Rodolpho Ladislau Silva

Interferômetro de Sagnac para medição de temperatura utilizando uma fibra dopada com érbio como elemento sensor

Vitória, ES

2022

Rodolpho Ladislau Silva

Interferômetro de Sagnac para medição de temperatura utilizando uma fibra dopada com érbio como elemento sensor

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Técnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro Tecnológico

Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt Castellani

Coorientador: Me. João Paulo Lebarck Pizzaia

Vitória, ES

2022

Rodolpho Ladislau Silva

Interferômetro de Sagnac para medição de temperatura utilizando uma fibra dopada com érbio como elemento sensor

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Técnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Vitória, ES, 16 de agosto de 2022:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt Castellani
Orientador

Me. João Paulo Lebarck Pizzaia
Coorientador

Prof. Dra. Maria José Pontes
Avaliador interno

Prof. Dr. Luís Cícero Bezerra da Silva
Avaliador interno

Vitória, ES
2022

Rodolpho Ladislau Silva

Interferômetro de Sagnac para medição de temperatura utilizando uma fibra dopada com érbio como elemento sensor

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Vitória, ES, 16 de agosto de 2022:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Schimidt Castellani
Orientador

Me. João Paulo Lebarck Pizzaia
Coorientador

Prof. Dra. Maria José Pontes
Convidado 1

Prof. Dr. Luís Cícero Bezerra da Silva
Convidado 2

Vitória, ES
2022

ZapSign a896f5e5-336f-42a4-83c0-7822fcf386b6. Documento assinado eletronicamente, conforme MP 2.200-2/2001 e Lei 14.063/2020.
Digitalizado com CamScanner

A minha família.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por todas a portas que ele abriu até aqui. Agradeço a minha esposa Daiane, minha filha Luiza, meu pai Luiz, minha mãe Nazarete, meu irmão Rafael e minhas cunhadas(o) Larissa, Roberta, Daniele, Leia e Helington e meus sobrinhos Isaac, Rebeca e Arthur por sempre me apoiarem e me darem forças para não desistir.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo, por todo o conhecimento que compartilhou comigo no decorrer dos anos, por sempre conseguir horários para me atender, por sempre me ajudar em problemas academicos e pessoais . Um grande amigo que fez total diferença na minha passagem pela UFES.

Ao meu coorientador Prof. Me. João Paulo Lebarck Pizzaia, por toda atenção e boa vontade, sua ajuda foi fundamental nesse projeto de graduação.

Não posso deixar de agradecer também aos professores do LabTel Prof.Dra. Maria José Pontes, Prof.Dr. Moises e Prof.Dr. Anselmo, que estiveram sempre presentes me ajudando e ensinando tudo sobre os equipamentos, procedimentos e tirando dúvidas.

As amizades que fiz no decorrer dos anos durante a graduação e que se tornaram grande amigos, Fabricio, Francielly, Hozianna, Leonardo, Mariana, Thiago Coutinho e Thiago Sales.

Resumo

O desenvolvimento de um sensor de temperatura totalmente em fibra altamente sensível baseado em uma configuração de interferômetro Sagnac é demonstrado aqui. Foi utilizado 10 m de fibra dopada com érbio (EDF - do inglês erbium doped fiber) como elemento sensor passivo dentro do laço do interferômetro, aproveitando a birrefringência extra adicionada pela presença dos elementos de dopagem. Usando um método de interrogação padrão de simplesmente rastrear um pico de interferência, fomos capazes de detectar variações de temperatura com sensibilidade de até 0,2 nm/ºC e alta linearidade. Os resultados demonstram, que o uso de uma EDF como um elemento totalmente passivo pode ser uma opção interessante para ampliar o leque de possibilidades para sensores de temperatura altamente sensíveis.

Palavras-chaves: Interferômetro de Sagnac, sensor, medição de temperatura.

Abstract

The development of a highly sensitive all-fiber temperature sensor based on a Sagnac interferometer configuration is demonstrated here. A length of 10 m of erbium-doped fiber (EDF) was used as a passive sensing element within the Sagnac loop, taking advantage of the extra birefringence added by the presence of the doping elements. Using a standard interrogation method of simply tracking an interference peak, we were able to detect temperature variations with sensitivity down to 0.2 nm/^{o}C and high linearity. The results demonstrate that the use of an EDF as a fully passive element can be an interesting option to expand the range of possibilities for highly sensitive temperature sensors.

Keywords: Sagnac Interferometer, sensor, temperature measurement.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Seção transversal de uma fibra monomodo exibindo os diâmetros do núcleo e externo e os índices de refração. Dimensões ilustrativas.(PIZZAIA, 2021) 12
Figura 2 – Esquemático de um EDFA. 14
Figura 3 – (a) ocorrência de picos e vales espectrais devido ao fenômeno de interferência. (b) deslocamento aparente dos picos em função da temperatura. Adaptado de (LIU et al., 2019) 16
Figura 4 – Ilustração simplificada de um interferômetro de Sagnac. 17
Figura 5 – Espectro da fonte de luz infravermelha do Anritsu MS9740A. 18
Figura 6 – Esquemático da montagem utilizada para aquisição de dados experimentais. 18
Figura 7 – Estufa elétrica utilizada para variação da temperatura. 19
Figura 8 – Espectro transmitido para diferentes valores de temperatura. 21
Figura 9 – Variação do espectro nas regiões de interesse 1 e 2. 22
Figura 10 – Regressão linear para a localização dos vales em função da temperatura. 23

List of abbreviations and acronyms

FBG	Fiber Bragg Grating
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EDF	Erbium Doped Fiber
OSA	Optical Spectrum Analyser
SMF	Single Mode Fiber
PCF	Photonic Crystal Fiber
FP	Fabry-Perot
Er3+	Érbio 3+

Sumário

1 INTRODUÇÃO 10

2 TEORIA 12

3 MATERIAIS E MÉTODOS 17

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 21

5 CONCLUSÃO 25

REFERÊNCIAS 27

1 Introdução

A temperatura é um dos parâmetros mais críticos e importantes para muitas aplicações em áreas como indústria de siderurgicas, óleo e gás, farmacêutica, petroquímica, biomédica, logística entre outras (SHIN et al., 2020; MA et al., 2021; ZHANG; Mani Sarathy, 2021; ZHAO et al., 2021). Portanto, a capacidade de ter uma leitura precisa e confiável nas medições de temperatura é fundamental para garantirmos a qualidade da produção, segurança no local de trabalho, e para evitar o desgaste de equipamentos devido ao estresse e fadiga (TANG et al., 2021; XU et al., 2021).

Para medir a temperatura, muitos instrumentos foram usados ao longo da história, começando com o mercúrio em vidro por Daniel Fahrenheit em 1714 e, posteriormente, surgindo novos aparelhos como os termoacopladores, termistores, termômetros infravermelhos e sensores termoelétricos (PECORARO et al., 2020; WEBSTER, 2021; EDNALDO; SANTOS, 2020; CUI; SUN; SUN, 2020; CUI et al., 2020). No entanto, os sistemas ópticos totalmente em fibra têm algumas vantagens peculiares quando comparado com os métodos que operam no domínio elétrico. Eles são, em geral, mais leves, menores, seguros para ambientes com atmosferas potencialmente explosivas, e não são afetados por campos eletromagnéticos externos. Isto é evidenciado em trabalhos sobre o tema previamente publicados (CASTELLANI et al., 2016; SILVA; SILVA; CASTELLANI, 2020; DÍAZ et al., 2019).

Com os recentes avanços da fotônica e dos dispositivos em fibra, novas formas de medição de temperatura surgiram, como o uso das Grades de Bragg (FBGs, do inglês *Fiber Bragg Gratings*) e interferômetros Fabry-Perot (FP), que na maioria das vezes funcionam analisando as mudanças no espectro de interferência induzidas quando uma variação de temperatura é aplicada a eles (KONG et al., 2018; YU et al., 2018; ROSLI; NOOR, 2018).

Além dos já mencionados FBGs e FPs,existem também outras configurações tais como Mach–Zehnder, Interferômetro de Michelson, Fizeau, Twyman-Green e Sagnac (El Shamy; KHALIL; SWILLAM, 2020; RONG et al., 2021; XIONG et al., 2020; OHARA et al., 2020; Aslam Mollah et al., 2020). Para aplicações de detecção de temperatura, os interferômetros mais utilizados são o Mach-Zehnder e Michelson, que podem atingir sensibilidades de dezenas de pm/°C (SCANDIAN; SEGATTO; CASTELLANI, 2018; QI et al., 2020; GAO et al., 2020; LIU et al., 2020; TONG et al., 2020; MONFARED et al., 2020; FENG et al., 2020).

Os interferômetros de Sagnac são bem conhecidos por seu uso como giroscópios, porém mais recentemente eles têm sido usados em muitas outras aplicações, e até mesmo para detecção de ondas gravitacionais (FRAUENDIENER, 2020). No interferômetro de

Sagnac em fibra, ambos os feixes de contrapropagação usam o mesmo caminho óptico. Sendo, portanto, a diferença contabilizada apenas para parâmetros que não são homogêneos ao longo da fibra .

Devido à alta sensibilidade e simplicidade de montagem, o presente trabalho se propõe a realizar experimentos de sensoriamento de temperatura, utilizando um interferômetro de Sagnac utilizando uma fibra dopada com érbio (EDF, do inglês *Erbium Doped Fiber*) de 10 m de comprimento e uma birrefringência estimada de $2{,}1\times10^{-5}$, como o elemento sensor colocado no laço de interferômetro Sagnac.

A sensibilidade obtida no experimento aqui descrito foi de 214 pm/°C, bem acima dos dispositivos ópticos mais utilizados para medição óptica de temperatura, como FBGs, que costumam apresentar sensibilidades por volta de 10 pm/°C. *Scandian2018,Gao2020*

Em comparação com outros tipos de sensores de temperatura Sagnac, os que utilizam como elemento sensor fibras de cristal fotônico (PCFs, do inglês *Photonic Crystal Fiber*) ou fibras que mantém polarização (PMFs do inglês *Polarization Maintaining Fiber*), produzem sensores mais sensíveis, com sensibilidades por vezes superiores a 1 nm/ºC (GAO et al., 2020; TONG et al., 2020). No entanto, altas sensibilidades podem ser um problema para o sistema de interrogação que usam métodos de rastreamento de deslocamento de pico, pois pequenas variações de temperatura podem fazer o interrogador perder a capacidade de rastreio devido à sobreposição das curvas analisadas. Neste contexto, o uso de uma EDF como o elemento sensor de um interferômetro Sagnac é capaz de apresentar uma sensibilidade muito elevada, neste caso de 214 pm/ºC, e ainda permitir maiores faixas de temperatura utilizando para isso técnicas de interrogação mais simples.

2 Teoria

Com o objetivo de restringir o caminho que um sinal luminoso irá percorrer, é comumente utilizada a fibra óptica como guia de onda. Estas fibras podem ser confeccionadas em diferentes materiais, sendo a sílica o de maior predominância, no entanto, também é possível encontrar fibras ópticas confeccionadas de polímero e safira para algumas aplicações específicas, devido algumas características como a curva de absorção e elasticidade(AVELLAR et al., 2021; XING, 2020). Em sua forma elementar, a fibra óptica de índice de refração em degrau possui duas camadas concêntricas, o núcleo e a casca, exibidos na Figura 1 porém para aumentar a resistencia mecânica, é geralmente adicionada uma camada externa de acrilato. Dependendo da necessidade podem ainda ser adicionadas mais revestimentos para aumentar a proteção mecânica (BERROCAL; FERNANDEZ; REMPLING, 2021).

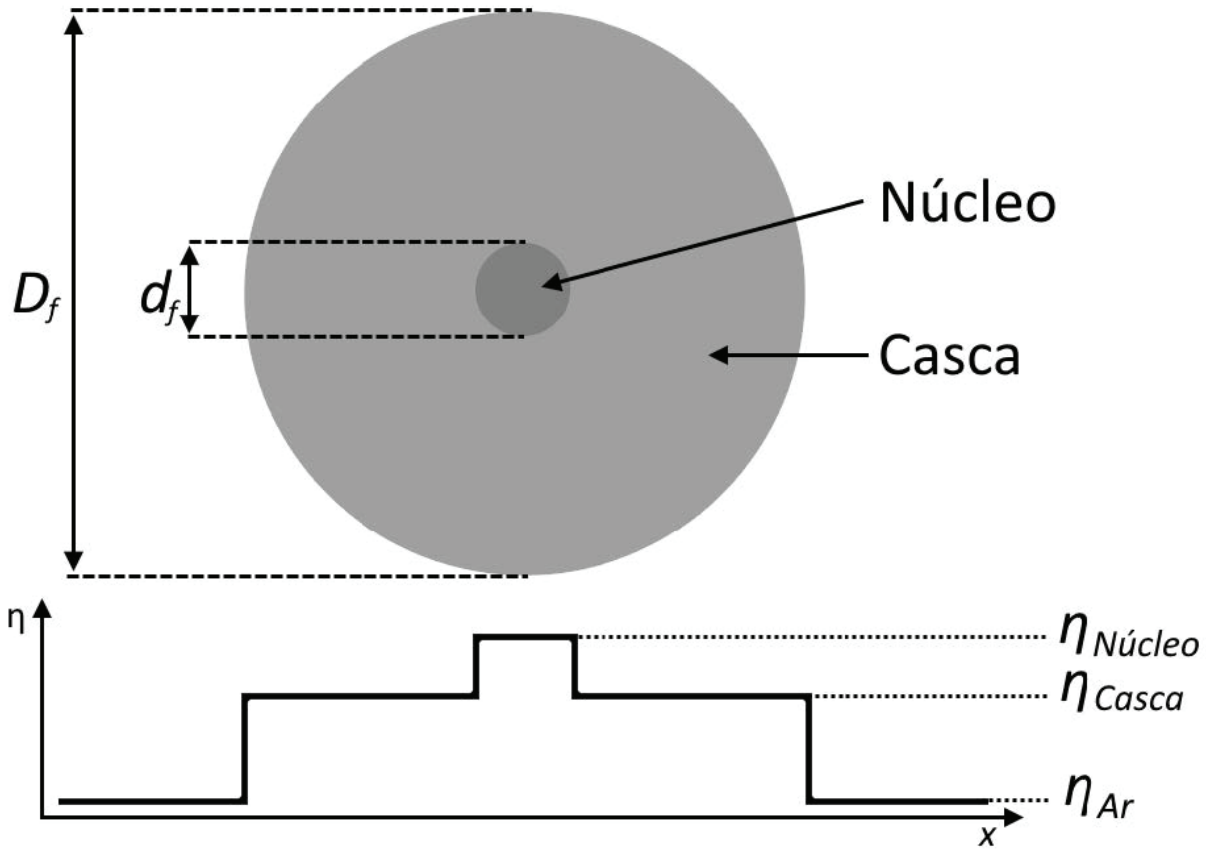

Figura 1 – Seção transversal de uma fibra monomodo exibindo os diâmetros do núcleo e externo e os índices de refração. Dimensões ilustrativas.(PIZZAIA, 2021)

Como ilustrado na **Figura 1**, o índice de refração do núcleo, é maior que o índice de refração da casca, o que faz com que a maioria da luz fique confinada no núcleo, devido ao fenômeno da reflexão interna total.

Os diâmetros d_f e D_f , podem variar bastante, dependendo da fibra que será utilizada, bem como os índices de refração, presença de elemento dopante e estrutura interna. Além das fibras ópticas de índice de refração em degrau, existem também as de multi-degrau, com mais de duas camadas concêntricas, e as graduais, em que se tem um gradiente do índice de refração ao longo do eixo radial (PIZZAIA, 2021).

A maioria das aplicações de fibra ótica se utiliza de fibras como as descritas na **Figura 1**, e são geralmente feitas de sílica, como é o caso, por exemplo, das fibras óticas usadas nos sistemas de telecomunicações. Entretanto, fibras óticas podem ter outros papéis a realizar que não apenas o de fazer o guiamento de ondas de um ponto a outro. Um desses casos é o uso de fibras óticas como elementos amplificadores, sendo que os mais famosos são as fibras dopadas com érbio, onde a fibra passa a ter uma função mais ativa do que passiva.

O processo de fabricação de uma fibra dopada consiste em se acrescentar pequenas quantidades de elementos (átomos ou íons) ao núcleo da fibra para se alterar algumas características que possibilitam o surgimento de efeitos lineares e não-lineares ao guia de onda. Existem diversos elementos com os quais é possível criar uma fibra dopada, sendo os íons de lantanídeos (terras-rara) os mais frequentes devido aos seus usos como amplificadores ópticos (AMIN; QURESHI; HOSSAIN, 2019).

Neste trabalho foi utilizada uma fibra dopada com íons de érbio Er^{3+}, vastamente empregada na área de telecomunicações como amplificador óptico devido à sua distribuição eletrônica, que permite a conversão de comprimentos de onda, em especial a absorção em 980 nm que permite a emissão na região de 1550 nm, região a qual é muito aplicada para transmissão em longas distâncias devido sua baixa atenuação pelas fibras padrões de telecomunicação.

O EDFA foi demonstrado pela primeira vez pelo professor David N. Payne e sua equipe na Universidade de Southampton (Reino Unido) em 1986 (MEARS et al., 1987). Com o amplicador foi possível amplificar de forma eficientemente luz na banda C e na banda L, onde as perdas das fibras ópticas de telecomunicações tornam-se mais baixas o que é essencial em comunicação ópticas. Para uma configuração típica de EDFA, um núcleo de uma fibra é dopado com um percentual de terras raras,neste caso érbio (Er^{3+}), alterando o índice de refração, que pode fornecer amplificação do laser via emissão estimulada quando é opticamente bombeado com outra luz na fibra (DESURVIRE; ZERVAS, 1995).

No caso mostrado na **Figura 2**, a fibra ativa é bombeada com luz de duas fontes. Para a fonte de bombeio, existem dois comprimentos de onda típicos para bombear um EDFA, 980 ou 1480 nm, devido à interação dos íons Er^{3+}. A luz para amplificação é mais frequentemente presente em comprimentos de onda em torno de 1550 nm.

Quando um EDFA é bombeado a 1480 nm, o íon dopante na fibra (Er^{3+}) absorve

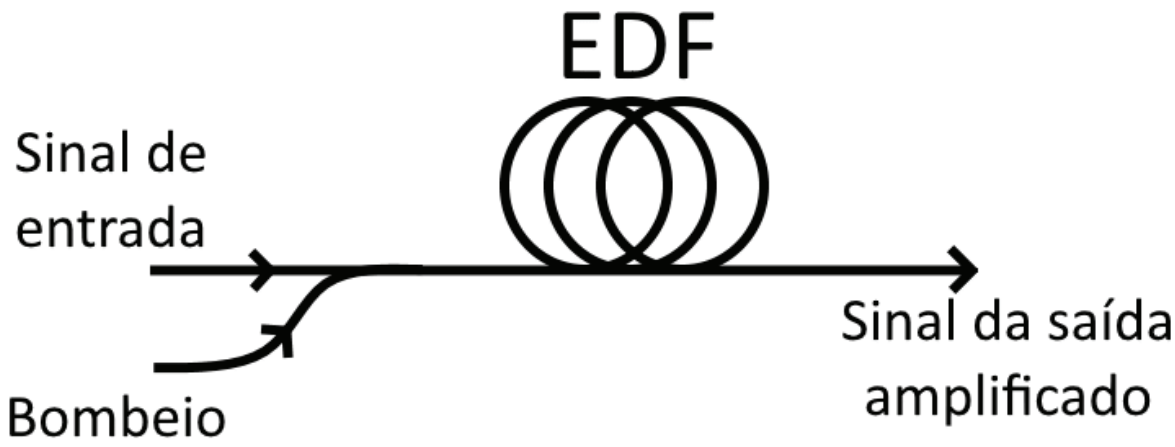

Figura 2 – Esquemático de um EDFA.

a luz do bombeio e é promovido para o estado excitado. Possuindo energia suficiente na fibra a maioria dos elétrons vai para o nível superior criando uma inversão populacional ocasionando a emissão estimulada, que emite fótons em torno de 1550 nm, o mesmo comprimento de onda do laser inicial. Os elétrons que decairam para o estado fundamental são excitados novamente e voltam ao estado excitado, este processo continua até que a potência de bombeio não seja mais capaz de interagir com os elétrons. A capacidade de amplificação está diretamente relacionada com as características da fibra dopada. o processo é o mesmo para 980 nm.

Obviamente, amplificadores não precisam necessariamente ser feitos em fibra ótica. No entanto, a vantagem que a fibra oferece sobre outros meios convencionais é o desacoplamento da relação entre o comprimento do meio de ganho e a incidencia de bombeio, já que se trata aqui de um guia de onda.

As fibras monomodo também garantem que a densidade de potência seja muito alta. Esse fator permite total operação de amplificadores e lasers e torna-se um diferencial quando comparado com outras técnicas de estado sólido, o que permite a geração de amplificadores de dezenas de dB's de alta eficiência.

Tais amplificadores à fibras dopada, como as fibras dopadas com érbio, permitem também a construção de lasers com as mais diversas aplicações, como em tratamentos cosméticos para acne e depilação, cirurgias para diagnóstico e terapia de câncer e lentes oculares e correção, além de usos industriais para corte e aquecimento de componentes e sistemas de comunicação para comunicações por fibra óptica, redes de comunicação submarina e comunicação espacial, radares e satélites (GONÇALVES, 2021; ROBERTS; DAY; O'BRART, 2020; RIVEIRO et al., 2019; TOYOSHIMA, 2020). Essas aplicações são empregadas em lasers, lasers dopados, lasers aleatórios, lasers de femtossegundos, lasers de fibra multi-comprimento de onda e muitas outras (GUO; SINGH, 2021).

Nesse trabalho, demonstramos que fibras dopadas com érbio também podem ter papéis não somente como em amplificadores. Dependendo de como sua dopagem é feita, pode-se aumentar um pouco as assimetrias geometricasda fibra o que aumenta também sua birrefringência e consequentemente sua sensibilidade a variações de temperatura. Neste trabalho, que gerou a publicação do artigo (PIZZAIA et al., 2022), usamos uma EDF de forma não convencional sem bombeio apenas como meio capaz de ter suas características alteradas em função da temperatura. Aqui a EDF foi usada como meio sensor, porém neste tipo de configuração ela pode ser facilmente usada para outras aplicações como na geração de filtros passa faixa e passa banda.

Com relação a diversidade de tipos e técnicas de sensoriamento, as técnicas interferométricas são particularmente interessantes, uma vez que permitem sensibilidades consideravelmente superiores àquelas que podem ser obtidas através do uso de grade de Bragg (PIZZAIA; LEAL-JUNIOR; CASTELLANI, 2022). Ademais, seu sistema de interrogação baseado na análise do espectro do sinal é regularmente mais estável e confiável quando comparado com sensores de potência (CHEN et al., 2020; VORATHIN; HAFIZI, 2020).

A título de exemplo, pode-se citar que a detecção de ondas gravitacionais, um evento de grande relevância para a Física, foi conseguido devido à alta sensibilidade das técnicas interferométricas. Em 14 de setembro de 2015, dois detectores do Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro a Laser (Ligo - do inglês Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)foram capazes de detectar simultaneamente um sinal de onda gravitacional transitória (STEINLECHNER et al., 2015).

O experimento gravitacional descrito utilizou como meio de propagação para as ondas gravitacionais tubos de vácuo de comprimentos quilométricos. Este documento, entretanto, focar-se-á em sensores que utilizam de fibra ótica como meio de propagação, com tamanhos de ordem bastante inferior, e consequentemente características óticas em diferentes ordens de grandeza. Apesar de não se tratar aqui de um sensor das proporções gigantescas (STEINLECHNER et al., 2015), o uso de fibra ótica como elemento sensor geralmente trás muitas vantagens como a possibilidade de construção em bancada de forma simples e compacta, e geralmente a baixos custos, mas mantendo altas sensibilidades (CASTELLANI et al., 2017).

O princípio de funcionamento de uma interrogação interferométrica em sensores construídos em fibra baseia-se, como o nome diz, na interferência de feixes luminosos que se propagam no interior da fibra ótica. O objetivo é fornecer à luz dois caminhos, sendo um com influência do meio externo e outro não. A exposição ao meio induz uma variação da velocidade de fase no raio que se propaga na casca, desta forma, na extremidade receptora do sinal luminoso, combinam-se os feixes que se propagam por caminhos distintos obtendo um sinal de interferência. Pode-se então analisar o comportamento do espectro gerado em

detrimento da influência do meio externo em um dos caminhos.

A aplicabilidade básica dessa análise espectral fundamenta-se no fato de que, na recuperação do sinal, ambos os feixes de luz, na casca e no núcleo, são combinados. Parte das frequências envolvidas são sobrepostas, ocasionando uma interferência construtiva, e parte anuladas, acarretando uma interferência destrutiva. Esta soma de amplitudes, cada uma em sua frequência, faz o espectro interferométrico do sinal recuperado ser constituído de picos e vales, como mostra a **Figura 3**a.

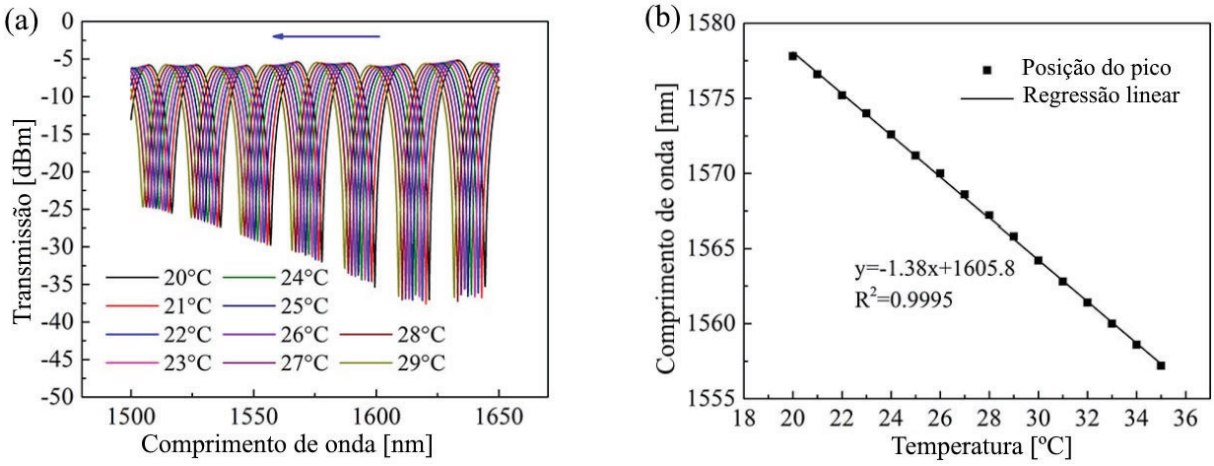

Figura 3 – (a) ocorrência de picos e vales espectrais devido ao fenômeno de interferência. (b) deslocamento aparente dos picos em função da temperatura. Adaptado de (LIU et al., 2019)

Também na **Figura 3**b é possível observar um exemplo de método utilizado para obter as informações espectrais do sensor, baseado no deslocamento de um pico espectral. Esta técnica envolve a análise da variação da posição do pico, dada em comprimento de onda, em relação a outra determinada grandeza. Neste caso, a medida que a temperatura aumenta, o mesmo pico espectral exibe um deslocamento aparente para esquerda (efeito conhecido como *blue-shift*).

A diversidade de configurações e de formas de interrogação presentes em pesquisas e no uso de sensores interferométricos os tornam ferramentas muito versáteis. Certamente interrogações mais complexas do que analisando o efeito de *blue-shift* em um espectro são possíveis, como já foi reportado em (SILVA et al., 2019; SILVA; SILVA; CASTELLANI, 2020). Entretanto, quando temos um sensor onde o deslocamento espectral se dá linearmente, interrogações como a descrita anteriormente analisando apenas a variação do comprimento de onda de um pico ou de um vale em função de algum parâmetro físico, é sempre preferível por questões de simplicidade. No nosso caso específico, por se tratar de um sensor de temperatura que se enquadra nessa categoria, e novamente por ser um método simples e com elevada precisão, a análise do *blue-shift* espectral foi o método de interrogação utilizado no presente trabalho.

3 Materiais e métodos

O interferômetro Sagnac consiste em dois feixes de luz em contrapropagação se propagando no mesmo caminho óptico, em um arranjo classificado como um interferômetro de caminho comum. Como ilustrado pela **Figura 4**, a luz transmitida entra no sistema através da entrada do circulador, e no acoplador óptico, ela se divide em dois feixes que se propagam no sentido horário e anti-horário. Depois disso, os feixes são recombinados no acoplador, e a luz refletida sai do sistema pela saída do circulador.

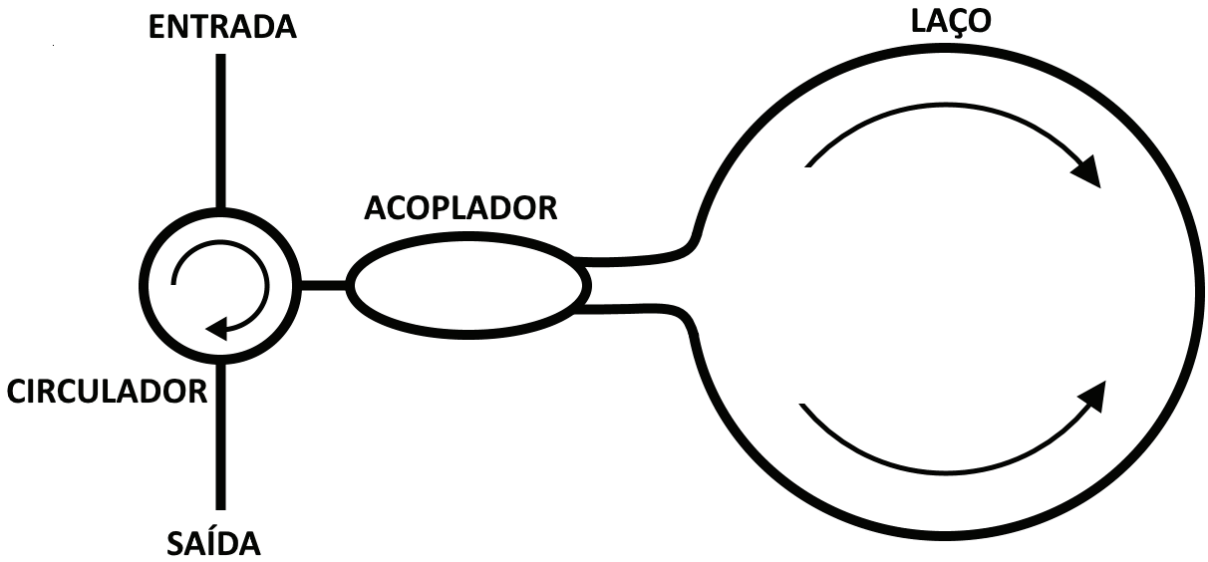

Figura 4 – Ilustração simplificada de um interferômetro de Sagnac.

Apesar de ser considerado um interferômetro de caminho único, a birrefringência da EDF não é nula, desta forma criando uma pequena diferença na velocidade de propagação da luz, dependendo de sua direção, formando assim um padrão de interferência entre os dois feixes de contrapropagação quando recombinados. O comprimento de onda da separação de pico, obtida por tal padrão de interferência, pode ser expresso pela Equação 3.1 (DOMÍNGUEZ-CRUZ et al., 2018),

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{B.L}. \tag{3.1}$$

Onde o espaçamento entre os picos ou vales ($\Delta\lambda$), depende da birrefringência (B), do comprimento da fibra (L) do valor do comprimento de onda (λ).

A montagem utilizada para a aquisição dos dados experimentais conta com um Analisador de espectro óptico (OSA, do inglês *Optical Spectrum Analyser*) Anritsu MS9740A. O analisador de espectro utilizado também conta com uma fonte de banda larga (BBS, do

inglês *Broad Brand Source*) como fonte de infravermelho próximo de 60 nm centrada em 1544 nm com uma potência média de 7,5 μW, como exibido na **Figura 5**.

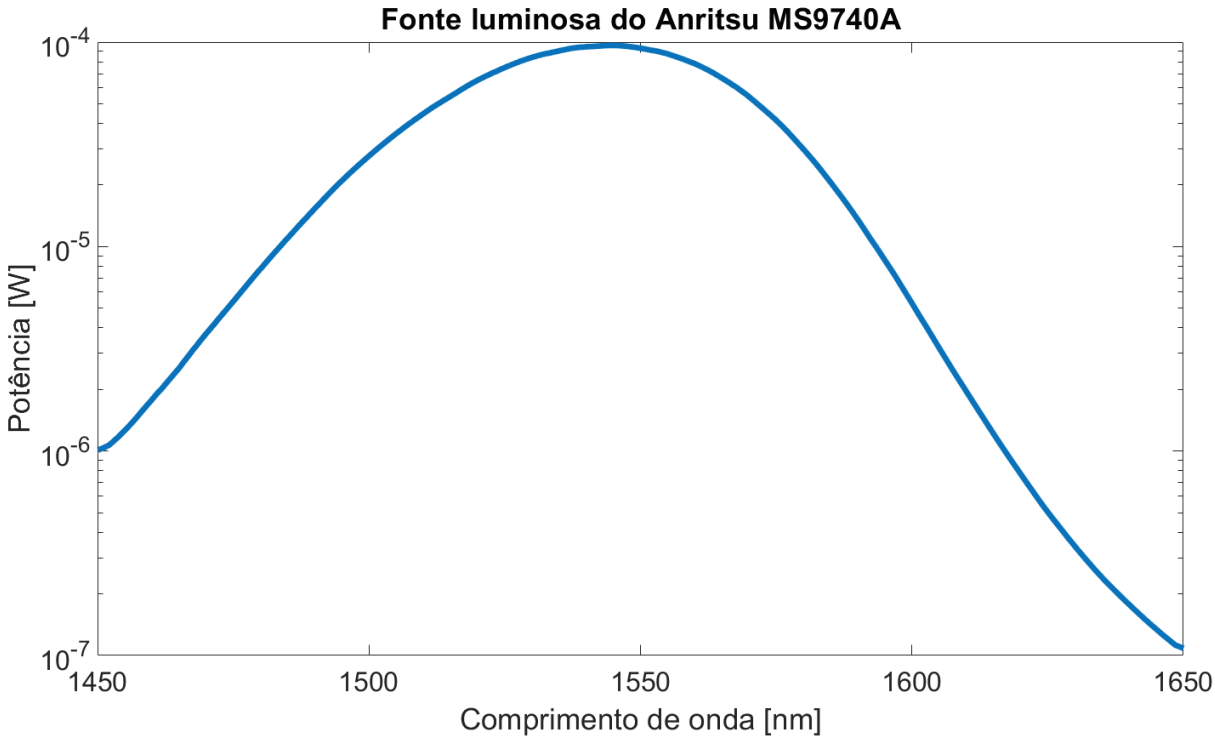

Figura 5 – Espectro da fonte de luz infravermelha do Anritsu MS9740A.

A parte óptica da montagem é composta por um circulador, um acoplador de 3 dB e um controlador de polarização localizado no laço do Sagnac. As conexões entre os elementos ópticos foram realizadas utilizando fibra monomodo padrão (SMF, do inglês *Single Mode Fiber*, como mostrado na **Figura 6**.

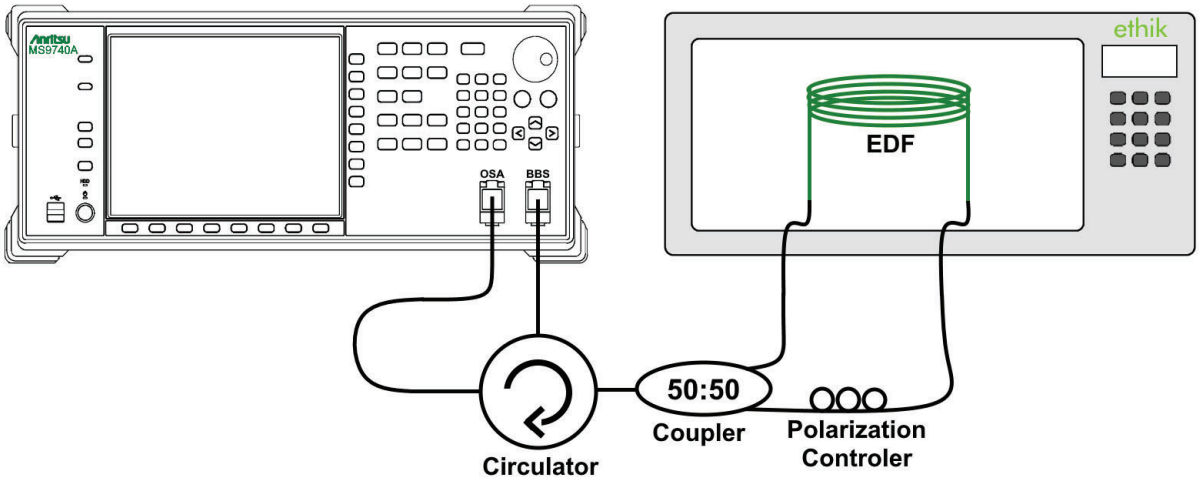

Figura 6 – Esquemático da montagem utilizada para aquisição de dados experimentais.

A fibra utilizada como elemento sensor foi a M5-980-125 da *Fiber Core* (bobina de 10 m) que foi colocada dentro de uma estufa elétrica da Ethik Technology, exibida na **Figura 7**.

Figura 7 – Estufa elétrica utilizada para variação da temperatura.

Como o valor de birrefringência não foi fornecido pelo fabricante, calculamos a partir da Equação 1 como aproximadamente $2{,}1\times10^{-5}$ a 25°C, menor que outras classificadas como "fibras de alta birrefringência" que possuem valores da ordem de 10^{-4} (FRAZÃO; BAPTISTA; SANTOS, 2007). No entanto, como os testes experimentais mostram, a birrefringência da EDF demonstrou ser alta o suficiente para produzir um padrão de interferência que varia com a temperatura com sensibilidade muito alta e boa linearidade.

Apesar de valores de birrefringência mais altos levarem a uma configuração mais sensível, isso também pode limitar a faixa operacional das leituras devido a sobreposições nas curvas de resposta espectral do sensor, logo, sempre haverá um compromisso entre precisão e alcance.

A escolha da faixa de espectro a ser analisada considerou a faixa de emissão da BBS, a região de absorção da EDF e a resolução necessária para identificar pequenas alterações de temperatura. Como a EDF é utilizada de forma passiva neste experimento, sem o uso de bombeio óptico, a faixa espectral selecionada para análise se encontra na sua região de baixa absorção – aproximadamente entre 1570 e 1625 nm. Esta ampla faixa de medição também permite a análise do comportamento de diversos vales, além de oferecer uma grande margem de excursão desses pontos de interesse a medida que ocorre o deslocamento

aparente do espectro (também conhecidos como *blue shift* e *red shift*)

A resolução de 0,1 nm foi escolhida visando medir um amplo intervalo espectral – cerca de 55 nm, e dada a sensibilidade do nosso sensor, foi suficiente para garantir uma resolução capaz de medir variações de 1°C. No entanto, caso seja necessário a medição de variações de temperatura ainda menores, a resolução espectral do OSA pode ser facilmente alterada diminuindo a largura de banda medida.

4 Resultados e discussão

A temperatura do forno foi monitorada e as medições foram feitas periodicamente, onde a temperatura foi aumentada para o valor desejado e estabilizada por 5 minutos, e então a resposta espectral foi adquirida. O sensor foi testado para 8 valores de temperatura diferentes na faixa de 25,6 a 38,9 °C, e o resultado da leitura do OSA pode ser visto na **Figura** 8.

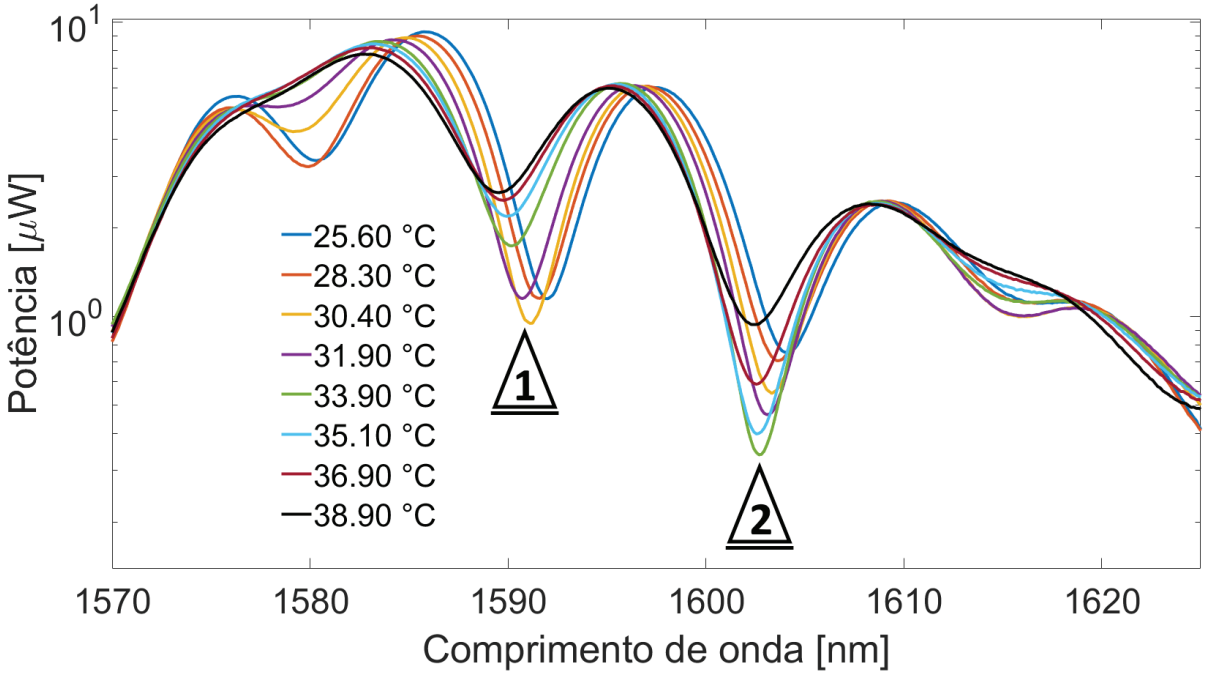

Figura 8 – Espectro transmitido para diferentes valores de temperatura.

Ao contrário de análises comuns de deslocamento de pico, os dados experimentais revelaram que o rastreamento do deslocamento do vale é mais confiável para este caso, pois eles são menos afetados pela mudança do formato da curva que ocorre à medida que a temperatura aumenta. As duas regiões de vale que foram observadas são indicadas na **Figura** 8 pelos marcadores 1 e 2. Essas regiões foram escolhidas porque apresentam claras depressões para todos os valores de temperatura testados, ao contrário das regiões em torno de 1580 nm e 1615 nm, nas quais as curvas foram achatadas para uma determinada faixa de temperatura, provavelmente devido a mudanças na absorção e birrefringência do érbio.

Os resultados experimentais não se assemelham perfeitamente com um formato senoidal como a Equação 1 teoriza para um caso ideal, uma vez que existem efeitos observados, como o achatamento da curva e a mudança de amplitude nos vales à medida que a temperatura varia. No entanto, isso pode ser atribuído devido tanto ao BBS quanto

à relação da curva de absorção da EDF com a temperatura (BOLSHTYANSKY; CONTI; WYSOCKI, 2000; YUCEL; ASLAN; BURUNKAYA, 2020).

Observa-se que as amplitudes dos vales também variam com as mudanças de temperatura, tal comportamento também está relacionado com a dependência que existe entre a curva de absorção da EDF e a temperatura. Para melhor analisar as regiões de interesse 1 e 2 destacadas anteriormente, uma figura ampliada é exibida para ambas na **Figura 9**.

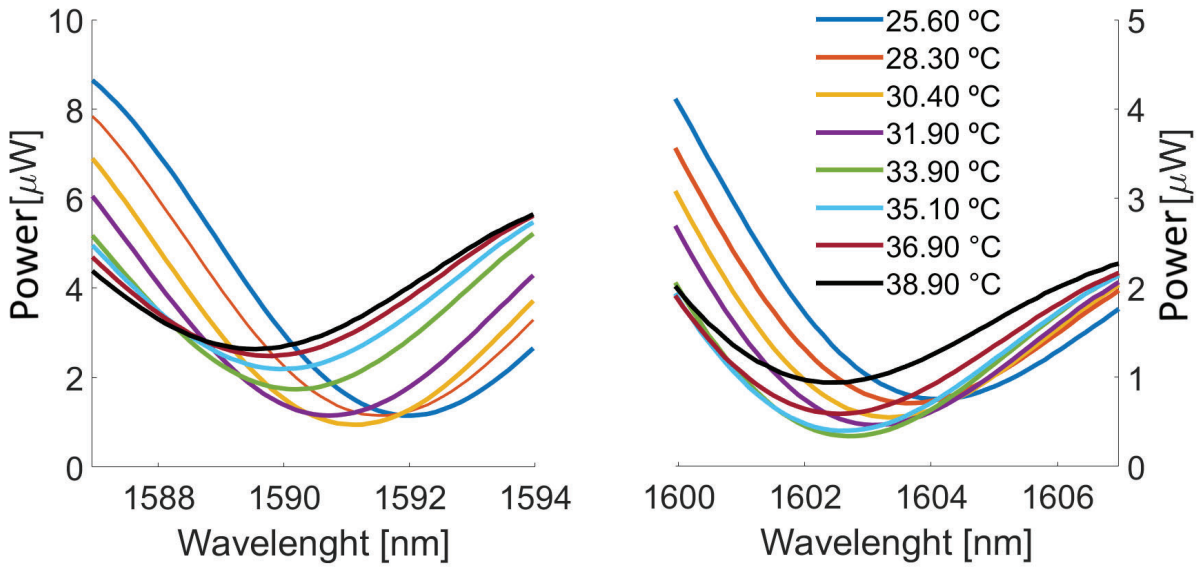

Figura 9 – Variação do espectro nas regiões de interesse 1 e 2.

Examinando a localização mínima dos vales de ambas as regiões, podemos observar uma correlação linear com a temperatura medida, conforme mostrado na **Figura 10**. A correlação para a regressão linear feita na **Figura 10** teve um coeficiente de determinação (R^2) de 0,967 para o primeiro vale e 0,980 para o segundo, mostrando que existe uma forte ligação entre a temperatura e o deslocamento do espectro, demonstrado pela mudança de localização do vale. Como a birrefringência da fibra está intimamente relacionada com as dimensões e a forma de sua seção transversal, consideramos que o deslocamento observado nos espectros se dão devido às modificações na birrefringência do guia de onda provocadas por mudanças na temperatura ambiente que induzem uma dilatação térmica na fibra.(PIZZAIA, 2021)

Assim, a sensibilidade linear do sensor foi calculada em -147 pm/°C e -214 pm/°C para o primeiro e segundo vale, respectivamente. Tais sensibilidades resultam em uma resolução de até 0,1402 °C ao usar o Anritsu MS9740A como analisador de espectro.

Para estimar a faixa de temperatura operacional do sensor proposto, é necessário usar a sensibilidade fornecida acima para calcular onde os vales podem se sobrepor. Haverá um limite imaginário entre as regiões 1 e 2 da **Figure 8** onde ambos os vales podem estar com temperaturas diferentes, pois isso pode ser causado por um vale deslocado para o azul

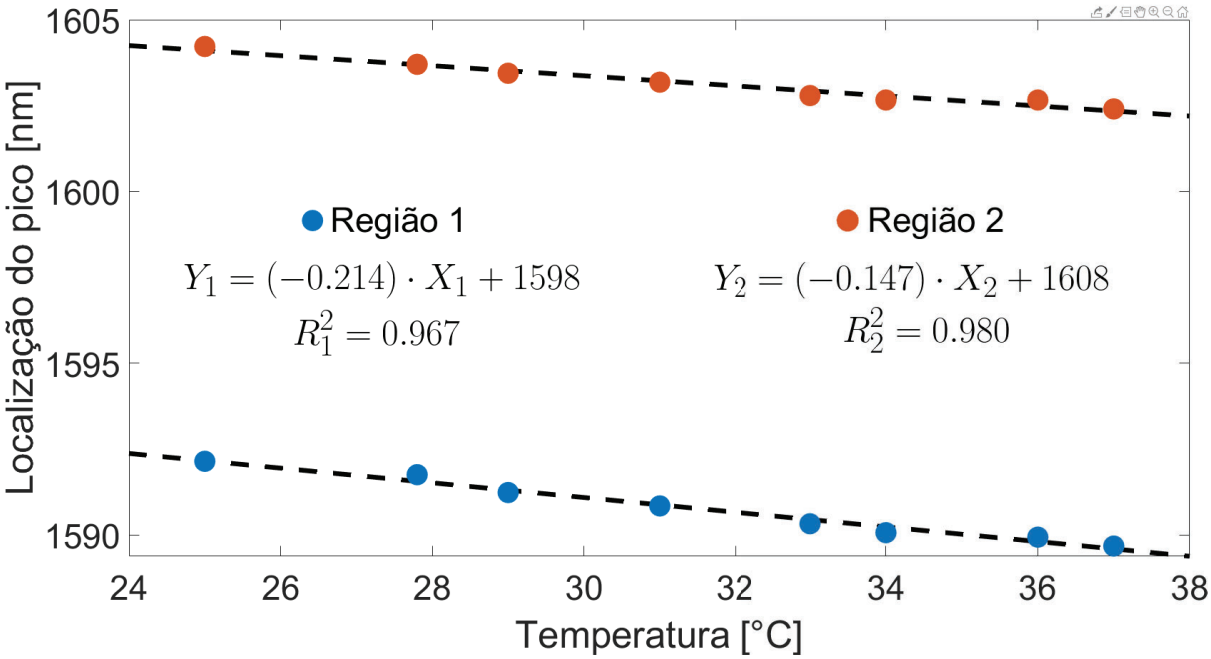

Figura 10 – Regressão linear para a localização dos vales em função da temperatura.

devido a um aumento de temperatura ou por um desvio para o vermelho devido a uma diminuição de temperatura. Portanto, é necessário descobrir qual temperatura pode levar os vales 1 e 2 a esse limite.

Sendo a localização do primeiro e segundo vale a 25,6 °C, L_1 e L_2, a sensibilidade do primeiro e segundo vale, S_1 e S_2, e a variação das temperaturas mínima e máxima (sendo a referência 25,6ºC) sendo T_{min} e T_{max}, respectivamente. Assumindo uma resposta linear, temos a Equação.

$$L_1 + S_1 \cdot (T_{min} - 25.6) = L_2 + S_2 \cdot (T_{max} - 25.6). \tag{4.1}$$

Reorganizando os termos para isolar as variáveis de temperatura, chegamos à Equação 3 e Equação 4, que resulta na Equação 5.

$$T_{max} = \frac{S_1 \cdot (T_{min} - 25.6) + L_1 - L_2}{S_2} + 25.6. \tag{4.2}$$

$$T_{min} = \frac{S_2 \cdot (T_{max} - 25.6) + L_2 - L_1}{S_1} + 25.6. \tag{4.3}$$

$$T_{max} = 1.4579 \cdot T_{min} + 70.65. \tag{4.4}$$

Podemos observar que pela Equação que os limites teóricos da faixa são dinâmicos e dependem da aplicação desejada. Por exemplo, supondo que uma variação linear possa ser mantida nessas regiões de temperatura mais amplas, as possíveis faixas utilizáveis

são de 0 a 70,65ºC e 20,13 a 100ºC. Tal característica torna este sensor adequado para múltiplas aplicações, sem alterar consideravelmente a configuração. Este resultado revela que o uso de uma EDF totalmente passivo dentro de um loop Sagnac pode ser uma solução interessante para sensoriamento de temperatura, apresentando altos níveis de sensibilidade e linearidade para um sensor que pode ser facilmente interrogado em uma ampla faixa de valores de temperatura.

5 Conclusão

Aqui demonstramos experimentalmente um interferômetro Sagnac construído usando 10 m de uma EDF para sensoriamento de temperatura que alcançou uma sensibilidade máxima de -214 pm/°C com alta linearidade e funcionando em uma faixa dinâmica de temperatura. Este resultado demonstra que o uso de uma EDF em modo totalmente passivo é adequado para sensoriamento de temperatura quando colocado dentro de um loop Sagnac com resposta óptica linear, tornando-o assim uma opção viável para aplicações de sensoriamento de temperatura na pesquisa acadêmica e na indústria.

É importante ressaltar, também, que esse valor de sensibilidade, apesar de não ser o maior já obtido com um interferômetro de Sagnac, é pelo menos 10 vezes maior do que os sensores de temperatura construídos com grades de Bragg, sendo de longe os mais comuns e usados na indústria e na academia. Temos aqui, obviamente, a questão do comprimento muito mais longo (10 m), mas cabe lembrar que estamos falando de um sensor em fibra que pode muito bem ser enrolado e portanto, ter uma estrutura final compacta, permitindo que esse seja usado em uma diversidade enorme de ambientes, seja para o sensoriamento de líquidos, gases ou apenas da temperatura ambiente.

Esse tipo de interferômetro também permite que a mesma configuração seja utilizada em diferentes aplicações sem a necessidade de grandes ajustes no modelo físico. Além disso, o comprimento do SMF conectando os dispositivos ópticos alteram apenas ligeiramente a magnitude do sinal recebido devido à atenuação. Como a forma da curva permanece a mesma, o elemento sensor da configuração (a EDF) pode ser colocada o mais longe da fonte e do analisador de espectro óptico conforme necessário, a princípio permitindo também uma multiplexação de diversos pontos, com o uso de diversas fibras, de modo que os picos obitidos não se sobreponham na mesma região espectral.

Trabalhos futuros incluem uma melhor compreensão e uso de outros efeitos relacionados à presença de íons terras-raras na fibra de sílica que podem ser combinados para detectar múltiplas variáveis simultaneamente. Já está em estudo o uso de uma fibra dopada com itérbio também de forma passiva para análise de viabilidade do seu uso em uma configuração similar para medição de temperatura. Outra possibilidade é usar configurações semelhantes como filtros ajustáveis que podem encontrar aplicações na ciência de laser. Uma última ideia é também testar a sensibilidade cruzada da temperatura com outras grandezas físicas como pressão e deformação.

Esse trabalho mais uma vez reforça a ideia de que interferômetros podem ser utilizados de forma simples e eficiente para medições de diversos parâmetros físicos e com altas sensibilidades. Além disso, demonstrando também que podem ser construídos com

facilidade a partir de elementos comuns existentes em laboratórios de ótica, a baixos custos e com muita facilidade.

Referências

AMIN, M. Z.; QURESHI, K. K.; HOSSAIN, M. M. Doping radius effects on an erbium-doped fiber amplifier. *Chinese Optics Letters*, Chinese Optical Society, v. 17, n. 1, p. 010602, 2019. Citado na página 13.

Aslam Mollah, M. et al. Highly sensitive photonic crystal fiber salinity sensor based on Sagnac interferometer. *Results in Physics*, Elsevier B.V., v. 16, p. 103022, mar 2020. ISSN 22113797. Citado na página 10.

AVELLAR, L. et al. Polymer optical fiber-based smart garment for impact identification and balance assessment. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, 2021. Citado na página 12.

BERROCAL, C. G.; FERNANDEZ, I.; REMPLING, R. Crack monitoring in reinforced concrete beams by distributed optical fiber sensors. *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, v. 17, n. 1, p. 124–139, 2021. Citado na página 12.

BOLSHTYANSKY, M.; CONTI, N.; WYSOCKI, P. Model of Temperature Dependence for Gain Shape of Erbium-Doped Fiber Amplifier. *Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, Issue 11, pp. 1533-*, IEEE, v. 18, n. 11, p. 1533–, nov 2000. Disponível em: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=jlt-18-11-1533>. Citado na página 22.

CASTELLANI, C. E. et al. Multi-parameter interferometric sensor based on a reduced diameter core axial offseted fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 29, n. 2, p. 239–242, 2016. Citado na página 10.

CASTELLANI, C. E. S. et al. Multi-parameter interferometric sensor based on a reduced diameter core axial offseted fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 29, n. 2, p. 239–242, 2017. Citado na página 15.

CHEN, J. et al. Monitoring of temperature and cure-induced strain gradient in laminated composite plate with FBG sensors. *Composite Structures*, Elsevier BV, v. 242, p. 112168, jun. 2020. Citado na página 15.

CUI, J. et al. Fabrication and characterization of nickel thin film as resistance temperature detector. *Vacuum*, Elsevier Ltd, v. 176, p. 109288, jun 2020. ISSN 0042207X. Citado na página 10.

CUI, S.; SUN, B.; SUN, X. A method for improving temperature measurement accuracy on an infrared thermometer for the ambient temperature field. *The Review of scientific instruments*, NLM (Medline), v. 91, n. 5, p. 054903, may 2020. ISSN 10897623. Disponível em: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5121214>. Citado na página 10.

DESURVIRE, E.; ZERVAS, M. N. Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications. *Physics Today*, v. 48, n. 2, p. 56, 1995. Citado na página 13.

DÍAZ, C. A. et al. Temperature cross-sensitivity optimization for mach-zehnder interferometers liquid level sensors. In: IEEE. *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.], 2019. p. 1–3. Citado na página 10.

DOMÍNGUEZ-CRUZ, R. et al. Temperature Sensor Based on an Asymmetric Two-Hole Fiber Using a Sagnac Interferometer. *Journal of Sensors*, Hindawi Limited, v. 2018, p. 1–6, 2018. ISSN 1687-725X. Citado na página 17.

EDNALDO, E. L.; SANTOS, T. L. Transient compensation for thermistor-based sensors in constant temperature configuration. *Sensors and Actuators, A: Physical*, Elsevier B.V., v. 305, p. 111920, apr 2020. ISSN 09244247. Citado na página 10.

El Shamy, R. S.; KHALIL, D.; SWILLAM, M. A. Mid Infrared Optical Gas Sensor Using Plasmonic Mach-Zehnder Interferometer. *Scientific Reports*, Nature Research, v. 10, n. 1, p. 1–9, dec 2020. ISSN 20452322. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57538-1>. Citado na página 10.

FENG, W. et al. Strain and temperature sensor based on fiber Bragg grating cascaded bi-tapered four-core fiber Mach-Zehnder interferometer. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing Ltd, v. 53, n. 46, p. 465104, nov 2020. ISSN 13616463. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aba974>. Citado na página 10.

FRAUENDIENER, J. Gravitational waves and the Sagnac effect. *Classical and Quantum Gravity*, Institute of Physics Publishing, v. 37, n. 5, p. 05LT01, feb 2020. ISSN 13616382. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ab574c>. Citado na página 10.

FRAZÃO, O.; BAPTISTA, J.; SANTOS, J. Recent Advances in High-Birefringence Fiber Loop Mirror Sensors. *Sensors*, MDPI AG, v. 7, n. 11, p. 2970–2983, nov 2007. ISSN 1424-8220. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/7/11/2970>. Citado na página 19.

GAO, S. et al. High-sensitive Mach-Zehnder interferometric temperature fiber-optic sensor based on core-offset splicing technique. *Optical Fiber Technology*, Academic Press Inc., v. 56, p. 102202, may 2020. ISSN 10685200. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

GONÇALVES, S. Properties and parameters for eff ective laser hair removal: A review. *Our Dermatology Online/Nasza Dermatologia Online*, v. 12, n. 4, 2021. Citado na página 14.

GUO, C.; SINGH, S. C. *Handbook of Laser Technology and Applications: Lasers Applications: Materials Processing and Spectroscopy (Volume Three)*. [S.l.]: CRC Press, 2021. v. 3. Citado na página 14.

KONG, L. X. et al. High-sensitivity and fast-response fiber-optic micro-thermometer based on a plano-concave Fabry-Pérot cavity filled with PDMS. *Sensors and Actuators, A: Physical*, Elsevier B.V., v. 281, p. 236–242, oct 2018. ISSN 09244247. Citado na página 10.

LIU, S. et al. Vernier effect of fiber interferometer based on cascaded panda polarization maintaining fiber. *Chinese Optics Letters*, Chinese Optical Society, v. 17, n. 8, p. 080601, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 16.

LIU, Y. et al. Highly sensitive temperature sensor based on sagnac interferometer using photonic crystal fiber with circular layout. *Sensors and Actuators, A: Physical*, Elsevier B.V., v. 314, p. 112236, oct 2020. ISSN 09244247. Citado na página 10.

MA, J. et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on encapsulated S-taper fiber Modal interferometer. *Optics and Laser Technology*, Elsevier Ltd, v. 139, p. 106933, jul 2021. ISSN 00303992. Citado na página 10.

MEARS, R. J. et al. Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm. *Electronics Letters*, v. 19, n. 23, p. 1026–1028, 1987. Citado na página 13.

MONFARED, Y. E. et al. Liquid-Filled Highly Asymmetric Photonic Crystal Fiber Sagnac Interferometer Temperature Sensor. *Photonics*, MDPI AG, v. 7, n. 2, p. 33, may 2020. ISSN 2304-6732. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-6732/7/2/33>. Citado na página 10.

OHARA, Y. et al. Vibration distribution measurement using downsampling phase-shifting interferometer. *Optical Engineering*, SPIE-Intl Soc Optical Eng, v. 59, n. 03, p. 1, mar 2020. ISSN 0091-3286. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-59/issue-3/034112/Vibration-distribution-measurement-using-downsampling-phase-shifting-interferometer/10.1117/1.OE.59.3.034112.full>. Citado na página 10.

PECORARO, V. et al. *The diagnostic accuracy of digital, infrared and mercury-in-glass thermometers in measuring body temperature: a systematic review and network meta-analysis*. [S.l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020. 1–13 p. Citado na página 10.

PIZZAIA, J. P. L. *Sensores em Fibra Óptica Baseados em Interferêmetros de Sagnac*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 10 2021. Citado 4 vezes nas páginas 7, 12, 13 e 22.

PIZZAIA, J. P. L.; LEAL-JUNIOR, A. G.; CASTELLANI, C. E. S. Highly sensitive temperature sensing based on a birrefringent fiber sagnac loop. *Optical Fiber Technology*, v. 72, p. 102949, 2022. ISSN 1068-5200. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520022001328>. Citado na página 15.

PIZZAIA, J. P. L. et al. Temperature sensor based on an erbium-doped fiber Sagnac interferometer. *Applied optics*, v. 61, n. 9, p. 2352–2356, 2022. Citado na página 15.

QI, K. et al. All-Fiber high temperature and refractive index sensor based on three microspheres array Michelson interferometer. *Optics and Laser Technology*, Elsevier Ltd, v. 129, p. 106300, sep 2020. ISSN 00303992. Citado na página 10.

RIVEIRO, A. et al. Laser cutting: A review on the influence of assist gas. *Materials*, MDPI, v. 12, n. 1, p. 157, 2019. Citado na página 14.

ROBERTS, H. W.; DAY, A. C.; O'BRART, D. P. Femtosecond laser–assisted cataract surgery: a review. *European journal of ophthalmology*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 30, n. 3, p. 417–429, 2020. Citado na página 14.

RONG, P. et al. Compensation optimization for a static Mars wind imaging Michelson interferometer. *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier Ltd, v. 142, p. 106589, jul 2021. ISSN 01438166. Citado na página 10.

ROSLI, E. B.; NOOR, U. M. Optical Fiber Thermometer Based on Fiber Bragg Gratings.

In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.]: Institute of Physics Publishing, 2018. v. 340, n. 1, p. 012020. ISSN 1757899X. Citado na página 10.

SCANDIAN, L. B.; SEGATTO, M. E.; CASTELLANI, C. E. Analytical analysis and experimental validation of a multi-parameter machzehnder fiber optic interferometric sensor. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletronica (SBMO), v. 17, n. 4, p. 528–538, dec 2018. ISSN 21791074. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742018v17i41540>. Citado na página 10.

SHIN, J. et al. Sensitive Wearable Temperature Sensor with Seamless Monolithic Integration. *Advanced Materials*, Wiley-VCH Verlag, v. 32, n. 2, p. 1905527, jan 2020. ISSN 0935-9648. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201905527>. Citado na página 10.

SILVA, L. C.; SILVA, R. L.; CASTELLANI, C. E. 2d denoising technique for the linearization of interferometric fiber sensors. *Applied Optics*, Optica Publishing Group, v. 59, n. 10, p. 3038–3042, 2020. Citado na página 10.

SILVA, L. C. B. et al. Optical spectral intensity-based interrogation technique for liquid-level interferometric fiber sensors. *Appl. Opt.*, Optica Publishing Group, v. 58, n. 35, p. 9712–9717, Dec 2019. Disponível em: <http://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-58-35-9712>. Citado na página 16.

SILVA, L. C. B.; SILVA, R. L.; CASTELLANI, C. E. S. 2d denoising technique for the linearization of interferometric fiber sensors. *Appl. Opt.*, Optica Publishing Group, v. 59, n. 10, p. 3038–3042, Apr 2020. Disponível em: <http://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-59-10-3038>. Citado na página 16.

STEINLECHNER, S. et al. Local-oscillator noise coupling in balanced homodyne readout for advanced gravitational wave detectors. *Physical Review D*, APS, v. 92, n. 7, p. 072009, 2015. Citado na página 15.

TANG, Y. L. et al. Temperature control circuit design of high-precision laser diode based on type III compensation network. In: *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.]: IOP Publishing Ltd, 2021. v. 1827, n. 1, p. 12003. ISSN 17426596. Citado na página 10.

TONG, R. jie et al. Large measurement range and high sensitivity temperature sensor with FBG cascaded Mach-Zehnder interferometer. *Optics and Laser Technology*, Elsevier Ltd, v. 125, p. 106034, may 2020. ISSN 00303992. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

TOYOSHIMA, M. Recent trends in space laser communications for small satellites and constellations. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 39, n. 3, p. 693–699, 2020. Citado na página 14.

VORATHIN, E.; HAFIZI, Z. Bandwidth modulation and centre wavelength shift of a single FBG for simultaneous water level and temperature sensing. *Measurement*, Elsevier BV, v. 163, p. 107955, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107955>. Citado na página 15.

WEBSTER, E. Base-metal thermocouple tolerances and their utility in real-world measurements. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, feb 2021. ISSN 0957-0233. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/abe6d0>. Citado na página 10.

XING, M. *Fabrication of single-crystal sapphire fibres for sensor applications*. Tese (Doutorado) — University of Glasgow, 2020. Citado na página 12.

XIONG, X. et al. Evaluation of the pitch deviation of a linear scale based on a self-calibration method with a Fizeau interferometer. *Measurement Science and Technology*, Institute of Physics Publishing, v. 31, n. 9, p. 094002, sep 2020. ISSN 13616501. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ab8b83>. Citado na página 10.

XU, L. et al. A highly sensitive and precise temperature sensor based on optoelectronic oscillator. *Optics Communications*, Elsevier B.V., v. 483, p. 126625, mar 2021. ISSN 00304018. Citado na página 10.

YU, H. et al. Fabry-Perot Interferometric High-Temperature Sensing Up to 1200 °C Based on a Silica Glass Photonic Crystal Fiber. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 1, p. 273, jan 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/1/273>. Citado na página 10.

YUCEL, M.; ASLAN, Z.; BURUNKAYA, M. Classification of the temperature-dependent gain of an erbium-doped fiber amplifier by using data mining methods. *Optik*, Elsevier GmbH, v. 208, p. 164515, apr 2020. ISSN 00304026. Citado na página 22.

ZHANG, X.; Mani Sarathy, S. A lumped kinetic model for high-temperature pyrolysis and combustion of 50 surrogate fuel components and their mixtures. *Fuel*, Elsevier Ltd, v. 286, p. 119361, feb 2021. ISSN 00162361. Citado na página 10.

ZHAO, Y. et al. Ultrasensitive temperature sensor with Vernier-effect improved fiber Michelson interferometer. *Optics Express*, The Optical Society, v. 29, n. 2, p. 1090, jan 2021. ISSN 1094-4087. Disponível em: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-29-2-1090>. Citado na página 10.