectros ópticos — optando pelo funcionamento de *scan* ao invés de ângulo de difração, ferramentas de código aberto, para citar alguns. No quesito portabilidade, o interrogador proposto inclui um computador de placa única e um *software* com interface

gráfica embarcada, ambos dedicados exclusivamente a análise dos sinais dos sensores. Por fim, a tela *touchscreen* de 12 polegadas e alimentação por bateria permitem completa portabilidade desse sistema.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é dar continuidade ao desenvolvimento do sistema de interrogação de sensores em fibra ótica apresentado pela primeira vez por Díaz et al. (2019). Os sensores são baseados em comprimento de onda, como as redes de Bragg e interferômetros de Fabry-Perot.

1.1.2 Objetivos específicos

- Finalizar uma interface gráfica do usuário (GUI, do inglês, *Graphical User Interface*) para monitoramento dos sinais dos sensores ópticos;
- Fazer a aquisição de sinais com o módulo de conversão analógica-digital do microcontrolador em sincronia com o controle do *drive* para o filtro sintonizável;
- Implementar comunicação síncrona através do protocolo SPI (do inglês *Serial Peripheral Interface*) entre o microcontrolador e o computador de placa única (SBC, do inglês *Single Board Computer*) para transferência de dados;
- Integrar o microcontrolador (*firmware*), a eletrônica desenvolvida para o interrogador (*hardware*) e a interface gráfica de usuário hospedada no SBC (*software*).

1.2 Metodologia e etapas de desenvolvimento

De início, foram aprofundados os estudos sobre sensores em fibras ópticas e sobre sistemas embarcados, a fim de compreender em detalhes a natureza dos sinais provenientes desses sensores e como realizar a aquisição e o processamento deles através de um microcontrolador. Em paralelo, foi aprimorada a interface gráfica de usuário, que utiliza a biblioteca TKinter da linguagem de programação Python (já que é uma linguagem de código aberto), para monitoramento através da visualização em tempo real dos espectros ópticos dos sensores.

Posteriormente, foi feito um programa na linguagem de programação C que utiliza a eletrônica presente no microcontrolador para realizar a conversão A/D e o envio dos dados provenientes de quatro canais por SPI. Em seguida, foi feita a aquisição dos dados no computador de placa única e a integração desses na interface gráfica de usuário desenvolvida. Por fim, o sistema foi montado e testado em laboratório. Os resultados obtidos foram documentados a fim de realizar análises futuras. Todas as etapas foram registradas e documentadas para relatar de forma fiel todo o processo e os resultados alcançados, permitindo sua reprodução.

Baseado nas formas de classificar pesquisas descritas por Prodanov e Freitas (2013), essa pesquisa é de natureza aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para a construção de interrogadores ópticos de baixo custo, e de cunho explicativo quanto aos objetivos do trabalho. Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, é uma pesquisa experimental, já que busca alcançar resultados no contexto de um objeto de estudo específico, e, sob o ponto de vista da abordagem do problema, o trabalho em questão é classificado como pesquisa quantitativa, dado que é possível utilizar números para julgar os resultados obtidos.

1.3 Contribuições

Como resultado da pesquisa realizada durante este projeto de graduação, a publicação Khouri et al. (2022) foi gerada para conferência internacional. O título da publicação é "*A Low-cost Portable Interrogator for Dynamic Monitoring of Wavelength-Based Sensors*" e a conferência foi a 5^a Conferência Internacional sobre Aplicação de Óptica e Fotônica (AOP, 2022) que aconteceu em Guimarães, Portugal no dia 18 de julho desse ano.

1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1, são apresentadas as motivações, os objetivos e as metodologias envolvidas no desenvolvimento do projeto proposto a fim de contextualizar o problema de pesquisa e introduzir a solução proposta. No Capítulo 2, são discutidos conceitos fundamentais de sensores de fibra óptica para auxiliar o entendimento de como um interrogador óptico opera. O Capítulo 3 descreve algumas formas de funcionamento de um analisador de espectro óptico e é feita a comparação entre interrogadores ópticos comerciais e seus principais aspectos. No Capítulo 4, são descritos os materiais e métodos utilizados para a obtenção do interrogador portátil proposto neste documento. No Capítulo 5 são expostos os resultados experimentais obtidos por meio de testes realizados nas partes-chave do sistema e, por fim,

conclusões são tiradas no Capítulo 6 e a necessidade de trabalhos futuros é declarada e descrita.

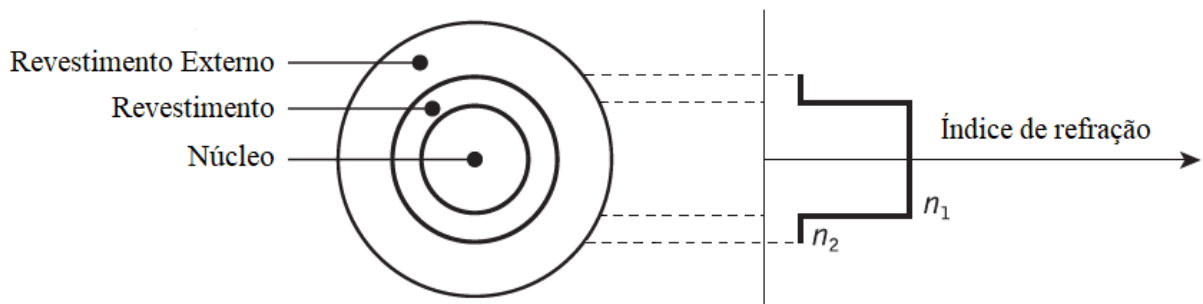
2 SENSORES EM FIBRA ÓPTICA

2.1 Conceitos gerais de fibra óptica

As fibras ópticas são normalmente feitas de vidro ou plástico. A maioria tem aproximadamente o diâmetro de um fio de cabelo humano ($17 \mu m$ a $181 \mu m$) e podem ter muitos quilômetros de comprimento. Quando luz incide na fibra, ela é transmitida de uma extremidade à outra e ao modular esse sinal é possível realizar transporte de informação. Além do mais, os sistemas de fibra óptica são superiores aos condutores metálicos para muitas aplicações. A sua maior vantagem é a largura de banda disponível devido ao comprimento de onda da luz. Essa permite a transmissão de uma quantidade maior informação "de uma só vez" quando comparado a um condutor metálico (PHOTONICS, 2022).

A estrutura de uma fibra óptica consiste em três elementos concêntricos básicos: o núcleo, o revestimento e o revestimento externo, assim como pode ser visualizado na Figura 1. O núcleo geralmente é feito de vidro ou plástico, embora outros materiais possam ser usados dependendo das características do espectro de transmissão desejado. Ele é a porção da fibra em que a luz é transmitida. O revestimento geralmente é feito do mesmo material que o núcleo, mas com um índice de refração um pouco menor (geralmente cerca de 1% menor). Isso é feito para garantir que reflexão interna total ocorra no limite do índice ao longo do comprimento da fibra, de modo que a luz seja transmitida e não escape pelas paredes laterais do guia. Por fim, o revestimento externo é a camada responsável por dar robustez mecânica à fibra (PHOTONICS, 2022).

Figura 1 – Estrutura típica de uma fibra óptica



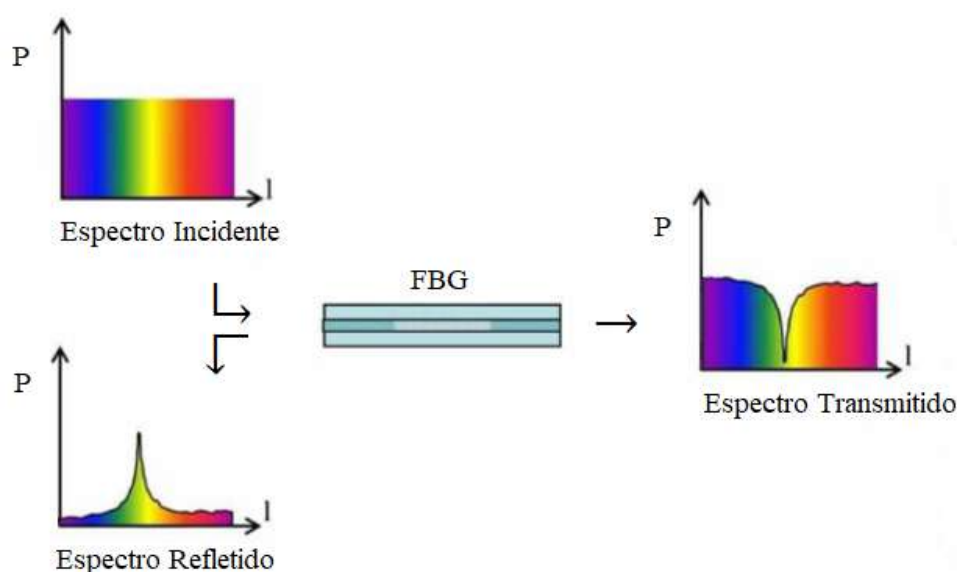
Fonte: Senior e Jamro (2009)

Nota: Traduzida e adaptada pela autora.

2.2 Sensores FBGs

A grade de Bragg é um dispositivo relativamente simples. Uma estrutura periódica é escrita no núcleo de uma fibra e essa reflete um comprimento de onda específico dependente das características físicas da periodicidade, assim como ilustrado na Figura 1. Ao variar a periodicidade, o comprimento de onda refletido também varia. Dessa forma, uma vez que essa depende da temperatura ambiente e de tensões aplicadas externamente, é possível realizar sensoriamento a partir desses dispositivos (CUSANO; CUTOLO; ALBERT, 2011).

Figura 2 – Princípio de funcionamento de uma FBG



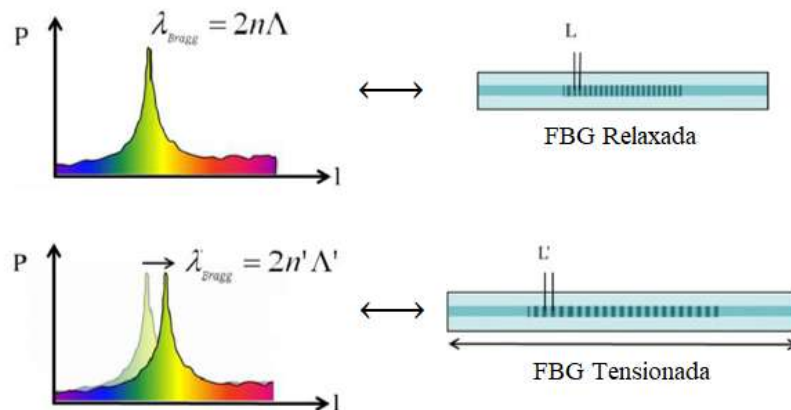
Fonte: FBGS (2022)

Nota: Traduzida e adaptada pela autora.

Em mais detalhes, as FBGs são feitas expondo lateralmente o núcleo de uma fibra óptica a um padrão periódico de laser intenso, que cria as periodicidades supracitadas. Com isso, a cada mudança no índice de refração do material (proveniente da exposição ao laser) uma pequena quantidade de luz é refletida. Todas as reflexões combinam-se em uma grande reflexão de luz em um comprimento de onda específico quando o período de grade (L) é aproximadamente metade do comprimento de onda da luz de entrada ($L \approx \lambda_{Bragg}/2$).

A circunstância descrita é chamada de condição de Bragg e o comprimento de onda central da componente refletida satisfaz a relação: $\lambda_{Bragg} = 2n\Lambda$, sendo n o índice de refração e Λ o espaçamento da variação do índice de refração da FBG. Por fim, deformações provenientes da aplicação de tensão na fibra e mudanças de temperatura são capazes de alterar os valores de n e Λ , gerando uma mudança no comprimento de onda de Bragg, assim como mostrado na Figura 3 (FBGS, 2022).

Figura 3 – Resposta de uma FBG em função de uma deformação aplicada na fibra



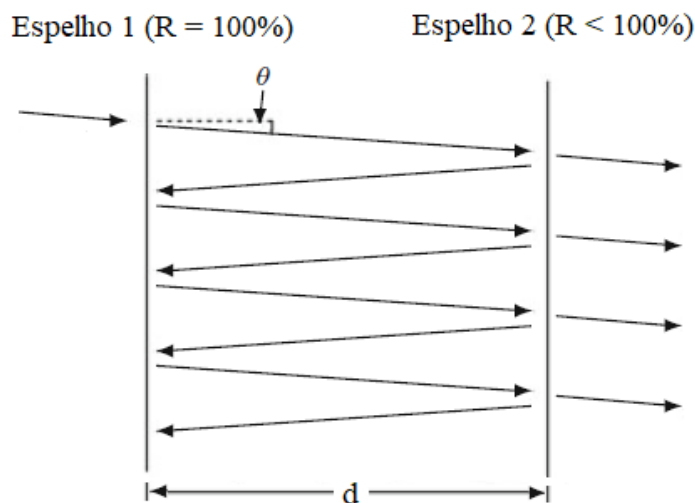
Fonte: FBGS (2022)

Nota: Traduzida e adaptada pela autora.

2.3 Interferômetros de Fabry-Perot

Um interferômetro do tipo Fabry-Perot é uma estrutura que consiste em dois espelhos paralelos separados por uma distância (d), em que um dos espelhos tem refletividade (R) abaixo de 100%. O espaço entre eles (também chamado de cavidade) pode ser vazio ou preenchido por um dielétrico, assim como pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 – Princípio de funcionamento de um FPI



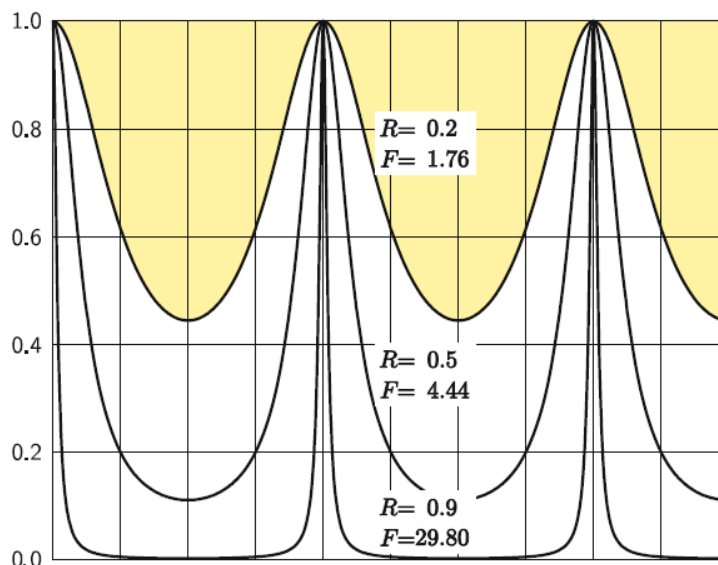
Fonte: Reider (2016)

Quaisquer duas ondas colidindo com o espelho de 2 diferem pelo coeficiente de reflexão complexo r^2 (em que $r = |r|e^{j\Delta\phi_s}$) e pelo atraso de fase devido à propagação sobre duas vezes a distância d . A diferença de fase é, portanto, dada pela Equação 2.1 onde θ é o ângulo de incidência e $k_0 n \cos\theta$ é a componente axial do vetor da onda (REIDER, 2016).

$$\Delta\phi = 2\Delta\phi_s - 2k_0nd\cos\theta \quad (2.1)$$

Quando a luz incide no espelho 1 pela primeira vez ela entra na cavidade de Fabry-Perot. Ao encontrar o segundo espelho ela é parcialmente refletida e ao encontrar novamente o primeiro espelho ela é totalmente refletida. Esse comportamento descrito continua até que uma parte da potência óptica tenha sido transmitida e a outra refletida. O resultado na transmissão é um padrão de interferência assim como o que pode ser observado na Figura 5, pois, por mais que a luz esteja percorrendo o mesmo caminho, cada vez que ela atravessa o segundo espelho ela percorre uma distância maior, ou seja, é introduzida uma defasagem ($\Delta\phi$).

Figura 5 – Padrão de interferência de um FPI de acordo com os parâmetros R e F



Fonte: Reider (2016)

Nota: Traduzida e adaptada pela autora.

Ademais, esse padrão é influenciado pela refletividade do segundo espelho (R) e pela distância (d) entre eles. Ao aumentar a refletividade do segundo espelho é aumentada a “quantidade de contribuições” para formar o padrão de interferência e, por conseguinte, esse se torna mais estreito — efeito visualizado na Figura 5 e representado pelo parâmetro F (do inglês *Finesse*). A distância entre os espelhos, por sua vez, influencia na distância entre os picos (FSR, do inglês *Free Spectral Range*) e no comprimento de onda central de cada pico do padrão de interferência. O aumento significativo na distância entre os espelhos diminui o FSR e vice-versa, no entanto, qualquer variação na distância d resulta na alteração do comprimento de onda central de cada pico.

Um sensor em fibra óptica de Fabry-Perot pode ser composto por uma fibra monomodo e

uma cavidade de Fabry-Perot paralela ao eixo da fibra óptica. Uma mudança na distância do caminho óptico que ocorre, por exemplo, ao esticar a fibra, altera a distância entre os espelhos (d) e, por conseguinte, o padrão de interferência do FPI. Dessa forma, ao caracterizar as mudanças no espectro de acordo com a influência de fenômenos físicos, é possível realizar sensoriamento a partir desses dispositivos.

2.4 Aplicações

Os sensores FBG possuem potencial para aplicações em diversas áreas, entre elas, biomedicina. Como esses sensores detectam tensão, temperatura, pressão, vibração e curvatura, mesmo em ambientes de alto campo magnético e elétrico, eles podem servir para fins de diagnóstico em áreas da saúde como cardiologia e ginecologia, para citar alguns. Eles podem ser usados com eficiência para mapeamento térmico e de pressão, mesmo durante um procedimento como o de ressonância magnética, no qual os sensores convencionais podem apresentar falhas (MISHRA et al., 2011).

Outra área com grande aplicabilidade é a industrial. Ainda hoje, as indústrias de petróleo e gás enfrentam problemas no controle de separadores de óleo devido à indisponibilidade de sensores de nível multi-interface adequados. Sistemas de medição baseados em sensores FBG se mostram como uma solução para contornar, principalmente, os problemas de falta de precisão e segurança encontrados nas tecnologias convencionais. O trabalho de Leal-Junior et al. (2018) estudou a viabilidade desta alternativa e demonstrou que o sistema de sensores FBGs proposto é capaz de medir o nível de interface e a densidade do óleo com um erro de apenas 2,38% e $0,8 \text{ kg/m}^3$, respectivamente, comprovando a eficiência dessa tecnologia.

Outra área que pode usufruir dos benefícios dos sensores em fibra óptica é a de monitoramento da saúde de estruturas físicas (SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*). SHM pode ser entendido como a integração de sensoriamento e inteligência para permitir que o carregamento da estrutura e as condições que provocam danos sejam registrados, analisados, localizados e previstos. Vários tipos de sensores anexado a uma estrutura podem ser usado para esta tarefa, mas apenas aqueles baseados em tecnologia de fibra oferecem a capacidade de realizar medições integradas, *quasi-distributed* e distribuídas, além de outras vantagens. (LOPEZ-HIGUERA et al., 2011)

Por fim, pesquisas a fim de demonstrar a eficiência desses sensores na área de robótica de reabilitação também foram conduzidas e encontraram resultados satisfatórios. O trabalho Leal-Junior et al. (2019) apresentou um sistema de sensores baseado em fibra óptica

de polímero (POF, do inglês *Polymer Optical Fiber*) para instrumentação de andadores inteligentes (SW, do inglês *Smart Walkers*) e um tecido inteligente, também baseado em POF, que pode ser integrado na roupa dos usuários sobre o peito. Os resultados obtidos mostraram que o sistema de sensores proposto foi capaz de detectar saturação de oxigênio, frequência respiratória, cadência de marcha e frequência cardíaca com erros de apenas 1%.

Os interrogadores ópticos utilizados para obter os resultados das pesquisas descritas nos parágrafos anteriores são o maior problema na difusão dessa tecnologia (DÍAZ et al., 2017; DÍAZ et al., 2018; DÍAZ et al., 2019). Em outras palavras, a viabilidade e os benefícios dos sensores ópticos estão comprovados, mas os sistemas capazes de obter os dados provenientes desses sensores são caros, mais adequados para ambientes laboratoriais, entre outras desvantagens que diminuem a aplicabilidade dessa alternativa. Na seção a seguir, mais detalhes sobre o funcionamento de sistemas de interrogação serão discutidos a fim de contextualizar a proposta desse trabalho.

3 SISTEMA DE INTERROGAÇÃO

3.1 Analisadores de espectro óptico

Analisadores de espectro óptico (OSA, do inglês *Optical Spectrum Analyser*) são instrumentos de precisão usados para medir potência *versus* comprimento de onda. Algumas aplicações típicas são: caracterização de fontes de luz como *lasers* e LEDs (do inglês, *Light Emitting Diodes*), testes de sistemas ópticos e caracterização de amplificadores de fibra. Eles podem ser baseados em diferentes princípios de operação, alguns deles exploram ângulos de difração dependentes do comprimento de onda, enquanto outros contêm algum tipo de interferômetro (PASCHOTTA, 2022).

Esses aparelhos são utilizados em sua maioria em ambientes de laboratórios e não encontram muita aplicabilidade industrial até o momento. Um dos motivos para isso é o alto custo que apresentam. Para fins de sensoriamento, uma alternativa seria obter não o espectro do sensor mas apenas a potência ótica na saída da fibra de acordo com alterações em sua estrutura. O baixo custo dessa alternativa é devida a sua simplicidade, mas é também o que implica em desvantagens como falta de acurácia e confiabilidade. Para maximizar as vantagens dos sensores em fibra, a análise do espectro, por mais que complexa, é a melhor alternativa.

Espectrógrafos são um exemplo de analisadores de espectro baseados em ângulos de difração. Neles, luz policromática é dispersa espacialmente por uma grade de difração e depois é enviada para algum tipo de fotodetector multicanal, por exemplo, na forma de uma matriz de fotodiodos. (PASCHOTTA, 2022). As potências óticas para cada comprimento de onda são, dessa forma, obtidas "paralelamente", o que aumenta a velocidade de respostas desses sistemas mas também o custo de produção.

Os OSAs baseados em interferômetros, por sua vez, geralmente funcionam a partir de uma fonte policromática de entrada, que é enviada através de um filtro passa banda ajustável a um único fotodetector de alta faixa dinâmica, onde a potência ótica transmitida é detectada (PASCHOTTA, 2022). O filtro ajustável pode ser, por exemplo, um interferômetro de Fabry-Perot. Esse filtro "varre" a faixa de frequência desejada, caracterizando o comportamento de *scan* apresentado por esses sistemas que permite um menor custo de produção.

Cada analisador de espectro óptico apresentará suas próprias características. Algumas delas estão relacionadas ao seu princípio de funcionamento, como o OSA ser dedicado a fins diversos ou apenas para aplicações específicas, e outras estarão relacionadas a fatores

independentes, como a forma que a entrada óptica é feita, se eles possuem um hardware dedicado para o processamento computacional ou não, entre outros. Em outras palavras, cada tipo de OSA apresentará suas vantagens e desvantagens para a aplicação em questão.

3.2 Sistemas de interrogação comerciais

Interrogadores ópticos são, em geral, OSAs dedicados a obter o espectro óptico de sensores em fibra para fins de sensoriamento. Esse termo se refere ao sistema desde os sensores até a obtenção dos valores de potência por comprimento de onda. Alguns interrogadores presentes no mercado são o I-MON 256 HS da empresa Ibsen, o sm130-200 da MicronOptics, HYPERION *Single Board Interrogator* da Luna e o FBGT-100 da empresa Redondo. A tabela abaixo evidencia aspectos relevantes desses sistemas para fins de comparação.

Tabela 1 – Características comparativas entre interrogadores comerciais

Parâmetro	I-MON 256	sm130-200	HYPERION	FBGT-100
Número de Canais	1	1 (até 16)	1 (até 4)	1
<i>Scan Frequency</i> (Hz)	6000	100	5000	2000
<i>Bandwidth</i> (nm)	45	80	160	50
Acurácia (pm)	0.5	2	1	5
Fixa Dinâmica (dB)	30	25	17-45	-
Inclui Bateria	Não	Não	Não	Não
Consumo em 12 V (W)	-	25	30	-
Comunicação <i>Wireless</i>	Não	Não	Não	Sim

Fonte: (OPTICS, 2022a), (IBSEN, 2022), (LUNA, 2022), (OPTICS, 2022b).

O interrogadores ópticos HYPERION utilizam FPGAs (do inglês *Field Programmable Gate Arrays*) para realizar processamento de sinais digitais de alto desempenho e em tempo real. Além do mais, são compatíveis com o software ENLIGHT que fornece um conjunto de ferramentas para aquisição de dados, computação e análise de sensores ópticos (LUNA, 2022). Os sistemas da Ibsen I-MON, por sua vez, dividem o espectro de comprimento de onda espacialmente para permitir o processamento paralelo dos picos individuais do sensores FBGs. Os picos são medidos por uma matriz de diodos que é interfaceada com a própria eletrônica do cliente (IBSEN, 2022).

A família de sistemas FBG-TransceiverTM da Redondo Optics se baseia na tecnologia patenteada por eles de circuito de onda de luz planar híbrida. O interrogador se apresenta como uma solução robusta e confiável para monitoramento de um ou vários sensores em fibra baseados em redes de Bragg que estejam instalados em, por exemplo, infraestruturas críticas. Este interrogador inclui uma interface de programação de aplicativos (API, do

inglês *Application Programming Interface*) e exemplos escritos em LabVIEW, Python, Matlab, C++ e C# (OPTICS, 2022b).

3.3 Estrutura geral de interrogadores

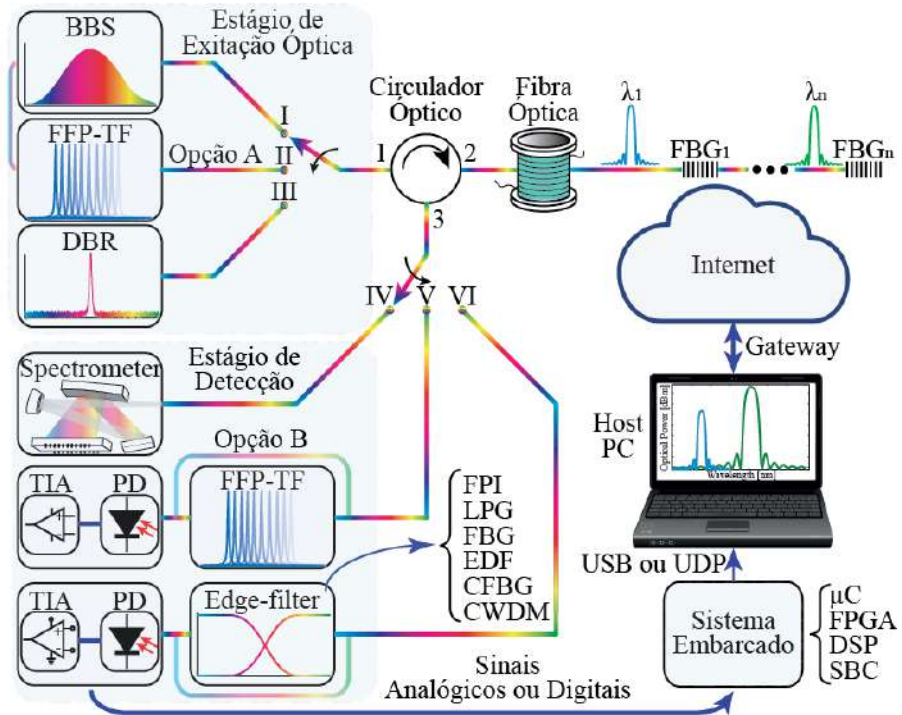
A estrutura de um interrogador óptico, assim como evidenciado na seção anterior, pode diferir de modelo para modelo em diversos aspectos. Todas possuem a etapa de excitação óptica (OES, do inglês *Optical Excitation Stage*) e a etapa de detecção (DS, do inglês *Detection Stage*), no entanto, diferentes configurações são formadas de acordo com o como cada uma dessas etapas é implementada e como elas se combinam. A etapa de excitação, por exemplo, é definida pela fonte óptica utilizada, mas podem ser usadas fontes de banda larga (BBS, do inglês *Broad-band Source*), *lasers* sintonizáveis ou filtro sintonizáveis.

A etapa de detecção, por sua vez, normalmente inclui ou um espectrômetro ou fotodetectores. A luz é enviada aos sensores através de um circulador óptico e a saída é obtida por um dos dois dispositivos. Em seguida, o sinal é digitalizado por um sistema embarcado e transmitido a um *host* para realizar o tratamento do sinal em um *software* proprietário. O sistema embarcado pode ser um microcontrolador (μ C), uma FPGA, um DSP (do inglês *Digital Signal Processor*) ou um SBC. Dessa forma, é possível agrupar a estrutura geral de interrogadores em três possíveis configurações. Essas estão listadas abaixo e utilizam o que está apresentado na Figura 6 para fazer as descrições.

1. **I (OES) com IV (DS):** A BBS (I - OES) ilumina os sensores e a detecção é feita por um espectrômetro (IV - DS). Essa configuração é usada no I-MON 256 HS da empresa Ibsen.
2. **II (OES) com V (DS):** A opção “A” consiste na BBS (I - OES) em conjunto com um FFP-TF (do inglês *Fiber Fabry-Perot Tunable Filter*) (II - OES) como fonte óptica. O sinal retro-espalhado é detectado e convertido para o domínio elétrico por fotodetectores (V - DS). Nesta configuração (opção “A”) é possível substituir a fonte óptica por apenas um *laser* sintonizável (III - OES). Na opção “B”, a BBS (I - OES) é enviada diretamente aos sensores e o FFP-TF é posicionado na etapa de detecção.
3. **I (OES) com VI (DS):** A BBS (I - OES) é enviada aos sensores através do circulador óptico e o sinal retro-espalhado é convertido do domínio óptico ao elétrico com filtros de borda (VI - DS), também conhecido como filtro fixo. Em outras palavras, é feita a convolução entre o espectro dos sensores e o espectro do filtro e

isso pode ser feito a partir diversos dispositivos ópticos (DÍAZ et al., 2017; DÍAZ et al., 2018).

Figura 6 – Princípio de funcionamento de interrogadores ópticos



Fonte: Produção da própria autora.

4 SOLUÇÃO PROPOSTA

Este trabalho propõe melhorias do sistema de interrogação (Perrogator) inicialmente apresentado por Díaz et al. (2019). O foco, por sua vez, é na implementação do *firmware* do microcontrolador e no desenvolvimento de alguns circuitos eletrônicos necessários para atingir todos os objetivos propostos. O sistema como está atualmente pode ser visualizado na Figura 7 ao lado da versão anterior (V1) do Perrogator, no entanto, já foram projetados outros aprimoramentos que serão implementados em trabalhos futuros, como o CAD (do inglês *Computer-aided Design*) apresentado na Figura 8 responsável por abrigar todos os componentes do novo interrogador portátil.

Figura 7 – Comparação entre versões do Perrogator



Fonte: Produção da própria autora.

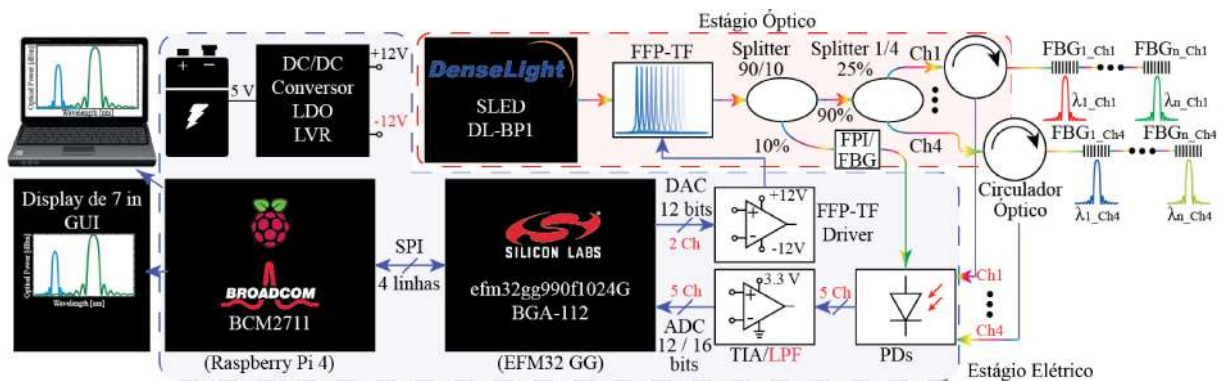
O funcionamento proposto do interrogador, que está retratado na Figura 9, será descrito apenas para um canal, pois é análogo para aos outros. Inicialmente, o filtro óptico ajustável obtém um comprimento de onda da fonte de banda larga. Em seguida, esse sinal praticamente monocromático passa por um *splitter* e depois por um circulador óptico (porta 1 para porta 2) para, enfim, entrar no sensor em fibra. O sinal (na porta 3 do circulador) proveniente do sensor é então adquirido pelo fotodetector e depois filtrado pelo passa-baixas — ambos presentes na placa de circuito impresso. O microcontrolador que estava controlando o filtro óptico adquire o sinal do sensor através do módulo ADC (do inglês *Analog to Digital Converter*) e envia os dados para o SBC. Por fim, o SBC processa os sinais e exibe os dados dos sensores em uma interface gráfica de usuário.

Figura 8 – CAD do encapsulamento proposto



Fonte: Produção da própria autora.

Figura 9 – Esquemático do interrogador óptico



Fonte: Produção da própria autora.

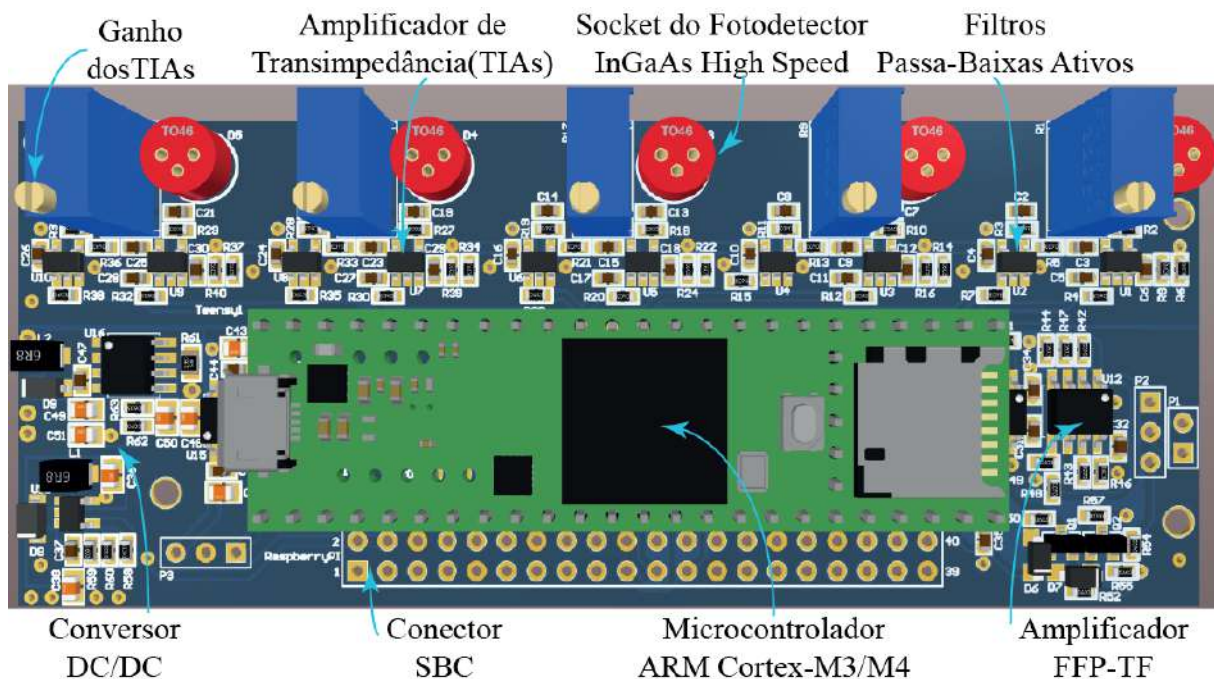
4.1 Hardware

O interrogador óptico proposto possui dois estágios, um óptico e um elétrico. O estágio óptico é composto por uma fonte de luz de banda larga, sensores baseados em comprimento de onda, um filtro de Fabry-Perot ajustável, um *splitter* 90/10, um *splitter* 1/4 e quatro circuladores ópticos. Os sensores são dos tipos FBGs e FPIs, a fonte de banda larga é o

LED superluminescente (SLED, do inglês *Superluminescent Diode*) do modelo DL-BP1-1501A da Ibsen Photonics (PHOTONICS, 2010) e o filtro é o FFP-TF (do inglês *Fiber Fabry-Perot Tunable Filter*) da Micron Optics (OPTICS, 2010).

O estágio elétrico é composto por um microcontrolador — que pode ser o EFM32GG990F1024-BGA112 da *Silicon Labs* ou o MK66FX1MO (Teensy® 3.6), um computador de placa única — o que está sendo usado é uma *Raspberry Pi 4*, um *touchscreen display* de 7 polegadas, um SSD (do inglês *Solid-state Drive*) de 250 GB e uma placa de circuito impresso. A placa foi projetada no software *Altium Designer* e pode ser visualizada na Figura 10. Ela contém fotodetectores de alta velocidade, amplificadores, filtros passa-baixas ativos, um *driver* para o filtro ajustável e um conversor DC/DC.

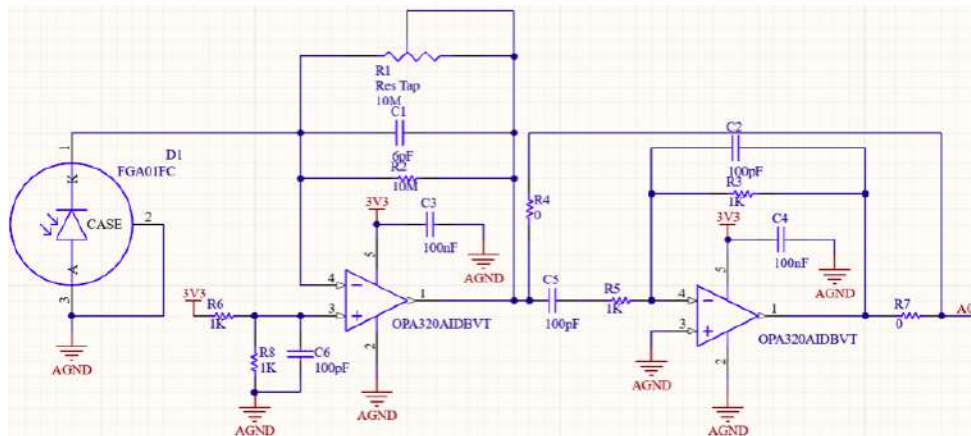
Figura 10 – Placa de circuito impresso do interrogador óptico



Fonte: Produção da própria autora.

O estágio de conversão eletro-óptica pode ser visualizado na Figura 11 e é composto pelos fotodiodos de alta velocidade (InGaAs), os amplificadores de trans-impedância (TIA, do inglês *Transimpedance Amplifier*) e os filtros passa-baixa ativos. O fotodetector é responsável por converter o sinal óptico para um sinal elétrico — quanto maior a quantidade de luz incidente, maior será a corrente resultante. O TIA, por sua vez, converte a corrente em tensão e um resistor fixo (R2) e um variável (R1) são usados para fechar o *loop* da tensão de saída, de forma que essa seja ajustável e proporcional ao valor da resistência (lei de Ohm). O sistema também conta com um filtro passa-baixas ativo de primeira ordem para limitar a banda do sinal antes da conversão analógica-digital.

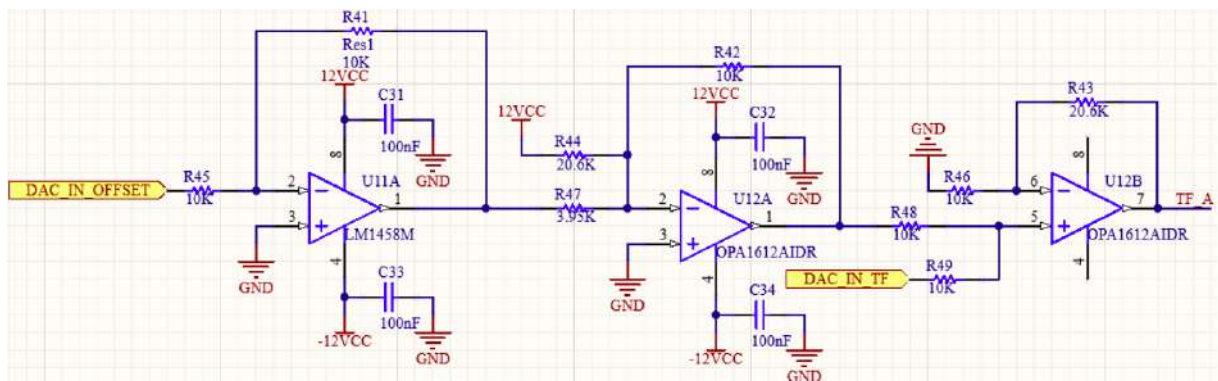
Figura 11 – Esquemático do circuito de conversão eletro-ótica



Fonte: Produção da própria autora.

O *drive* para o filtro ajustável pode ser visualizado na Figura 12. A fim de obter uma excursão de tensão maior para atingir o FSR do filtro sintonizável, é necessário implementar um circuito de condicionamento de sinal que mapeie o sinal de entrada positivo em um sinal de fonte dupla, ou seja, que faça a tensão DAC_IN_OFFSET funcionar como um *offset* DC (do inglês *Direct Current*) para a rampa que alimenta o filtro (o sinal do DAC IN TF A). Por fim, a Figura 13 mostra o estágio de potência presente na placa de circuito impresso que é necessário quando a frequência é mais elevada.

Figura 12 – Esquemático do drive do filtro

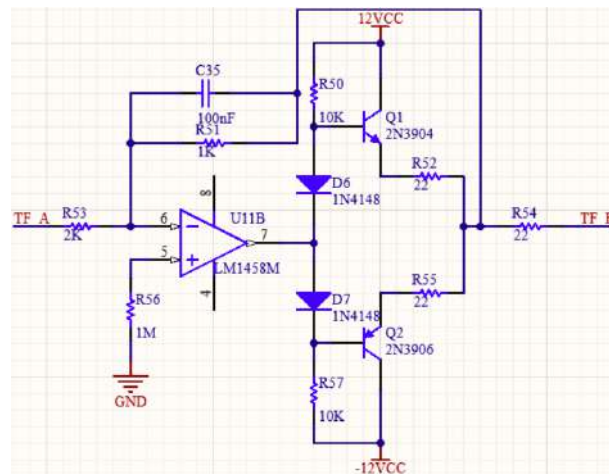


Fonte: Produção da própria autora.

4.2 Software

O *software* desenvolvido para realizar o monitoramento dos sinais obtidos pelo interrogador óptico é uma interface gráfica de usuário (GUI) programada em Python para o sistemas

Figura 13 – Esquemático do estágio de potência



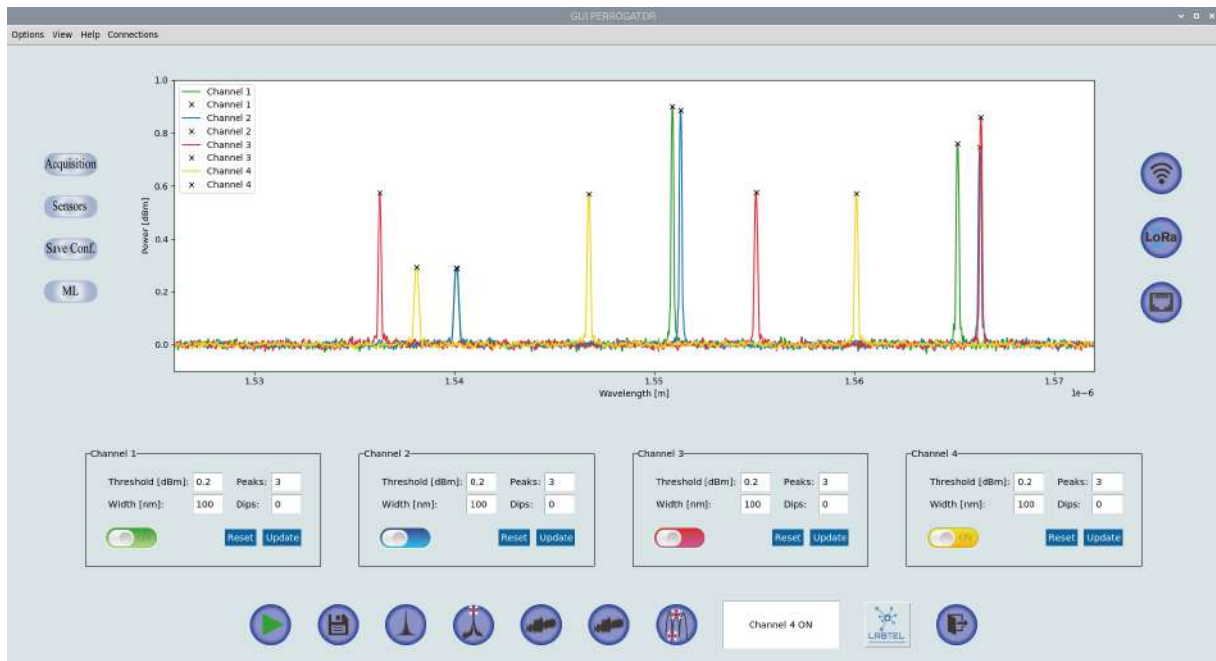
Fonte: Produção da própria autora.

operacionais Windows e para distribuições do Linux. A GUI disponibiliza cinco tipos de visualizações dos sinais para cada um dos quatro canais. A primeira é a visualização do espectro de sensores FBGs, a segunda é a visualização dos espectros junto a identificação dos picos — assim como pode ser observado nas Figuras 14 e 15, a terceira é o valor dos picos no espectro por número de amostras, a quarta é potência dos picos por número de amostras e a quinta é a visualização do espectro de sensores FPIs. O usuário pode alternar, pausar e retomar as visualizações com facilidade.

A identificação dos picos descrita anteriormente é feita depois do sinal ser inicialmente filtrado contra ruídos e ocorre a partir de um algoritmo de processamento digital de sinais no qual as entradas são dinâmicas e definidas pelo usuário. Os dois parâmetros utilizados são *Width* e *Threshold* que dizem a respeito, respectivamente, a distância mínima entre os picos e o valor de potência utilizado como limiar. Esses valores são independentes para cada canal e podem ser armazenados como preferência do usuário para monitoramentos futuros. Além do mais, a interface também salva a preferência do usuário de idioma (as opções disponíveis são inglês, português e espanhol) e modo de exibição, *dark mode* ou *light mode*.

Ademais, o software permite o armazenamento dos dados adquiridos para monitoramento *offline*. Essa funcionalidade permite fazer o armazenamento do espectro, do comprimento de onda dos picos por amostra e da potência dos picos por amostra, simultaneamente ou não. Para cada um, é possível escolher como os dados são obtidos um vez que definida a frequência de aquisição. As opções são: por um limite de tempo definido, por quantidade de amostras ou até que o usuário interrompa a aquisição. O usuário também pode definir

Figura 14 – Visualização dos espectros com a identificação dos picos



Fonte: Produção da própria autora.

Nota: Imagem obtida no sistema operacional *Windows*, monitor com resolução HD, e inglês e *light mode* como preferência de usuário.

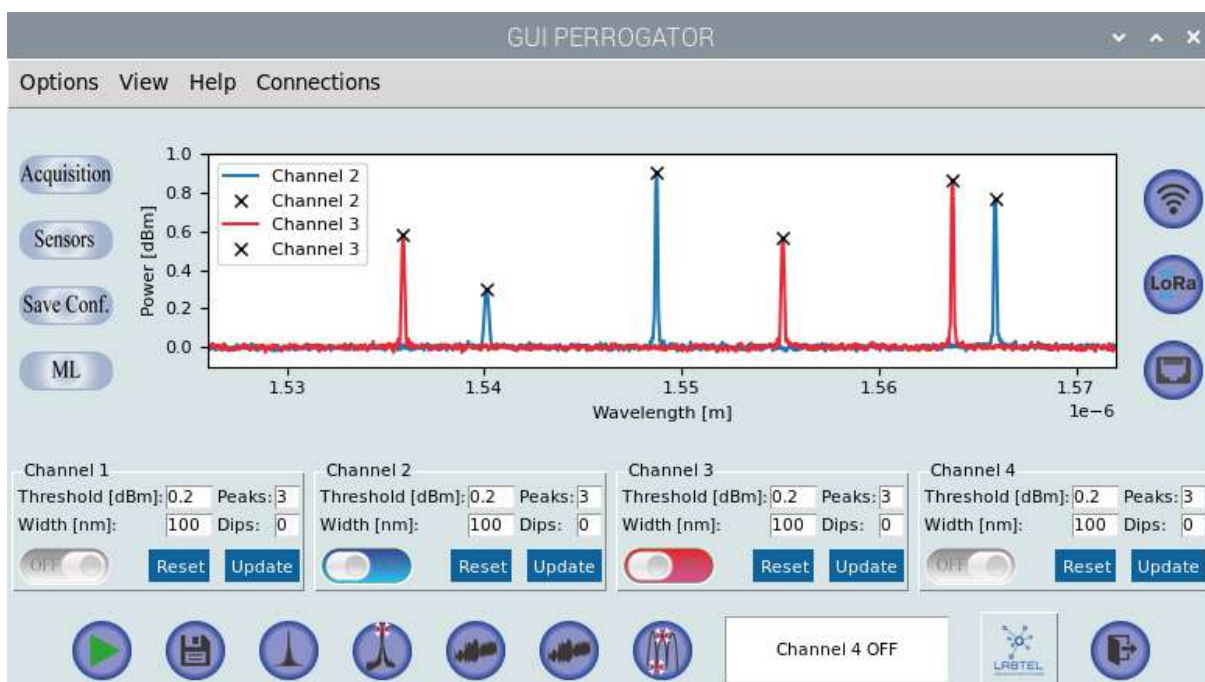
a quantidade máxima de memória que ele deseja que os dados armazenados ocupem e o diretório no qual os dados são salvos.

Outra funcionalidade do software é a de *Connections* — Figura 16. Em outras palavras, o programa executado no interrogador portátil é capaz de funcionar como servidor ou cliente, ou seja, é capaz de receber ou enviar dados de forma remota de ou para outra GUI hospedada em outro computador que esteja na mesma rede local. Programas que não sejam executados no SBC no interrogador são limitados a apenas receber os dados de forma remota (cliente). Por fim, a interface disponibiliza um formulário que pode ser preenchido pelo usuário caso esse encontre qualquer tipo de *bug* ou queira simplesmente sugerir alguma melhoria.

4.3 *Firmware*

O *firmware* escrito em C para o microcontrolador do interrogador óptico realiza três funções principais: (i) faz o controle do drive do filtro (ii) obtém os valores de tensão provenientes dos fotodetectores e (iii) envia os sinais digitalizados para o SBC. O circuito

Figura 15 – Visualização dos espectros com a identificação dos picos



Fonte: Produção da própria autora.

Nota: Imagem obtida no sistema operacional *Raspberry OS*, monitor com resolução SD, e inglês e *light mode* como preferência de usuário.

Figura 16 – Funcionalidade *Connections*

Fonte: Produção da própria autora.

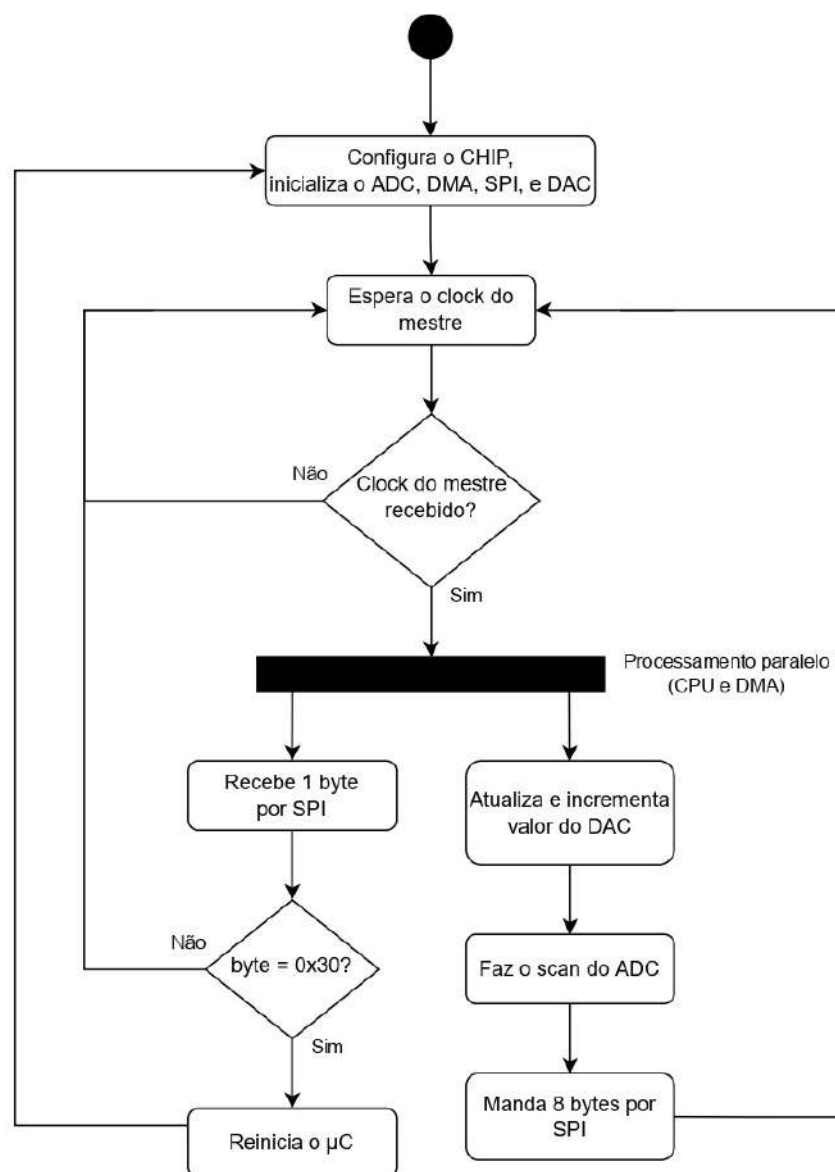
Nota: Imagem obtida no sistema operacional *Raspberry OS*, monitor com resolução SD, e inglês e *light mode* como preferência de usuário.

de controle (*drive*) do filtro possui como entrada dois canais de DAC do microcontrolador, o canal 0 e o canal 1. O canal 0 gera uma rampa de 0 V a 2.5 V com resolução de 12 bits em sincronia com a aquisição dos dados. O canal 1 é inicializado com um valor de tensão

que se mantém contante.

Os valores de tensão provenientes dos fotodetectores são obtidos através do módulo ADC do microcontrolador logo após o valor da rampa ser atualizado. Esse modulo é único mas inclui a funcionalidade de *scan*. Dessa forma, é feita a conversão analógica digital de quatro canais para cada valor da rampa. Por fim, os dados obtidos são enviados por SPI para o computador de placa única. Além do mais, o módulo de ADC e de SPI são configurados para fazer uso do DMA (do inglês, *Direct Memory Access*) com o intuito de obter a melhor performance possível. O fluxograma a seguir retrata graficamente esse comportamento.

Figura 17 – Fluxograma do código do microcontrolador



Fonte: Produção da própria autora.

Em mais detalhes, a resolução do ADC do microcontrolador usado é de 12 *bits*, dessa

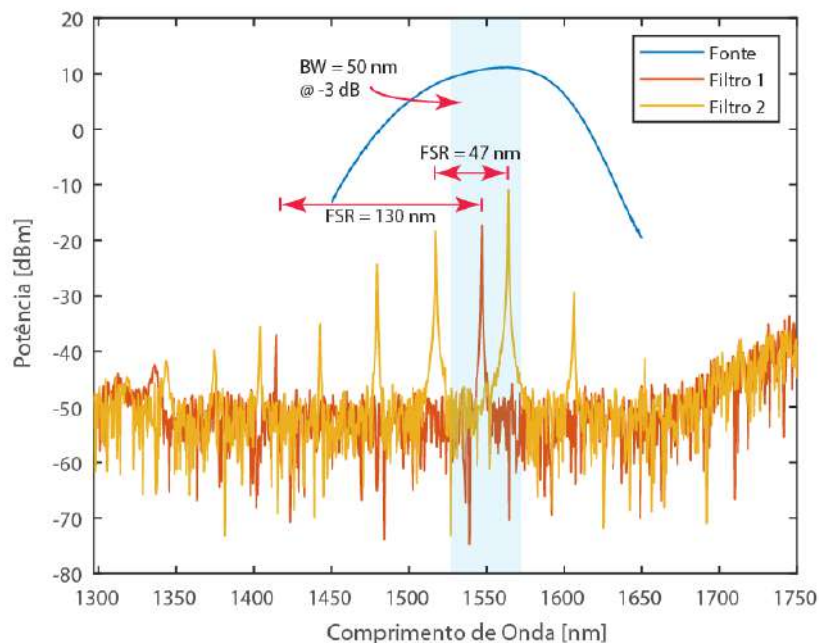
forma, a cada *scan* os valores digitalizados obtidos são armazenados e ocupam 64 *bits*. Isso ocorre, pois, são quatro canais de ADC e, para cada canal, são usados dois *bytes* para armazenar os 12 *bits* do ADC. O mesmo ocorre durante a transmissão por SPI. O buffer de transmissão utilizado é de 8 bits, então, cada valor obtido com o ADC é transmitido de dois em dois bytes. Por fim, assim como pode ser observado no fluxograma, inicialmente ocorre a etapa de *setup* e em seguida o programa entra no *loop* de incremento do DAC, aquisição e transmissão em sincronia com o *clock* do mestre (SBC).

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização do espectro ótico

A Figura 18 apresenta os espectros e a análise das diferentes características espectrais da BBS (do inglês *Broad-band source*) e dos dois FFP-TFs usados. A largura de banda da região ativa da BBS é de cerca de 50 nm e está centrada em 1550 nm. É de interesse que, para cada filtro óptico, um pico do espectro esteja dentro dessa região para garantir funcionamento efetivo dos sensores.

Figura 18 – Espectros da BBS e dos FFP-TFs

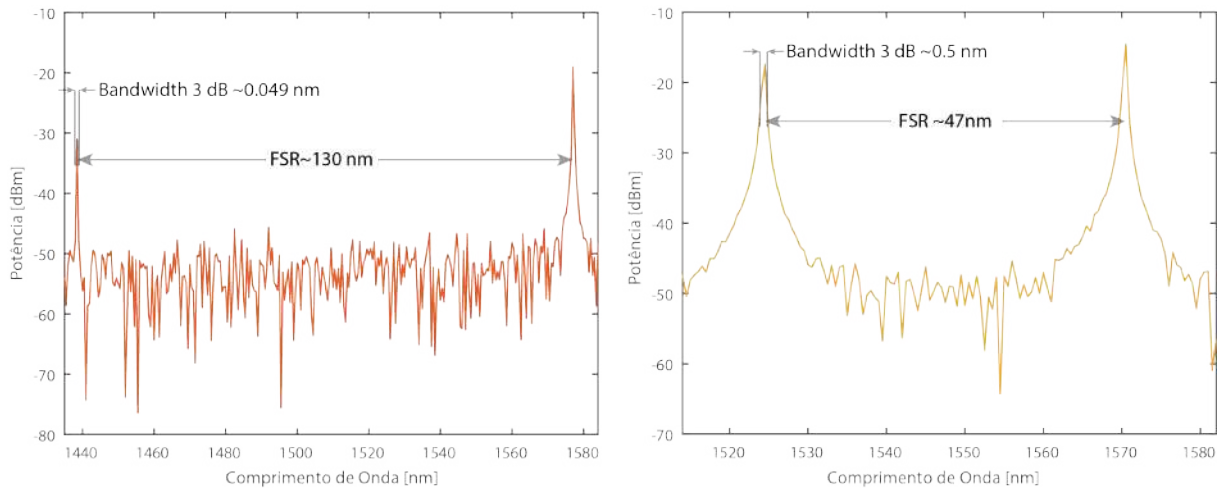


Fonte: Produção da própria autora.

Na Figura 19 à esquerda está o espectro do filtro 1 entre 1435 e 1584 nm e à direita está o espectro do filtro 2 entre 1514 e 1582 nm. O filtro 1 tem aproximadamente 130 nm de FSR (do inglês *Free Spectrum Range*) e 49 pm de largura de banda a 3 dB. O segundo filtro tem aproximadamente 47 nm de FSR e 500 pm de largura de banda a 3 dB. A visibilidade de ambos os filtros em 1550 nm é aproximadamente 30 dB.

O *redshift wavelength* em função da tensão é apresentado na Figura 20 para o filtro 2. Pode-se observar que, para 0 V, um dos picos está centrado em 1516 nm e próximo da

Figura 19 – Zoom dos espectros dos FFP-TFs

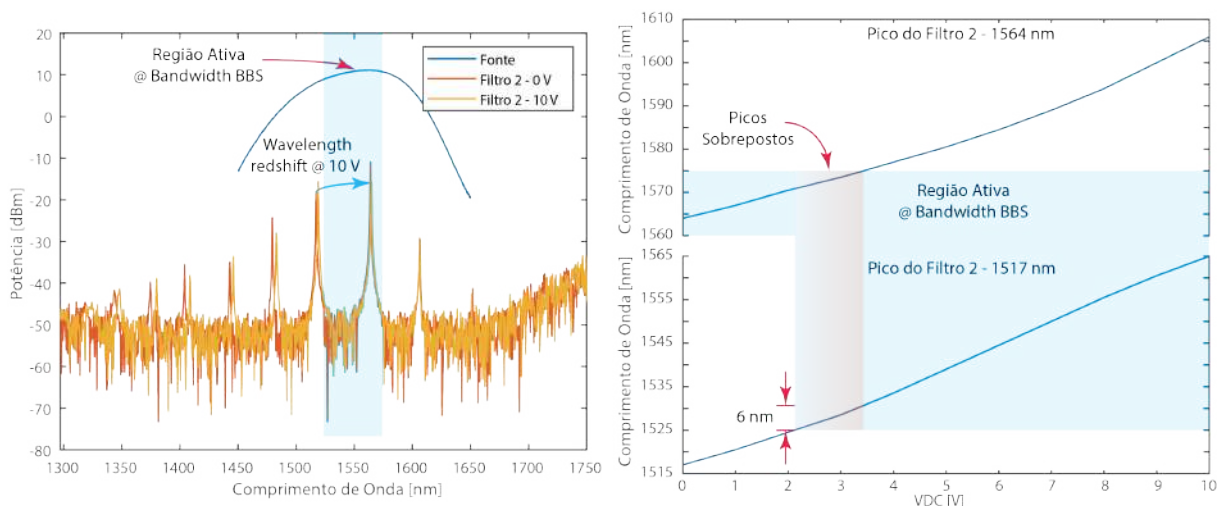


Fonte: Produção da própria autora.

Nota: Filtro 1 à esquerda e filtro 2 à direita

região ativa enquanto outro pico está centrado em 1565 nm e dentro da região ativa. Quando a tensão aumenta e atinge cerca de 2 V, o primeiro pico entra na região ativa. No entanto, o segundo pico continua nesta região, resultando na sobreposição da potência óptica que “passaria” por ambos os picos. Esta situação é indesejada e se mantém até 3,5 V, levando a 6 nm de “área” inútil. Para lidar com esse problema, é necessário um *offset* de 3,5 V na alimentação para ajustar os picos do FFP-TF.

Figura 20 – *Redshift wavelength* do filtro 2



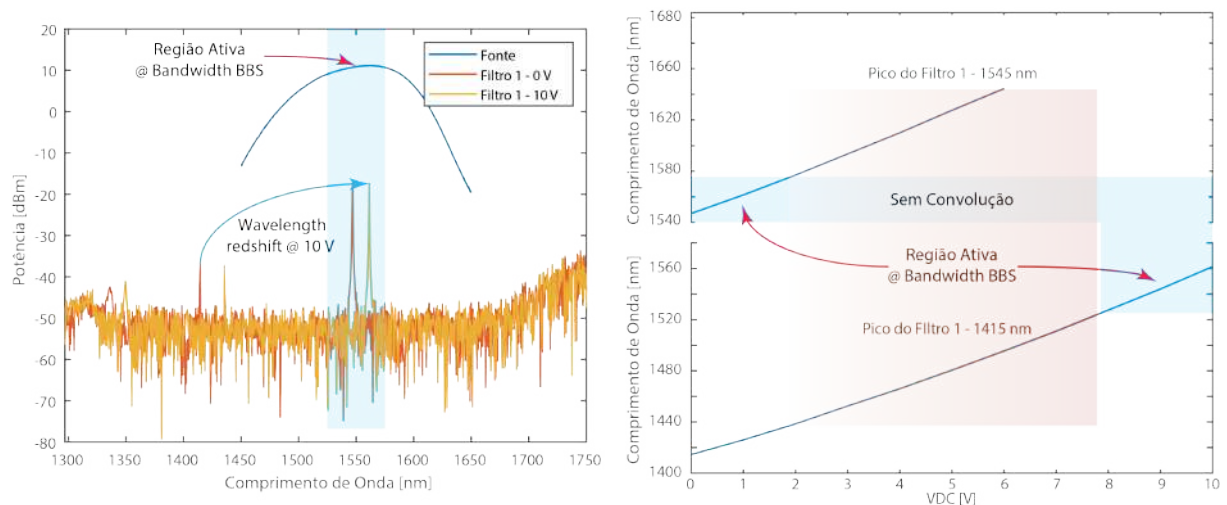
Fonte: Produção da própria autora.

Nota: Espectros da BBS e *redshift wavelength* do filtro 2 em 0 V e 10 V a esquerda e *Redshift wavelength* do filtro 2 em 0 V a 10 V a direita.

Mudanças de temperatura no filtro usando uma placa Peltier seria uma alternativa para contornar o problema indesejado descrito no parágrafo anterior, no entanto, aumentaria o consumo de energia. A mesma análise foi realizada para o filtro 1 e a Figura 21 evidencia, ao mostrar o espectro do filtro em 0 V e em 10 V, que o FSR é alcançado com menos de 10 V (8,8 V) e que este filtro apresenta comportamento oposto ao encontrado na análise do filtro 2. Ou seja, há um pico dentro da região ativa centrado em 1548 nm, e o outro pico agora está distante da região ativa e centrado em 1418 nm.

Quando a tensão aumenta, o pico em 1548 nm sai da região ativa após 2 V, como pode ser observado na Figura 21. Além disso, de 2 V a aproximadamente 8 V não há convolução entre a região ativa (fonte óptica) e um pico do filtro. Isso significa que há uma área inútil de 6 V (ou 80 nm). Mais uma vez, esse problema indesejado pode ser resolvido aplicando mudanças de temperatura no filtro usando uma placa Peltier. No entanto, a melhor solução é aplicar um *offset* de tensão de 8 V para trazer o pico de 1418 nm para a região ativa ou aplicar um *offset* negativo de -2 V para ajustar o pico de 1548 nm onde a região ativa começa.

Figura 21 – *Redshift wavelength* do filtro 1



Fonte: Produção da própria autora.

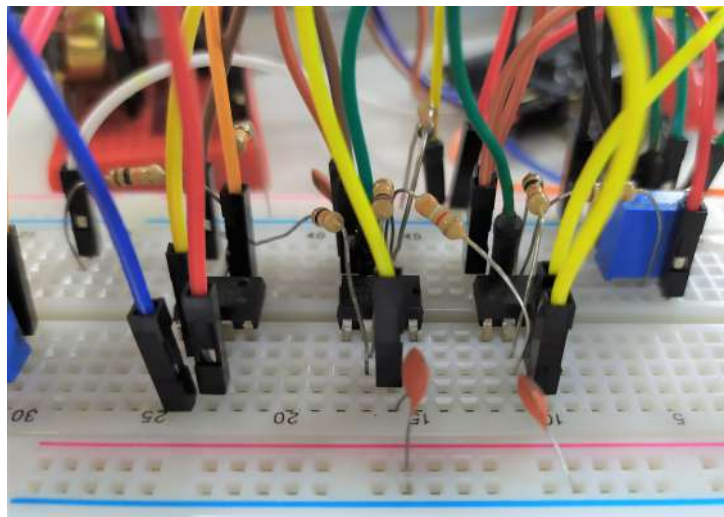
Nota: Espectros da BBS e *redshift wavelength* do filtro 1 em 0 V e 10 V a esquerda e *Redshift wavelength* do filtro 1 em 0 V a 10 V a direita.

5.2 Validação do *drive* do filtro

A validação do *drive* do filtro proposto foi realizada reproduzindo em laboratório o circuito explicado na Seção 4.1 e visualizado na Figura 12. A Figura 22 mostra os componentes

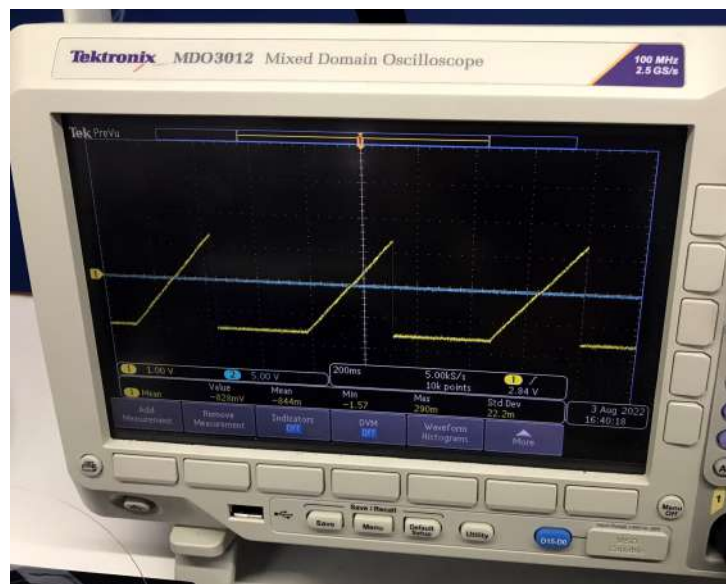
montados em uma *protoboard* e a Figura 23 mostra a saída obtida no osciloscópio. Foi verificado com um interrogador óptico comercial que a rampa gerada pelo microcontrolador com o *offset* e o ganho aplicado pelo *drive* controlaram o *sweep* do filtro como esperado.

Figura 22 – *Drive* do filtro montado em protoboard



Fonte: Produção da própria autora.

Figura 23 – Resposta do *drive* do filtro



Fonte: Produção da própria autora.

5.3 Validação do sistema com sensores reais

Experimentos com um sensor em fibra foram conduzidos em laboratório a fim de comprovar a funcionalidade do sistema completo. A Figura 24 mostra o sensor FBG utilizado e a Figura 25 apresenta o espectro desse sensor na GUI embarcada no SBC. Assim como pode ser observado, o espectro está com muito ruído, principalmente pelos experimentos estarem montados em bancada e estarem utilizando *protoboard* e *jumpers*, assim como pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 24 – Sensor FBG

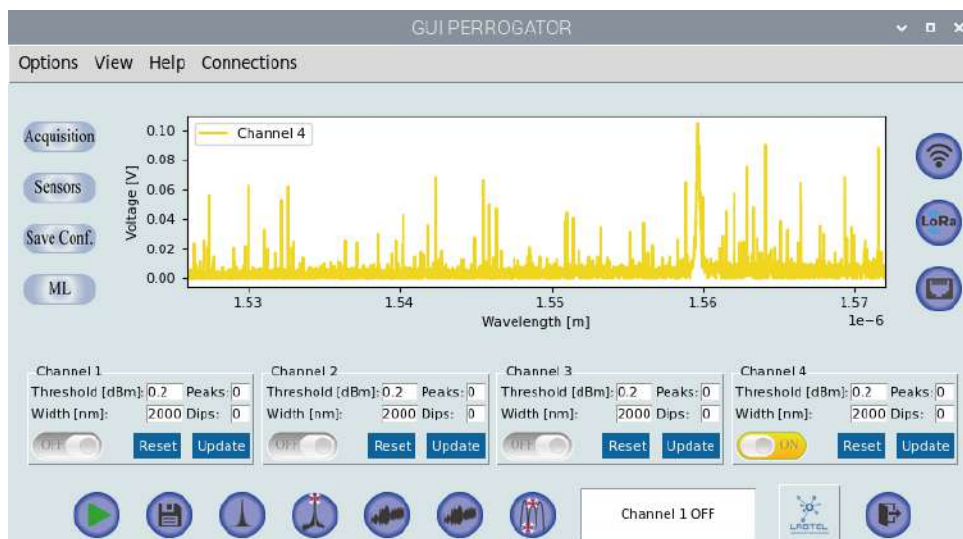


Fonte: Produção da própria autora.

Ao aplicar sobre o espectro do sensor a funcionalidade de identificação dos picos, descrita na seção 4.2 e que pode ser visualizada na Figura 26, é notável a melhora na resposta do sensor. Isso ocorre pois, antes do algoritmo de identificação dos picos, é aplicado um filtro passa-baixas digital sobre o espectro com o intuito de eliminar esses sinais em alta frequência parasitas.

O acompanhamento do pico identificado é, por sua vez, mostrado na Figura 27. Nele é facilmente perceptível o funcionamento do sensor. As variações de 0.1 nm são devido a ruídos ainda presentes, no entanto, as variações notáveis de aproximadamente 0.3 nm no comprimento de onda central do pico são as provenientes de esforços aplicados ao sensor. Os testes foram feitos com apenas um sensor, então apenas um canal foi utilizado, mas as funcionalidades implementadas para os outros canais são análogas e, visto que a

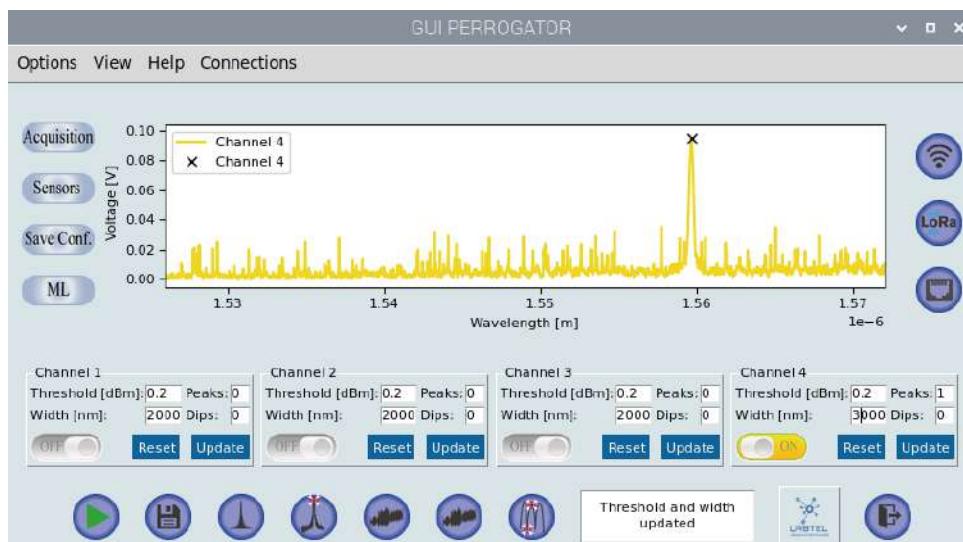
Figura 25 – Visualização do espectro



Fonte: Produção da própria autora.

Nota: Imagem obtida no sistema operacional *Raspberry OS*, monitor com resolução SD, e inglês e *light mode* como preferência de usuário.

Figura 26 – Visualização do espectro filtrado e com a identificação do pico

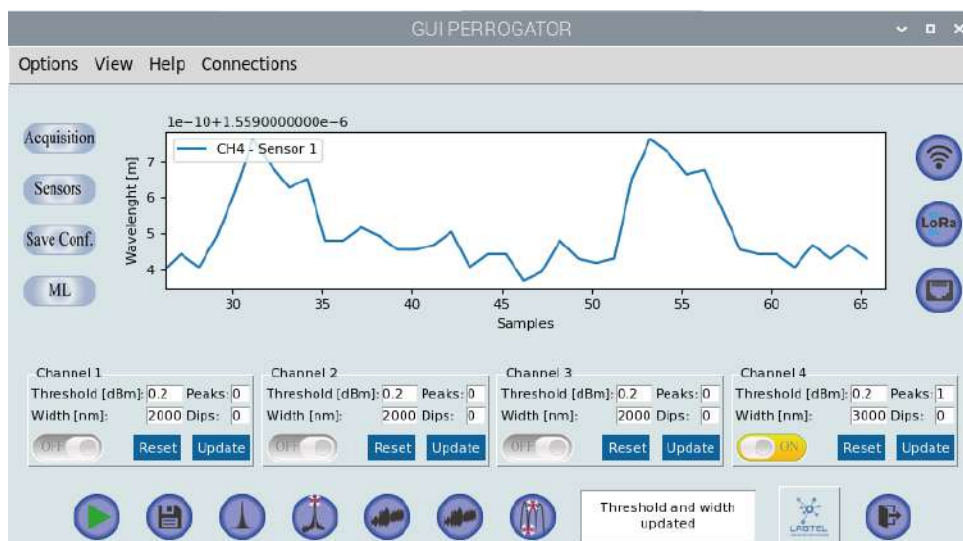


Fonte: Produção da própria autora.

Nota: Imagem obtida no sistema operacional *Raspberry OS*, monitor com resolução SD, e inglês e *light mode* como preferência de usuário.

alternativa de interrogação ótica utilizada é a de reconstrução do espectro, cada canal poderia conter múltiplos sensores multiplexados.

Figura 27 – Acompanhamento do pico pelo número de amostras



Fonte: Produção da própria autora.

Nota: Imagem obtida no sistema operacional *Raspberry OS*, monitor com resolução SD, e inglês e *light mode* como preferência de usuário.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho relatou evoluções do interrogador óptico apresentado pela primeira vez por Díaz et al. (2019). A versão atual do interrogador inclui aprimoramentos de *hardware* e *software*. Em termos de *hardware*, quatro canais foram adicionados para monitorar sensores baseados em comprimento de onda. Além disso, a eletrônica para o controle do filtro foi aprimorada, adicionando um circuito de condicionamento de sinal que produz tensões entre -12 e +12 V (o *driver* do filtro). Um estágio de potência também foi implementado para aumentar a frequência do filtro sintonizável.

O novo *driver* pode ser facilmente adaptado a diferentes tipos de FFP-TFs, resultando em um sistema mais flexível que depende menos das características espectrais do filtro em questão. A placa de circuito impresso (PCB, do inglês *Printed Circuit Board*) deste módulo está sendo fabricada, mas experimentos foram conduzidos em laboratório e os resultados esperados foram alcançados. Em termos de software, foi desenvolvida uma interface gráfica visando portabilidade. A GUI foi testada com sinais ópticos provenientes de sensores e várias funcionalidades foram validadas.

Um *display* de 7 polegadas está sendo usado para monitorar os espectros dos sensores, e uma caixa impressa em 3D foi projetada para abrigar futuramente todos os componentes (óptica e eletrônica). Em trabalhos futuros, mais medições dos sensores FBGs/FPIs serão feitas após a integração do novo hardware (PCB), bem como a caracterização do sistema geral sob aplicações dinâmicas. Por fim, serão implementadas estratégias de controle para melhorar a resposta do filtro em termos de linearidade e histerese. O projeto contribuiu com uma apresentação e submissão de artigo para a 5ª Conferência Internacional sobre Aplicação de Óptica e Fotônica (AOP, 2022), assim como convite para ser *Invited Speaker* na Conferência Internacional de Lasers, Óptica e Fotônica que ocorrerá em 2023 em Valência, Espanha (ISLOP, 2023).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOP. AOP 2022 | The 5th International Conference on Application of Optics and Photonics. 2022. Disponível em: <<https://aop2022.org/>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 42.

CUSANO, A.; CUTOLO, A.; ALBERT, J. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation. [S.l.]: Bentham Science Publishers, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 17.

DANDRIDGE, A.; COGDELL, G. B. Fiber optic sensors for navy applications. IEEE LCS, IEEE, v. 2, n. 1, p. 81–89, 1991. Citado na página 12.

DÍAZ, C. A.; LEITÃO, C.; MARQUES, C. A.; DOMINGUES, M. F.; ALBERTO, N.; PONTES, M. J.; FRIZERA, A.; RIBEIRO, M. R.; ANDRÉ, P. S.; ANTUNES, P. F. Low-cost interrogation technique for dynamic measurements with fbg-based devices. Sensors, MDPI, v. 17, n. 10, p. 2414, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.

DÍAZ, C. A.; MARQUES, C. A.; DOMINGUES, M. F. F.; RIBEIRO, M. R.; FRIZERA-NETO, A.; PONTES, M. J.; ANDRÉ, P. S.; ANTUNES, P. F. A cost-effective edge-filter based fbg interrogator using catastrophic fuse effect micro-cavity interferometers. Measurement, Elsevier, v. 124, p. 486–493, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.

DÍAZ, C. A. R.; AVELLAR, L. M.; LEAL-JUNIOR, A. G.; FRIZERA, A.; ANTUNES, P. F. C.; PONTES, M. J.; MARQUES, C. A.; RIBEIRO, M. R. N. Perrogator: A portable energy-efficient interrogator for dynamic monitoring of wavelength-based sensors in wearable applications. Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 12, 13, 21, 26 e 42.

FBGS. FBG Principle. 2022. Disponível em: <<https://fbgs.com/technology/fbg-principle/>>. Acesso em: 4 feb. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

IBSEN. I-MON High Speed. 2022. Disponível em: <<https://ibsen.com/products/interrogation-monitors/i-mon-high-speed/>>. Acesso em: 10 julho 2022. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 23.

ISLOP. ISLOP2023 | International Summit on Lasers, Optics and Photonics | Spectrum Conferences. 2023. Disponível em: <<https://www.spectrumconferences.com/2023/islop>>. Citado na página 42.

KAHANDAWA, G. C.; EPAARACHCHI, J.; WANG, H.; LAU, K. Use of fbg sensors for shm in aerospace structures. Photonic Sensors, Springer, v. 2, n. 3, p. 203–214, 2012. Citado na página 12.

KHANDELWAL, P. Optical fiber sensors: Classification & applications. International Journal of Latest Technology, Managenment & Applied Science, v. 2, n. VII, p. 22–25, 2013. Citado na página 12.

KHOURI, M. L.; SEGATTO, M. E.; PONTES, M. J.; MONTEIRO, M. E.; FRIZERA, A.; DÍAZ, C. A. A low-cost portable interrogator for dynamic monitoring of wavelength-based sensors. *AOP2022*, 2022. Citado na página 14.

LEAL-JUNIOR, A. G.; DÍAZ, C. R.; JIMÉNEZ, M. F.; LEITÃO, C.; MARQUES, C.; PONTES, M. J.; FRIZERA, A. Polymer optical fiber-based sensor system for smart walker instrumentation and health assessment. *IEEE Sensors Journal*, v. 19, n. 2, p. 567–574, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 20.

LEAL-JUNIOR, A. G.; MARQUES, C.; FRIZERA, A.; PONTES, M. J. Multi-interface level in oil tanks and applications of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, v. 40, p. 82–92, 2018. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520017305266>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 20.

LOPEZ-HIGUERA, J. M.; COBO, L. R.; INCERA, A. Q.; COBO, A. Fiber optic sensors in structural health monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 4, p. 587–608, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 20.

LUNA. *HYPERION Single Board Interrogator*. 2022. Disponível em: <<https://lunainc.com/product/single-board-interrogator>>. Acesso em: 10 julho 2022. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 23.

MISHRA, V.; SINGH, N.; TIWARI, U.; KAPUR, P. Fiber grating sensors in medicine: Current and emerging applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 167, n. 2, p. 279–290, 2011. ISSN 0924-4247. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092442471100118X>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 20.

OPTICS, M. *Fiber Fabry-Perot Tunable Filter | FFP-TF*. 2010. Disponível em: <<http://micronoptics.ru/uploads/library/documents/Datasheets/Micron%20Optics%20-%20FFP-TF.pdf>>. Citado na página 28.

OPTICS, M. *Optical Sensing Interrogator | sm130*. 2022. Disponível em: <<http://www.micronoptics.ru/uploads/library/documents/Datasheets/Micron%20Optics%20sm130.pdf>>. Acesso em: 10 julho 2022. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 23.

OPTICS, R. *Fiber Bragg Grating Transceiver*. 2022. Disponível em: <http://www.redondooptics.com/FBGT_060209.pdf>. Acesso em: 10 julho 2022. Citado 3 vezes nas páginas 12, 23 e 24.

PASCHOTTA, R. *Optical Spectrum Analyzers*. 2022. Disponível em: <https://www.rp-photonics.com/optical_spectrum_analyzers.html>. Acesso em: 9 julho 2022. Citado na página 22.

PHOTONICS. *Fiber Optics: Understanding the Basics*. 2022. Disponível em: <https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Optics_Understanding_the_Basics/a25151>. Acesso em: 25 julho 2022. Citado na página 16.

PHOTONICS, I. *Superluminescent LED Source (with Integrated Optical Circulator)*. 2010. Disponível em: <https://ibsen.com/wp-content/uploads/DL-BP1-1501A_RevB.pdf>. Citado na página 28.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. D. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. [S.l.]: Editora Feevale, 2013. Citado na página 14.

REIDER, G. A. Photonics: An Introduction. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

SENIOR, J. M.; JAMRO, M. Y. Optical fiber communications: principles and practice. [S.l.]: Pearson Education, 2009. Citado na página 16.