

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

João Paulo Lebarck Pizzaia

Sensores em Fibra Óptica Baseados em Interferômetros de Sagnac

Vitória

2021

João Paulo Lebarck Pizzaia

Sensores em Fibra Óptica Baseados em Interferômetros de Sagnac

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Espírito Santo

Centro Tecnológico

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Carlos Eduardo Schmidt Castellani

Coorientador: Arnaldo Gomes Leal Júnior

Vitória

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

L441s Lebarck Pizzaia, João Paulo, 1996-
 Sensores em Fibra Óptica Baseados em Interferômetros de
 Sagnac / João Paulo Lebarck Pizzaia. - 2021.
 76 f. : il.

 Orientador: Carlos Eduardo Schmidt Castellani.
 Coorientador: Arnaldo Gomes Leal Júnior.
 Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) -
 Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

 1. Fibras ópticas. 2. Óptica. I. Schmidt Castellani, Carlos
 Eduardo. II. Gomes Leal Júnior, Arnaldo. III. Universidade
 Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

João Paulo Lebarck Pizzaia

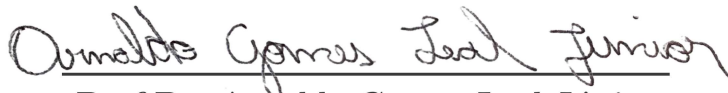
Sensores em Fibra Óptica Baseados em Interferômetros de Sagnac

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Trabalho aprovado. Vitória, 12 de novembro de 2021:



**Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt
Castellani**
Orientador



Prof.Dr. Arnaldo Gomes Leal Júnior
Coorientador



Prof.Dra. Maria José Pontes
Membro Interno



Dr. Carlos Alberto Ferreira Marques
Membro Externo

Vitória
2021

Aos meus avós.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, minha família e amigos pelo apoio incondicional que me deram durante toda minha vida, sem o qual não seria possível concluir esta etapa.

Desejo igualmente agradecer a todos os docentes e demais servidores da UFES que juntos lutam diariamente para aperfeiçoar o ensino e a pesquisa na universidade pública. Sou grato, em especial, aos meus orientadores, Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt Castellani e Prof. Dr. Arnaldo Gomes Leal Júnior, pela orientação, paciência e conhecimentos passados durante todo esse período.

Não posso deixar de agradecer também aos colegas do LabTel que estiveram sempre presentes me ajudando com os equipamentos, procedimentos e tirando dúvidas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Apesar de você, amanhã há de ser outro dia.

(Chico Buarque de Hollanda)

Resumo

A utilização de sensores ópticos construídos em fibra para monitoramento de grandezas físicas vem ganhando espaço na indústria, em especial para uso em áreas classificadas como potencialmente explosivas. Dentre os dispositivos empregados nesta função podemos destacar os interferômetros que são objeto de constante estudo na academia devido a sua alta precisão para medições em diversos campos como, por exemplo, temperatura, pressão, deslocamento, campos magnéticos, vibração, entre outros. Neste trabalho é apresentado, através de simulações numéricas e experimentação prática, modelos de montagens de sistemas de medição utilizando como base um interferômetro de Sagnac em fibra para o sensoriamento de vazão e temperatura, com o objetivo de discutir os resultados e a teoria que embasa o funcionamento destes. Os resultados encontrados evidenciam sensibilidades de $2,59 \times 10^{-1} \text{ mW/ms}^{-1}$ para a montagem proposta para medição de vazão utilizando-se do efeito conhecido como “arrasto de Fresnel” para uma tubulação de 10 cm de diâmetro interno, e de até $-1,62 \text{ nm/}^{\circ}\text{C}$ e $214 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$ para os sensores de temperatura utilizando, respectivamente, segmentos de Fibras Mantenedoras de Polarização (PMF) e Fibras Dopadas com Érbio (EDF) como elementos sensores. Tais dispositivos se mostraram eficazes, devido suas altas sensibilidades, resolução, linearidade e faixa de operação, portanto, podem ser uma opção viável para uso laboratorial e industrial, em especial para ambientes com a possibilidade de formação de atmosfera explosiva.

Palavras-chave: Sensor em fibra, Sagnac, Vazão, Temperatura

Abstract

The use of all-in-fiber optical sensors to monitor physical quantities has been gaining ground in the industry, especially for use in areas classified as potentially explosive. Among the devices used in this function we can highlight the interferometers that are the object of constant research due to their high accuracy for measurements in various fields such as temperature, pressure, displacement, magnetic fields, vibration, among others. This work presents, through numerical simulations and experimentation, setups for measurement systems using the in-fiber Sagnac interferometer model for flow and temperature sensing, in order to discuss the results and the theory behind the operational principle of them. The results found show sensitivities of $2.59 \times 10^{-1} mW/ms^{-1}$ for the proposed setup for flow measurement using the effect known as "Fresnel drag" for a pipeline measuring 10 cm of internal diameter, and up to -1.62 nm /°C and 214pm/°C for temperature sensors using, respectively, Polarization Maintaining Fiber (PMF) and Erbium Doped Fiber (EDF) segments as sensing elements. Such devices proved to be effective, due to their high sensitivities, resolution, linearity and operating range, therefore, they can be a viable option for laboratory and industrial use, especially for environments with the possibility of formation of an explosive atmosphere.

Keywords: Fiber sensor, Sagnac, Flow, Temperature

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de medição não linear (linha contínua) em relação à sua aproximação linear (linha tracejada) em um gráfico de Estímulo <i>vs</i> Medição.	29
Figura 2 – Seção transversão de uma fibra monomodo exibindo os diâmetros do núcleo (d_f) e externo (D_f) e os índices de refração (η). Dimensões ilustrativas.	30
Figura 3 – Esquemático dos três perfis mais comuns para PMF: Panda, Elíptica e Gravata borboleta (conhecida como <i>bow-tie</i> em inglês)	31
Figura 4 – Diagrama de uma montagem de um interferômetro de Sagnac em fibra.	32
Figura 5 – Relação entre a diferença de fase (Θ) com a Amplitude do sinal recombinado (A) e sua derivada ($\delta A/\delta \Theta$).	37
Figura 6 – Diagrama de montagem do sensor óptico de vazão proposto, em que parte do laço do interferômetro se encontra em espaço aberto, passando por dentro da tubulação.	39
Figura 7 – Interferência da variação do diâmetro da tubulação na sensibilidade do sistema.	41
Figura 8 – Interferência da variação da inclinação entre o feixe de luz e a parede da tubulação na sensibilidade do sistema.	42
Figura 9 – Interferência do comprimento de onda da fonte luminosa na sensibilidade do sistema.	43
Figura 10 – Interferência da adição de atraso de fase na sensibilidade do sistema.	44
Figura 11 – Montagem do interferômetro de Sagnac para medição de temperatura utilizando uma PMF tipo PANDA como elemento sensor.	48
Figura 12 – Comparação entre os resultados experimentais e simulados para as respostas espectrais (a) e frequências espaciais (b).	50
Figura 13 – Visualização do deslocamento do padrão de interferência para degraus de 0.1°C entre 1540 e 1550 nm.	51
Figura 14 – Localização dos picos em função da temperatura para a faixa de temperatura entre 25 e 30°C	52
Figura 15 – Erro de rastreo de pico para grandes intervalos de medição.	53
Figura 16 – Localização dos picos em função da temperatura para a faixa de temperatura entre 18 e 21°C	54
Figura 17 – Montagem do interferômetro de Sagnac para medição de temperatura utilizando uma EDF como elemento sensor.	58
Figura 18 – Espectro refletido das observações realizadas utilizando uma EDF como elemento sensor para medições de temperatura.	58

Figura 19 – Espectro refletido das observações realizadas utilizando uma EDF como elemento sensor para medições de temperatura.	59
Figura 20 – Variação da localização dos vales das regiões 1 e 2 em função da temperatura.	60

Lista de abreviaturas e siglas

EDF	<i>Erbium Doped Fiber</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FPI	<i>Fabry-Perot Interferometer</i>
HiBi	<i>High Birefringence</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyser</i>
PMF	<i>Polarization Maintaining Fiber</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

Lista de símbolos

A	Amplitude do sinal
Att	Atenuação total
B	Birrefringência
c	Velocidade da luz no vácuo
C	Celsius
D	diâmetro interno da tubulação
D_f	Diâmetro do externo da fibra
d_f	Diâmetro do núcleo da fibra
E	Exatidão absoluta
$E_{A\%}$	Exatidão em porcentagem sobre a amplitude
$E_{R\%}$	Exatidão em porcentagem sobre o valor real
Er^{3+}	Íond de Érbio 3+
L	Componente paralela ao fluxo do caminho óptico percorrido
L_1	Limite imaginário 1
L_2	Limite imaginário 2
L_{PMF}	Comprimento da fibra mantenedora de polarização
L_{Hibi}	Comprimento da fibra de alta birrefringência
m	Metro
M	Grandeza medida
R^2	Coefficiente de determinação
s	Segundo
S	Sensibilidade
S_1	Sensibilidade 1

S_2	Sensibilidade 2
Src	Fonte luminosa
T	Espectro transmitido
T_{att}	Espectro transmitido atenuado
T_{max}	Temperatura máxima
T_{min}	Temperatura mínima
u	Velocidade da luz no meio
u_+	Velocidade da luz no sentido de deslocamento do meio
u_-	Velocidade da luz no sentido oposto ao deslocamento do meio
W	Watts
β	ângulo entre a parede da tubulação e o feixe luminoso
η	Índice de refração
η_{Ar}	Índice de refração do ar
η_{Casca}	Índice de refração da casca
$\eta_{Núcleo}$	Índice de refração do núcleo
η_+	Índice de refração do eixo rápido
η_-	Índice de refração do eixo lento
Θ	Diferença de fase
λ	Comprimento de onda
Φ	Defasagem base
Ψ	Defasagem total

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Trabalhos desenvolvidos	24
1.2	Objetivos do trabalho	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Terminologias metrológicas	27
2.2	Fibra óptica	29
2.2.1	Fibras mantenedoras de polarização	30
2.2.2	Fibras dopadas com Érbio.	31
2.3	Interferometria óptica	32
2.3.1	Interferômetro de Sagnac	32
3	INTERFERÔMETRO DE SAGNAC COMO SENSOR DE VAZÃO.	35
3.1	Modelagem matemática	35
3.2	Resultados e discussão	39
3.2.1	Diâmetro interno da tubulação (D)	40
3.2.2	Inclinação entre o feixe de luz e a parede da tubulação (β)	41
3.2.3	Comprimento de onda (λ)	42
3.2.4	Atraso de fase base (Φ)	43
3.3	Considerações finais	44
4	INTERFERÔMETRO DE SAGNAC COMO SENSOR DE TEMPERATURA UTILIZANDO UMA PMF	47
4.1	Montagem do interferômetro	48
4.2	Resultados e discussão	49
4.2.1	Simulação	49
4.2.2	Experimento	51
4.3	Considerações finais	54
5	INTERFERÔMETRO DE SAGNAC COMO SENSOR DE TEMPERATURA UTILIZANDO UMA EDF	57
5.1	Montagem do interferômetro.	57
5.2	Resultados e discussão	57
5.3	Considerações finais	61
6	CONCLUSÃO	63

REFERÊNCIAS	65
------------------------------	-----------

1 Introdução

O sensoriamento de grandezas físicas está presente em nosso cotidiano, seja em aplicações domésticas, industriais, laboratoriais, hospitalares, logísticas, veiculares, entre outras. Sensores capazes de prover dados confiáveis e precisos são essenciais para a leitura das grandezas em questão, seja para um simples monitoramento, registro histórico ou para um sistema de controle de processo (TEH; KEMPA-LIEHR; WANG, 2020; TORO; AKHTAR, 2021), com isso é possível viabilizar a automação de determinadas tarefas, aumentar produção, eficiência e conforto, reduzir custos, impactos ambientais e risco de acidentes (INGRAO et al., 2021; OH; HABERL; BALTAZAR, 2020; ASADZADEH et al., 2020).

Com o advento da indústria 4.0, que tem como um de seus fundamentos a eficiência através da intensa automatização dos processos, a necessidade do uso de sensores ao longo da cadeia produtiva se faz ainda mais presente (BAI et al., 2020a). Devido à quantidade grandezas físicas e a pluralidade aplicações, é importante poder contar com uma grande diversidade de dispositivos sensores, pois cada um possui características próprias de operação, como, por exemplo, custo de implementação e manutenção, robustez, vida útil, precisão, limites operacionais e classificações de segurança.

Devido à necessidade de atender as mais diversas aplicações, a busca por novas técnicas de medição e com diferentes materiais na construção dos sensores é constante, sendo os sensores em fibra um dos campos de pesquisa em desenvolvimento (ZHANG et al., 2017; LI et al., 2018; ZOU et al., 2017; NAZEMI et al., 2019; NAG; MITRA; MUKHOPADHYAY, 2018; BAO et al., 2019; BUDINSKI; DONLAGIC, 2017). Sensores ópticos em fibra são leves, de tamanho reduzido, não são bons condutores de eletricidade, inertes a ação de campos eletromagnéticos externos (PEVEC; DONLAGIĆ, 2019), e por esses motivos começaram a ganhar espaço nas indústrias de óleo e gás, locais em que se tem grande presença de áreas classificadas como potencialmente explosivas (BALDWIN, 2018; ZHOU; YU; PENG, 2019).

Apesar de suas vantagens, sensores ópticos em fibra são mais frágeis e, em geral, demandam métodos de interrogação mais caros e complexos quando comparados aos métodos clássicos de mediação, por conta disso, ainda se fazem necessários os estudos para redução de custos, consolidação da tecnologia e melhoria na robustez (RAJAN, 2015; FERREIRA et al., 2017).

Outro grupo dos dispositivos ópticos que podem ser utilizados como sensores são os chamados interferômetros, que se utilizam do fenômeno da interferência eletromagnética da luz que por eles circula para captar informação sobre o meio através das modificações

sofridas em sua resposta espectral. Os interferômetros podem ser classificados como de espaço livre, em que a luz utilizada no processo interferométrico não está confinada a um guia de onda, e os construídos em guias de onda como, por exemplo, as fibras ópticas. Os tipos mais amplamente utilizados de interferômetros são conhecidos como Mach-Zehnder, Michelson, Fizeau, Twyman–Green e Sagnac (SHAMY; KHALIL; SWILLAM, 2020; RONG et al., 2021; XIONG et al., 2020; OHARA et al., 2020; MOLLAH et al., 2020b; KOTB et al., 2020; JIANG et al., 2021).

Diferentemente dos outros citados, os interferômetros de Sagnac utilizam o mesmo caminho óptico para ambos os seus feixes que se propagam em direções opostas, sendo a única diferença os parâmetros não homogêneos ao longo da fibra, consequentemente, permitindo que pequenos distúrbios ou modificações em seu caminho óptico sejam detectados com facilidade, o que, em geral, leva a medições bastante sensíveis (LIU et al., 2020).

A motivação para a realização deste trabalho está na necessidade do estudo e desenvolvimento de sensores ópticos em fibra por parte da comunidade científica, para se poder viabilizar tais dispositivos para uso industrial, em especial para áreas classificadas como potencialmente explosivas. Alguns sensores ópticos de espaço livre (ou seja, fora de um guia de onda) já são utilizados na indústria, eles aparecem constantemente na forma de sensores de posicionamento e de iluminação. Para algumas indústrias em específico, podemos também notar a presença de espectrômetros como instrumentos analíticos para caracterização de amostras. No entanto, a medição das chamadas variáveis clássicas da indústria ainda são feitas, em sua grande maioria, por dispositivos elétricos, e não ópticos (NORTHROP, 2018; DUNN, 2018).

Após esta breve introdução ao tema e exibição dos trabalhos desenvolvidos, O Capítulo 2 trará a fundamentação teórica sobre os temas abordados. A parte de desenvolvimento foi dividida em 3 capítulos, cada um apresentando os trabalhos desenvolvidos separadamente, para melhor elucidação. O Capítulo 3 abordará proposição de uma aplicação do interferômetro de Sagnac como sensor de vazão, o seguinte Capítulo 4 discorre sobre o experimento realizado utilizando uma PMF como elemento sensor em um interferômetro de Sagnac, e por fim, o Capítulo 5 apresenta novamente um interferômetro de Sagnac para medição de temperatura, porém utilizando uma EDF (do inglês *Erbium Doped Fiber*) como elemento sensor. Em seguida são expostos os trabalhos futuros e as conclusões do trabalho no Capítulo 6.

1.1 Trabalhos desenvolvidos

Juntamente com os professores Carlos Eduardo Schmidt Castellani e Arnaldo Gomes Leal Júnior, foi iniciada em 2019 simulações e análises de resultados numéricos para um sensor de vazão baseado em um interferômetro de Sagnac em fibra óptica. A

montagem proposta e seus resultados foram publicados em um congresso nacional em 2020 (PIZZAIA; CASTELLANI; LEAL-JUNIOR, 2020).

Em 2021, em colaboração com o aluno de graduação Rodolpho Ladislau Silva e os professores Carlos Eduardo Schmidt Castellani e Arnaldo Gomes Leal Júnior, foram realizados testes em relação à viabilidade da utilização de uma EDF como elemento sensor de um interferômetro de Sagnac em fibra. O experimento e seus resultados deram origem a um trabalho enviado a uma revista internacional e está em processo de revisão.

Também em 2021, em conjunto com os professores Carlos Eduardo Schmidt Castellani e Arnaldo Gomes Leal Júnior, foi realizada a montagem, aquisição de dados e a análise de resultados de um interferômetro de Sagnac com uma PMF (PMF, do inglês *Polarization Maintaining Fiber*) dentro de seu laço operando como um sensor de temperatura óptico em fibra. Os resultados do experimento e suas conclusões resultaram na elaboração de um artigo científico que foi submetido a uma revista internacional e está em fase de revisão.

1.2 Objetivos do trabalho

Esta dissertação tem como objetivo apresentar os resultados de simulações e experimentações práticas obtidos, de modo a caracterizar e discutir a viabilidade de interferômetros de Sagnac em fibra ópticas como sensores para vazão e temperatura em diferentes aplicações, tendo em vista suas sensibilidades, alcance operacional e características de implementação. Com este objetivo foram desenvolvidos, na prática, dois sensores para medição de temperatura com respostas altamente lineares e com sensibilidades de $-1,62 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ e $-214 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, além de uma proposta de montagem para um sistema de medição de vazão desenvolvido através de simulação computacional, que demonstrou uma sensibilidade de $259 \text{ } \mu\text{W}/\text{ms}^{-1}$. para os parâmetros definidos, porém podendo alcançar valores muito superiores a depender de sua configuração física, como discutido posteriormente.

2 Fundamentação teórica

2.1 Terminologias metrológicas

O INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), através da Portaria INMETRO Nº 319 de 23 de outubro de 2009, define a uniformização de terminologias metrológicas no país. Para melhor entendimento do trabalho, análise e discussão dos resultados, serão expostas algumas dessas definições a seguir ([INMETRO, 2009](#)).

Os sensores são elementos de um sistema de medição capazes de detectar a variação da grandeza física de forma que a sua resposta é proporcional a amplitude de tal variável medida. Exemplos de sensores incluem: tubos de Bourdon, termômetros de mercúrio, boia de nível, entre outros.

Quando o elemento consegue detectar certa alteração no meio, porém não a quantifica, este é chamado detector. Detectores de fumaça, de fuga de halogênio, de contato, entre outros.

São conhecidos como transdutores de medição os dispositivos capazes de gerar uma saída, geralmente elétrica (corrente ou tensão), que tem relação proporcional com grandeza de entrada. São classificados como tais os eletrodos de pH, extensômetros, termopares, entre outros.

As medidas utilizadas na caracterização dos sensores são essenciais para a escolha dos dispositivos que serão utilizados no projeto, além de desempenharem uma base de mensuração de desempenho entre os instrumentos de medição. Também descritas pelo INMETRO, serão apresentadas algumas dessas que se fazem presentes no trabalho.

O intervalo de medição, também conhecido como faixa de medição ou faixa de operação é o intervalo contínuo para qual o sistema de medição é capaz de realizar as medições de uma determinada grandeza, dadas as condições específicas para tal. A diferença entre os valores máximo e mínimo do intervalo de medição é conhecido como amplitude de medição.

O grau de concordância entre o valor medido pelo instrumento e o valor real da variável é conhecido como exatidão, ou seja, é a confiabilidade do sensor para realizar determinada medida. O erro exatidão de um instrumento pode ser representada em forma absoluta (E), em porcentagem sobre o valor real ($E_{R\%}$) e porcentagem sobre o alcance ($E_{A\%}$),

como visto na equação 2.1, equação 2.2 e Equação 2.3, respectivamente.

$$E = \text{Valor medido} - \text{Valor real} \quad (2.1)$$

$$E_{R\%} = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor real}}{\text{Valor real}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$E_{A\%} = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor real}}{\text{Alcance}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Portanto, para se viabilizar uma comparação entre exatidões de diferentes instrumentos, é necessário se saber de qual categoria de exatidão está em questão. Também é importante ressaltar que a determinação da exatidão de um sistema de medição é necessária a comparação com um padrão de referência que esteja calibrado e que possua um grau de exatidão superior ao examinado.

A menor variação de medição capaz de gerar uma variação perceptível na indicação de medição é conhecida como resolução, o seja, quanto maior a resolução, menor são as variações que o instrumento é capaz de perceber.

A sensibilidade de um sistema de medição é determinada pelo quociente entre a variação da grandeza medida e a variação no estímulo (variável que se deseja mensurar). A Equação 2.4 exibe como é feito o cálculo de sensibilidade para um sensor de resposta linear.

$$S = \frac{\delta M}{\delta E} \quad (2.4)$$

Portanto, para o caso de uma resposta linear, a sensibilidade (S) de um instrumento é diretamente proporcional à variação da grandeza medida (M) e inversamente proporcional à variação no estímulo (E). É desejável que para a faixa de operação a resposta instrumento seja linear, ou seja, que (S) seja um valor constante, não dependa do valor da grandeza a ser medida (CNI; IEL; ELETROBRÁS, 2008). No entanto, não linearidades podem ocorrer devido o processo de medição e o gráfico da relação $\delta M/\delta E$ tem o formato de uma curva, como visto na Figura 1.

Para estes casos em que a curva de medição não possui uma inclinação constante, e por consequência, uma sensibilidade dependente do valor atual da variável a ser medida, a Equação 2.4 não se faz mais verdadeira. Nestes casos pode-se reduzir o alcance do sensor, restringindo para uma região mais próxima do ponto de interesse, e com isso aumentando a linearidade, outra opção é utilizar uma etapa de pré-processamento do sinal para sua linearização (PHADNIS, 2020; HAN et al., 2021a).

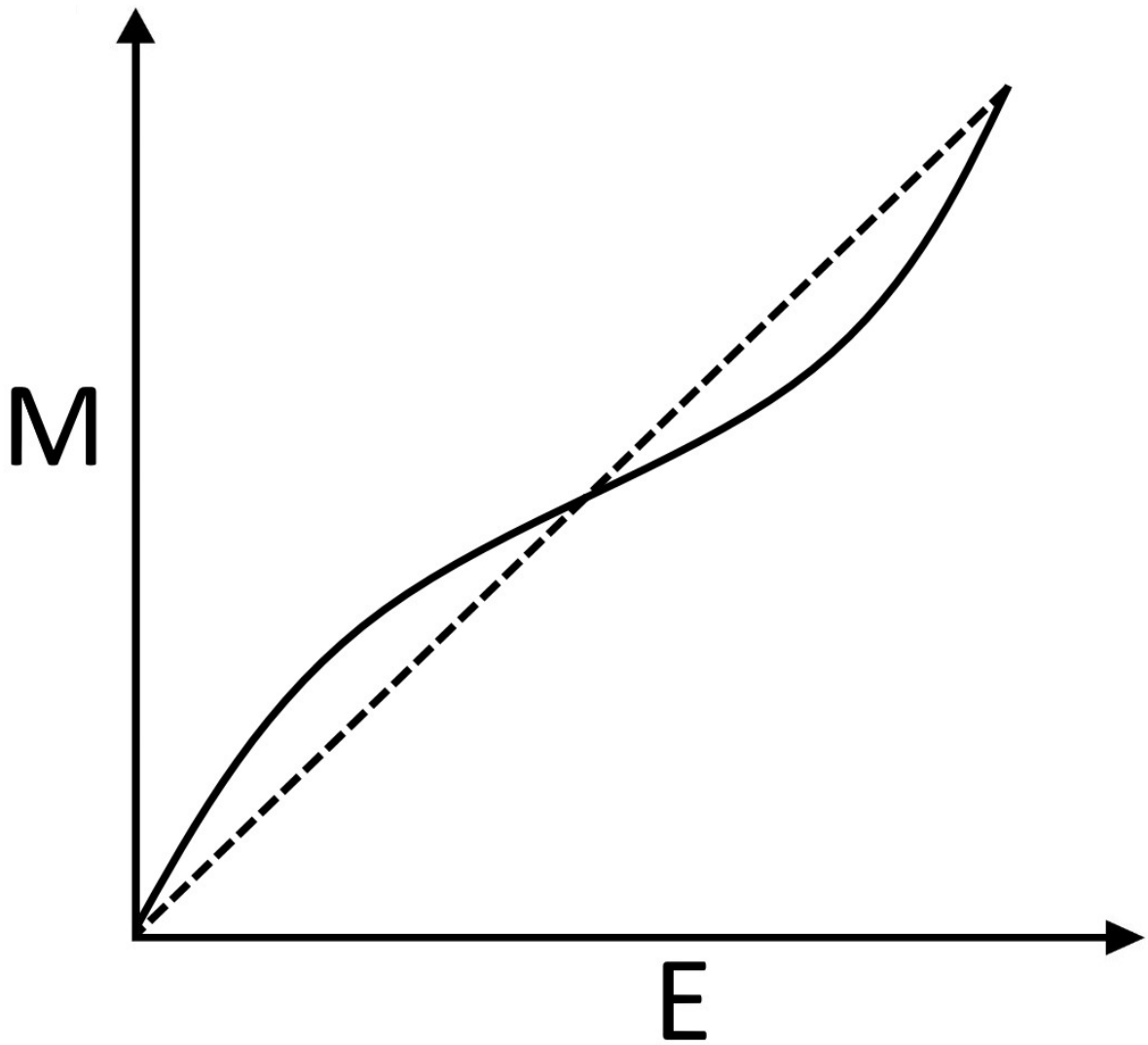


Figura 1 – Exemplo de medição não linear (linha contínua) em relação à sua aproximação linear (linha tracejada) em um gráfico de Estímulo *vs* Medição.

2.2 Fibra óptica

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; AMERICA', 2009). 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 2 porém por ser um material muito frágil, 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).

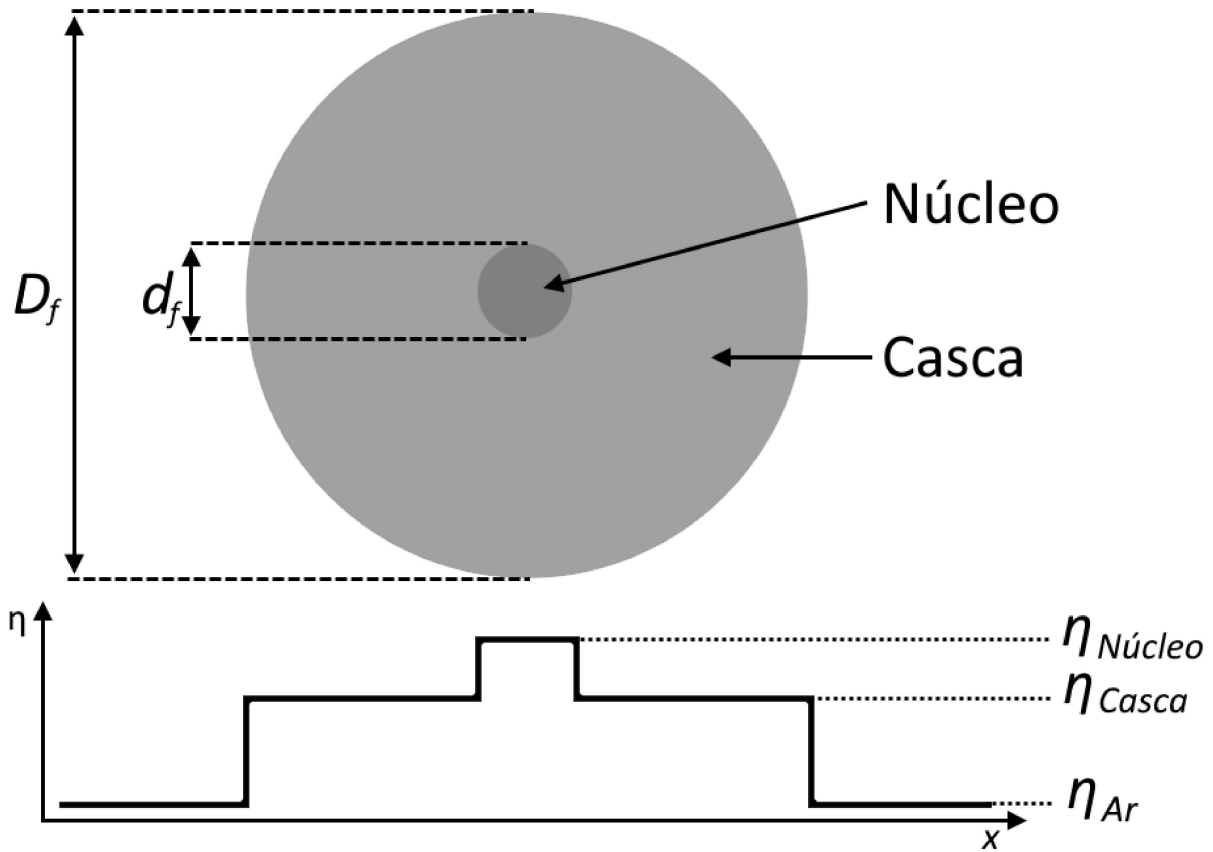


Figura 2 – Seção transversão de uma fibra monomodo exibindo os diâmetros do núcleo (d_f) e externo (D_f) e os índices de refração (η). Dimensões ilustrativas.

Como exposto na Figura 2, o índice de refração do núcleo ($\eta_{\text{Núcleo}}$) é superior ao índice de refração da casca (η_{Casca}), o que faz com que a maior parte da luz fique contida no núcleo, devido ao fenômeno da reflexão interna total. Os diâmetros d_f e D_f , podem variar bastante, dependendo da fibra que será utilizado, bem como os índices de refração, presença de elemento dopante e estrutura interna (AGRAWAL, 2021). 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.

Os experimentos e simulações abordados neste trabalho utilizaram, além da SMF, fibras mantenedoras de polarização e fibras dopadas com Érbio³⁺.

2.2.1 Fibras mantenedoras de polarização

As fibras mantenedoras de polarização comumente possuem ao longo de seu comprimento regiões chamadas hastes de estresse com um índice de refração diferente. Três dos perfis mais conhecidos (FU et al., 2021; DING et al., 2020; FENG; TSUBOKAWA, 2020) estão exibidos na Figura 3

Como visto na Figura 3, as hastes de estresse não possuem simetria radial e, por

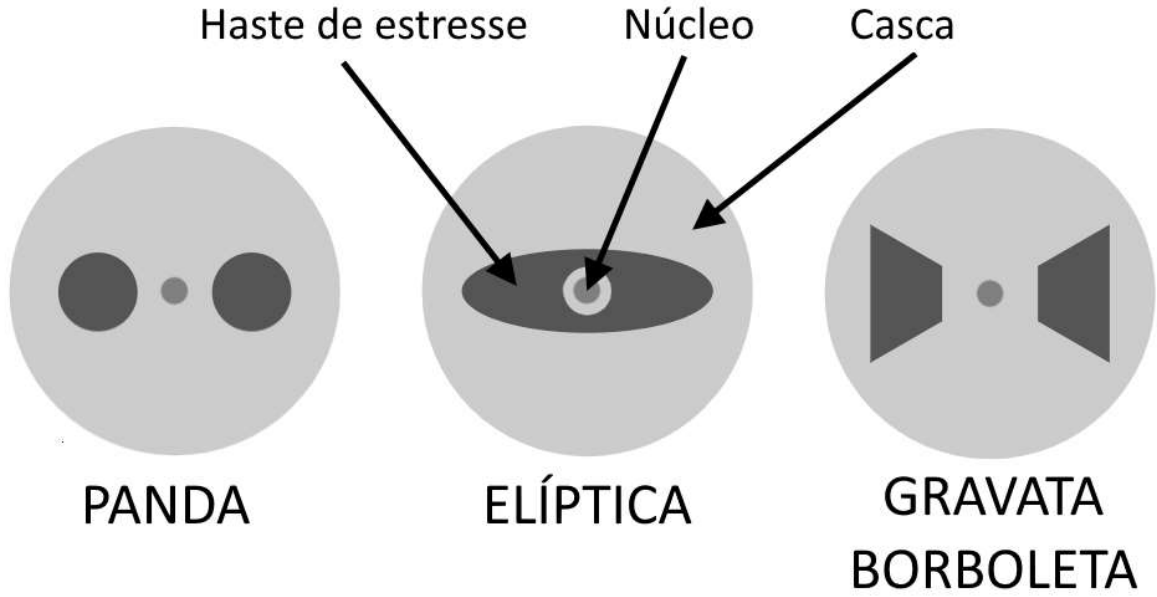


Figura 3 – Esquemático dos três perfis mais comuns para PMF: Panda, Elíptica e Gravata borboleta (conhecida como *bow-tie* em inglês)

consequência, o índice de refração da fibra se torna dependente da orientação que, dada a Equação 2.5, altera a velocidade de propagação da luz na fibra.

$$u = \frac{c}{\eta} \quad (2.5)$$

Em que a velocidade da luz no meio (u) é a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e o índice de refração no meio (η), portanto eixo com o menor índice de refração (η_-) é chamado eixo rápido, sendo o eixo lento o com maior índice de refração (η_+) (KYSELAK et al., 2020). A diferença entre os índices η_+ e η_- é conhecida como birrefringência (B) e utilizada como um dos parâmetros de classificação de fibras ópticas.

2.2.2 Fibras dopadas com Érbio.

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 gerem 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 (AGRAWAL, 2021; REIDER, 2016).

Neste trabalho foi utilizada uma fibra dopada com íons 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 transformação de 980 nm para a região de 1550 nm, região a qual é muito aplicada para transmissão em longas

distâncias devido sua baixa absorção pelas fibras padrões de telecomunicação (YANKOV; MOURA; ROS, 2021; EID; RASHED; EL-DIN, 2020).

2.3 Interferometria óptica

Interferômetros ópticos são instrumentos que possuem como princípio de funcionamento o fenômeno da interferência da luz para alterar sua resposta espectral. São amplamente utilizados como sensores em diversas aplicações, pois combinam as vantagens dos sensores ópticos com sua alta sensibilidade às variações do meio (PADRON, 2012).

Algumas de suas aplicações como sensores incluem a medição de vibração acústica, posição, inclinação, temperatura, umidade, índice de refração, além da detecção de gases e ondas gravitacionais (LIU; GONG, 2020; FRAJUCA et al., 2021; GALDIERI et al., 2020; LI et al., 2020; SHARBIRIN et al., 2021; FU et al., 2020; YI et al., 2020; FLORES-BRAVO et al., 2021; AL-HAYALI; AL-JANABI, 2020; SHEN et al., 2020).

2.3.1 Interferômetro de Sagnac

Essa categoria de interferômetro é bem conhecida pelo seu uso como giroscópio (SCHUBERT et al., 2021; VIRGILIO et al., 2020; VIRGILIO et al., 2021), e mais recentemente também para mensurar outras grandezas físicas como pressão, temperatura, curvatura, umidade e índice de refração (HE et al., 2020; RUAN, 2020; MOLLAH et al., 2020a; BAI et al., 2020b). Nos interferômetros de Sagnac em fibra o feixe de luz que entra no sistema é inicialmente dividido em dois, que percorrem o laço em sentidos opostos, se recombinando ao fim, como ilustrado pela Figura 4.

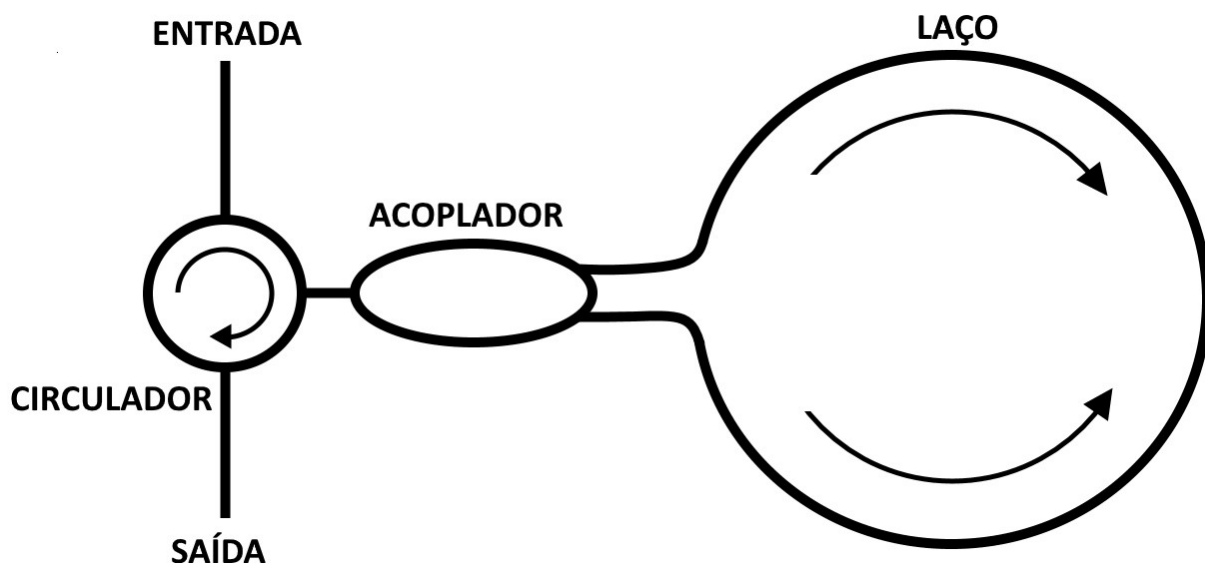


Figura 4 – Diagrama de uma montagem de um interferômetro de Sagnac em fibra.

Devido a ambos feixes de luz no laço percorrerem o mesmo caminho óptico em sentidos opostos, caso este caminho possuisse características homogêneas, o feixe recombinado seria idêntico ao original (exceto por perdas). No entanto, ao se inserir pequenos distúrbios ao laço, e por consequência introduzindo uma heterogeneidade, a resposta do sistema difere de sua entrada sendo possível utilizar tal diferença para a mensuração dos distúrbios, que por sua vez, está relacionado à variação da grandeza física que se deseja medir ([SCHUBERT et al., 2021](#)).

3 Interferômetro de Sagnac como sensor de vazão.

A medição da vazão de um fluido em tubulações é essencial para diversas áreas da indústria, medicina, comércio, farmácia, entre outras (WAN et al., 2019). Existem diversos métodos de medição de vazão, cada um com diferentes princípios de funcionamento, sendo os mais comuns: deslocamento positivo, placa de orifício, tubo de Venturi, área variável, acústico, termal, vórtex, eletromagnético e coriolis (DUNN, 2018; KÜHNEN et al., 2018; FARANDA; FUMAGALLI; BIELLI, 2019). Cada método citado tem sua implementação condicionada às características do processo a ser medido, como, por exemplo, a faixa de vazão, tipo de fluido, precisão desejada e o regime de escoamento (SPITZER, 2021).

O principal empecilho que a medição de vazão traz são as alterações às características do escoamento e do fluido. Quedas de pressão, variação térmica, formação de turbulência e a introdução de marcadores são alguns dos efeitos indesejáveis que podem ocorrer em detrimento da técnica de medição implementada (MANGELL, 2008).

A proposta de se usar sensores em fibra para medição de vazão aparece na literatura em na década de 1990, com trabalhos desenvolvidos na Universidade AM do Texas (CARVALHO; BLAKE; SANDERS, 1994; CARVALHO; BLAKE, 1994; TSELIKOV; BLAKE, 1998), nos quais conseguiram medir, através de experimentos práticos, vazões tão baixas quanto 2,4 nl/s (cerca de 1 gota a cada 5 horas) em uma tubulação de 3.8 cm, ou seja, velocidades médias de escoamento de cerca de $2,2 \times 10^{-6}$ m/s, utilizando o fenômeno conhecido como arrasto de Fresnel e um fotodetector para leitura dos resultados. No entanto, apesar do surpreendente resultado, a única publicação recente sobre o tema é uma tese (TRBALIC, 2020) que utilizou o mesmo princípio de funcionamento fazendo uma montagem em espaço livre e utilizando a imagem das franjas de interferência para medir a velocidade de escoamento do líquido.

Portanto, o objetivo deste capítulo é, através de simulações, demonstrar o funcionamento deste sensor em fibra, suas características, limitações e exibir como aspectos relativos à montagem afetam suas características de medição.

3.1 Modelagem matemática

Para criar um desbalanceamento nos caminhos ópticos do interferômetro capaz de inferir uma variação em sua medição relacionada a vazão do fluido dentro de uma tubulação, é utilizado o arrasto de Fresnel. Inicialmente descrita por Frensel em 1818 como uma prova da existência do éter luminífero, e depois corrigida por Laue em 1907 (LAUE,

1907) utilizando a teoria da relatividade especial de Einstein, este efeito explica o motivo pelo qual ondas eletromagnéticas percorrendo um meio móvel possuem uma velocidade diferente de quando em um meio estacionário. Esta alteração da velocidade é ilustrada pelas Equações 3.1 e Equação 3.2.

$$u = \frac{\frac{c}{n} + v}{\sqrt{1 + \frac{v}{n \cdot c}}} \quad (3.1)$$

Para casos em que a velocidade do meio móvel é muito menor que a velocidade da luz no meio ($v \ll c/n$), temos:

$$u \approx \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (3.2)$$

Onde temos a velocidade do meio (v), o índice de refração do meio (n), a constante da velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz no meio (u), de forma que feixes luminosos que se propagam no mesmo sentido de um escoamento terão uma velocidade superior aos que se propagam no sentido contrário ao escoamento. A diferença de fase (Θ) entre os dois feixes luminosos que percorrem o meio móvel em sentidos opostos é calculada pela Equação 3.3.

$$\Theta = \frac{2\pi \cdot \Delta t \cdot \lambda}{c} \quad (3.3)$$

Em que Θ é dependente, não somente do comprimento de onda (λ), mas também da diferença entre os tempos que cada feixe leva para atravessar o meio móvel (Δt), que pode ser encontrado através da Equação 3.4.

$$\Delta t = \frac{L}{u_-} - \frac{L}{u_+} \quad (3.4)$$

Na qual temos as velocidades de propagação da luz no sentido do escoamento (u_+) e contrário a ele (u_-), além da componente paralela ao fluxo do caminho óptico percorrido (L). Temos, portanto, que a diferença de fase entre dois feixes de luz contrapropagantes possuem relação com a velocidade do meio móvel, logo é possível utilizar o interferômetro de Sagnac para captar essa diferença de fase na forma de variação de amplitude. Conforme a teoria da soma de ondas (GIANCOLI, 2021), a soma de duas senóides normalizadas e com uma diferença de fase (Θ) é representada pela Figura 5.

Para diferenças de fase próximas a 0° temos o máximo da amplitude da soma (A), e a mínima variação da amplitude em detrimento de Θ . Tal variação aumenta (em valores absolutos) a medida que Θ se aproxima de 180° , o valor de A se torna muito baixo e a sua

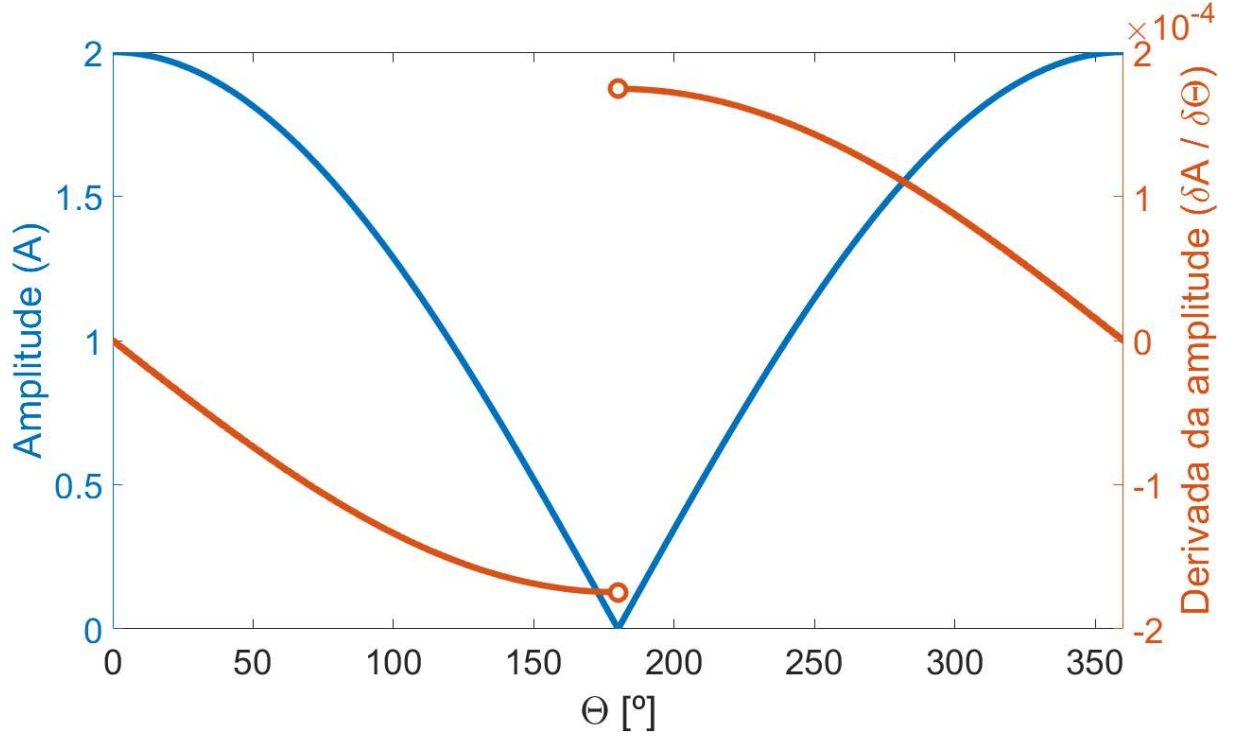


Figura 5 – Relação entre a diferença de fase (Θ) com a Amplitude do sinal recombinação (A) e sua derivada ($\delta A / \delta \Theta$).

derivada atinge seu valor máximo absoluto, para logo em seguida, em $\Theta = 180^\circ$, ter uma descontinuidade devido ao ponto crítico de A (Equação 3.5).

$$\frac{\delta A}{\delta \Theta}_{\Theta=\pi} = \emptyset \quad \because \quad \lim_{\Theta \rightarrow \pi^+} \frac{\delta^2 A}{\delta \Theta} \neq \lim_{\Theta \rightarrow \pi^-} \frac{\delta^2 A}{\delta \Theta} \quad (3.5)$$

Tubulações de poucos centímetros de diâmetro interno e vazões não muito altas, Θ assume valores muito baixos, e por consequência, a variação de A na região próxima à $\Theta = 0^\circ$ é praticamente imperceptível, como demonstrado na Figura 5 e demonstrado pela Equação 3.6.

$$\frac{\delta A}{\delta \Theta}_{\Theta \rightarrow 0^\circ} \approx 0 \quad (3.6)$$

Portanto, com o intuito de aumentar a sensibilidade de sensor, devemos somar à diferença de fase (Θ) um valor base (Φ) um pouco inferior a π rad, para que as variações em Θ ocorram na região próxima a π , na qual o valor absoluto da derivada de A apresenta seu máximo valor e é a zona de maior linearidade (Equação 3.7) A Equação 3.8 demonstra tal incremento base e suas restrições.

$$\frac{\delta^2 A}{\delta \Theta}_{\Theta \rightarrow 180^\circ} \approx 0 \quad (3.7)$$

$$\Psi = \Theta + \Phi, \quad \Phi \in \mathbb{R} / 0 \leq \Phi < (2\pi - \Theta) \quad (3.8)$$

Fica evidente que o resultado da soma (Ψ) deve ser menor que 2π , pois isto garante que a resposta do sistema de medição é uma função injetora (Equação 3.9), ou seja, existe uma (e apenas uma) imagem para cada domínio.

$$f : Dm \rightarrow Im \quad (3.9)$$

Característica esta fundamental para o funcionamento de um sensor, pois cada valor de estímulo deve corresponder a um, e apenas um, valor de medição associado. Caso a resposta do sistema permita nenhuma ou mais de uma imagem para cada elemento do domínio, a faixa de medição deve ser restringida a uma região em que a função seja injetiva.

Com a implementação da soma de um valor base à Θ efetuada na Equação 3.8, temos como resultado um sistema mais sensível às variações na diferença de fase dos feixes contrapropagantes, e por consequência, à variação da velocidade do fluido, como demonstrado na Equação 3.10.

$$\frac{|\delta A_{(\Theta)}|}{\delta \Theta} \ll \frac{|\delta A_{(\Psi)}|}{\delta \Psi} \quad (3.10)$$

Com o objetivo de se implementar tal diferença base (Φ) será utilizado um controlador de polarização, e uma fibra de alta birrefringência (HiBi, do inglês *High Birefringence*), isso fará com que um dos feixes atravesse a HiBi mais rápido que o outro.

O esquema de montagem proposto, como exibido na Figura 6, é dividido em duas partes: em fibra e em espaço livre. A parte em fibra, compreende os componentes ópticos em questão, como a fonte de luz monocromática, fotodetector, circulador, acoplador, controlador de polarização e os trechos em SMF e HiBi. A parte em espaço livre consiste na extensão onde a luz deixa a fibra, passa por um colimador, atravessa o meio móvel em questão e depois retorna ao meio óptico através, novamente, de um colimador.

O feixe luminoso monocromático e polarizado é gerado pela fonte LASER (do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), passa pelo circulador em direção ao acoplador, onde é dividido em dois novos feixes, um que percorrerá o laço pelo sentido horário e o outro, pelo sentido anti-horário. Após percorrer o laço, ambos feixes se recombinaem no acoplador, voltam ao circulador sendo direcionados ao fotodetector, que realizará a medida de sua amplitude. É possível notar a presença de dois controladores de polarização no caminho óptico do laço, eles têm como finalidade ajustar o ângulo em que os feixes de luz atravessam a HiBi, para se obter o atraso de fase desejado.

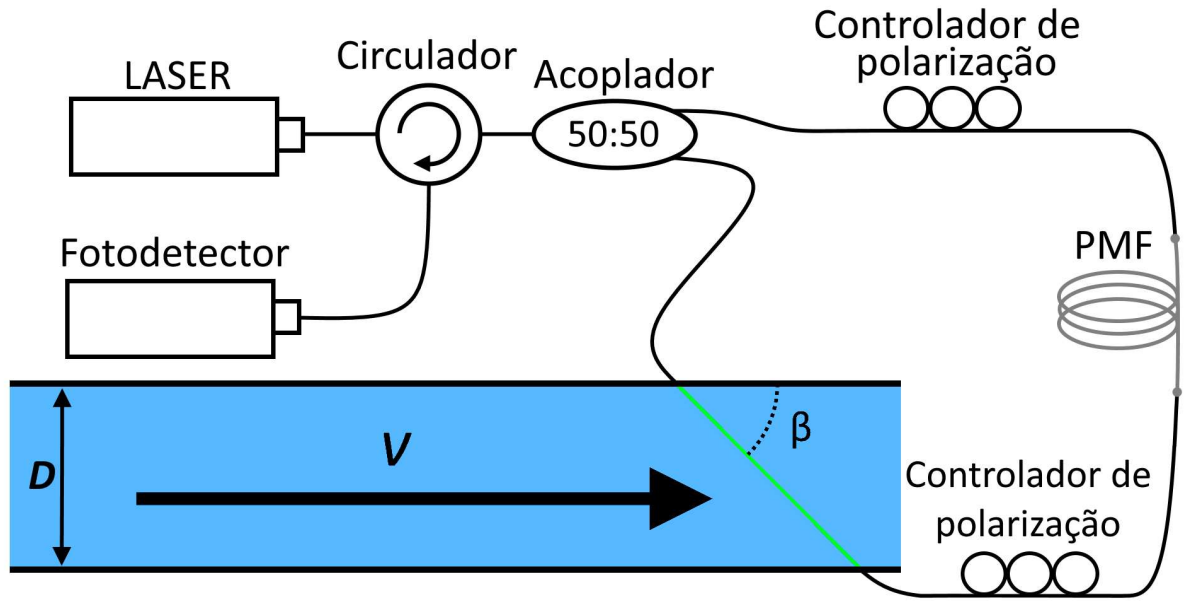


Figura 6 – Diagrama de montagem do sensor óptico de vazão proposto, em que parte do laço do interferômetro se encontra em espaço aberto, passando por dentro da tubulação.

A Figura 6 também exhibe alguns parâmetros que serão utilizados na simulação, como o diâmetro interno da tubulação (D) e o ângulo entre a parede da tubulação e o feixe luminoso (β), utilizados para o cálculo de L , além da velocidade do fluido (v).

3.2 Resultados e discussão

Primeiramente, é necessário estipular o valor de Φ com base no comprimento (L_{HiBi}) e birrefringência da HiBi. Para isso, será utilizado o conceito de comprimento de batimento (L_b), que representa a distância a qual dois feixes de luz, em eixos perpendiculares, devem percorrer para que a diferença em fase deles seja alterada em 2π (CHEN; BAO; TONG, 2019). Para tal cálculo temos a Equação 3.11 e a Equação 3.12.

$$L_b = \frac{\lambda}{B} \quad (3.11)$$

Analogamente, temos a diferença de fase como:

$$\Phi = \frac{2\pi \cdot L_{HiBi} \cdot B}{\lambda} \quad (3.12)$$

Para as condições de simulação impostas, Θ assume valores baixos, não ultrapassando 10° . Com isso, o primeiro passo é determinar o comprimento necessário da Hibi que provoque uma desfasagem de 170° . Utilizando uma fibra M5-980-125 da FiberCore (FIBERCORE, 2013), que apesar de não ser classificada como uma fibra de alta birrefrin-

Variável	Valor base	Unidade
D	0,1	m
β	45	°
λ	1550	nm
Φ	170	°

Tabela 1 – Valores base dos Parâmetros

gência, possui uma birrefringência calculada de $2,1 \times 10^{-5}$ (conforme discutido no Capítulo 5) e será utilizada como referência para a simulação. Com o comprimento de onda de 1550 nm, temos através da Equação 3.12 que será necessário um pedaço de cerca de 34,9 mm de comprimento da fibra HiBi para atender a condição de Φ .

As simulações visam demonstrar a sensibilidade, expressa em W/ms^{-1} , do sensor proposto em diferentes configurações, para melhor compreensão de como suas características construtivas podem impactar na resposta do sistema. Para tal foram determinados como parâmetros base os valores de: diâmetro interno da tubulação (D) como 10 cm, inclinação do feixe (β) de 45° , comprimento de onda (λ) como 1550 nm e, como já calculado, Φ com o valor de 170° , como na Tabela 1.

A influência de cada um dos parâmetros base, citados no paragrafo anterior, são analisadas nas subseções a seguir. Contudo, é importante salientar que o modelo matemático utilizado na simulação não considera as perdas por atenuação, espalhamento dinâmico da luz, oscilação da fonte e vibrações. Além disso, será considerado um escoamento laminar de um fluido monofásico com índice de refração igual a 1,33 e uma fonte LASER polarizada contínua de 1 mW de potência.

3.2.1 Diâmetro interno da tubulação (D)

O diâmetro interno compreende a distância máxima entre dois pontos da secção transversão de uma tubulação de perfil cilíndrico, e portanto, delimita a região de escoamento de um fluido, alterando características como, por exemplo, a distância para a transição de um deslocamento turbulento para um completamente desenvolvido.

Existem tubulações dos mais variados tipos a depender de sua aplicação, e o diâmetro interno, juntamente com o comprimento, espessura e material, é um dos fatores considerados durante a fase de projeto em setores como, por exemplo, o transporte de água, óleo, refrigeração e calefação. A escolha apropriada desta dimensão considera os custos com material, instalação, transporte e vazão desejada (IBRAHIM et al., 2020; GASHO; KISELEVA, 2020; ZHAPBASBAYEV et al., 2021; WILLET et al., 2020).

Tal grandeza também está relacionado ao comprimento do caminho óptico que feixe de luz percorre e interage com o meio móvel. Para visualizar a inferência deste parâmetro, foram realizadas simulações com 4 valores distintos para D : 0,01, 0,10, 0,50 e 1,00 metros,

para variações de 0 à 5 ms^{-1} na velocidade média do fluido. Os resultados podem ser observados pela Figura 7

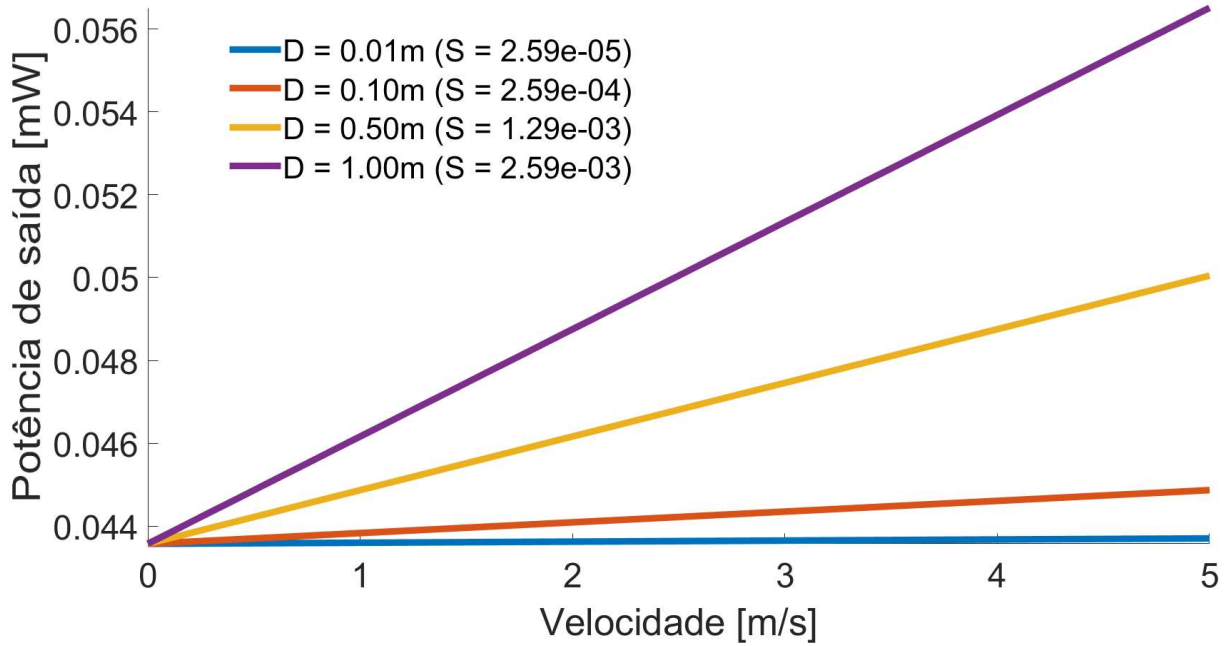


Figura 7 – Interferência da variação do diâmetro da tubulação na sensibilidade do sistema.

Como observado no gráfico, a sensibilidade é diretamente proporcional à D , o que é esperado, visto que o caminho óptico aumentou, e por consequência, a interação da luz com o meio móvel também. Podemos observar um aumento na sensibilidade, com cerca de $2,59 \times 10^{-2} \text{ mW/ms}^{-1}$ para tubos de 1 cm de diâmetro interno até $2,59 \text{ mW/ms}^{-1}$ para tubulações com diâmetros de 1 m. Com isso fica evidente que para tubulações de diâmetro muito reduzido, como os tubos capilares (0,5 à 3 mm) (SARMA; SINGH; BEZBORUAH, 2019), é necessário utilizar fotodetectores de resolução elevada para aferir vazões com uma maior precisão.

3.2.2 Inclinação entre o feixe de luz e a parede da tubulação (β)

Além do anteriormente citado diâmetro interno, o ângulo entre o feixe de luz e a parede da tubulação também interfere no comprimento do caminho óptico inserido no meio móvel. Devido ao arrasto de Fresnel considerar apenas a componente paralela ao escoamento do percurso da luz, tal inclinação se faz necessária.

Com o objetivo de observar como tal variável afeta a resposta do sistema de medição proposto, foram realizadas simulações utilizando valores de 15 a 75° com intervalos de 15° entre eles, os resultados estão expostos na Figura 8.

Assim como constatado na análise da variação de D , alterações em β também modificam a resposta do sensor, visto que a componente longitudinal interfere diretamente na sensibilidade do sensor. Os valores de sensibilidade para cada ângulo testado nos indica

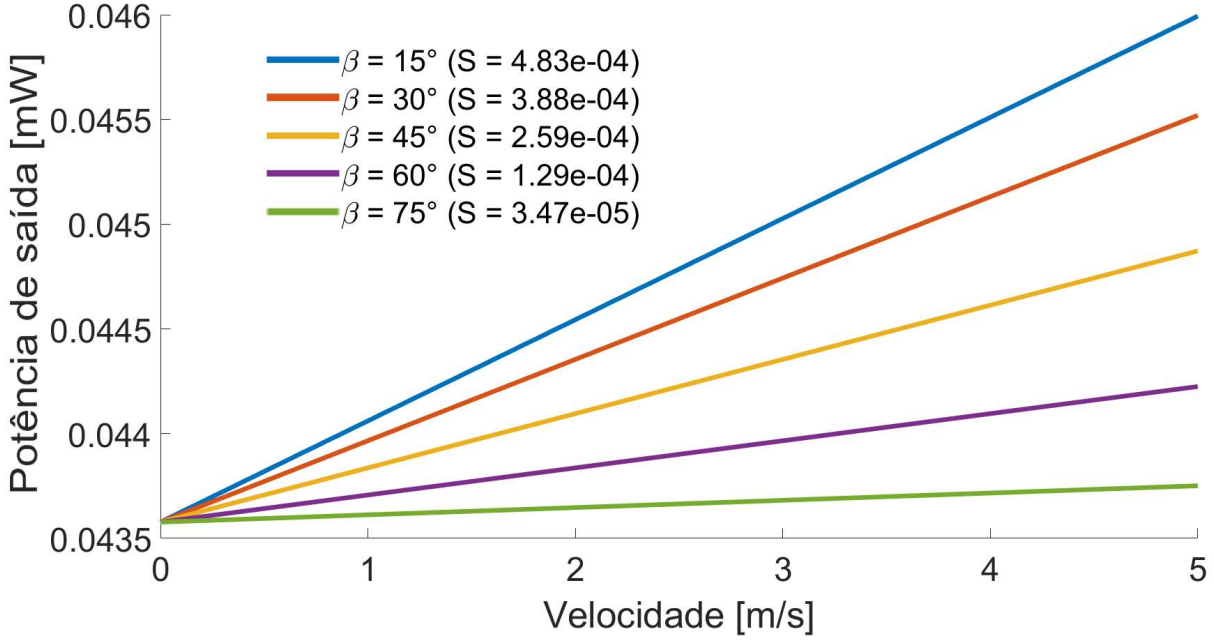


Figura 8 – Interferência da variação da inclinação entre o feixe de luz e a parede da tubulação na sensibilidade do sistema.

que, assim como esperado, quanto mais raso o ângulo β , mais sensível se torna o sensor, chegando a quase dobrar de sensibilidade quando comparamos o valor obtido para uma inclinação de 15° com a inclinação adotada como padrão para as simulações ($\beta = 45^\circ$), passando de $2,59 \times 10^{-1} mW/ms^{-1}$ para $4,83 \times 10^{-2} mW/ms^{-1}$.

3.2.3 Comprimento de onda (λ)

Outra forma de influenciar a sensibilidade do sistema é alterar o comprimento de onda da fonte luminosa. Para analisar a influência dessa variável foram escolhidos cinco comprimentos para teste, dois na faixa de infravermelho (1550 nm e 980 nm) e três na faixa do visível (700 nm, 550 nm e 400 nm). Vale salientar que, para manter o valor de Φ fixo, deve-se alterar o tamanho da fibra HiBi utilizada, uma vez que também influencia no cálculo de L_{HiBi} , haja visto Equação 3.12.

Após os ajustes necessários, a simulação foi realizada com os demais parâmetros padrões definidos para faixa de operação entre 0 e $5 ms^{-1}$, os resultados estão exibidos na Figura 9.

Os resultados apresentados na Figura 9 demonstram que, quanto menor o comprimento de onda, maior é a sensibilidade do sistema. Entretanto, apesar da facilidade da alteração de λ na simulação, na prática pode ser uma tarefa não tão simples, visto que não basta apenas trocar a fonte luminosa, deve-se também se atentar para as especificações dos demais componentes ópticos do sistema, para garantir que determinado comprimento de onda não irá alterar significativamente seu funcionamento (ADDANKI; AMIRI; YUPAPIN,

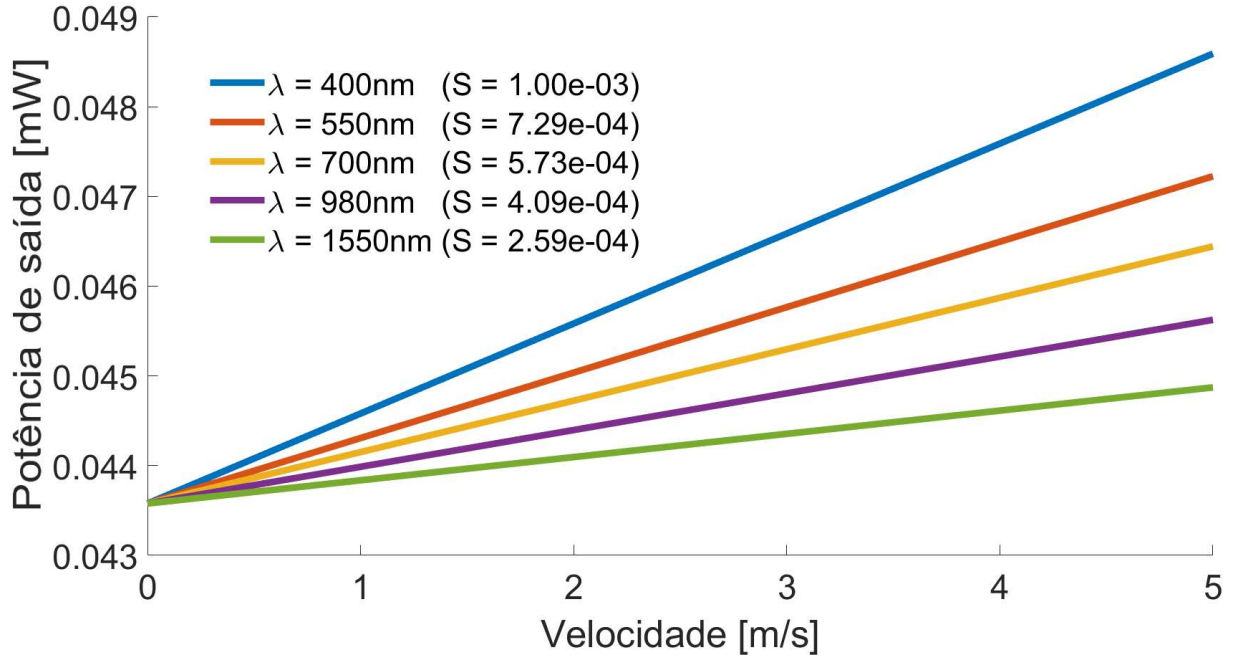


Figura 9 – Interferência do comprimento de onda da fonte luminosa na sensibilidade do sistema.

2018).

3.2.4 Atraso de fase base (Φ)

Como já demonstrado na Seção 3.1, determinar a região de operação do sensor através da adição de um atraso de fase Φ ao sistema é crucial para melhorar a sensibilidade do sensor. Com o objetivo de ilustrar essa importância, foram realizadas simulações para valores de Φ variando de 0 a 180° , como observado na Figura 10.

Como observado através da Figura 10, a sensibilidade do sistema não apenas aumenta com a adição de um atraso de fase base (Φ), uma vez que desloca sua região de operação, mas também o torna mais linear. Temos em destaque três pontos: $\Phi = 170^\circ$, usado como parâmetro de referência e associado a uma sensibilidade de $2,59 \times 10^{-4} \text{ W/ms}^{-1}$, e para efeito de comparação, dois pontos próximos, $\Phi = 165^\circ$ e $\Phi = 175^\circ$, com sensibilidades de $2,58 \times 10^{-4}$ e $2,60 \times 10^{-4} \text{ W/ms}^{-1}$, respectivamente.

Com isso, podemos calcular que a variação da sensibilidade do sistema em relação à mudança do valor de Φ através de uma aproximação por tangente, sendo $\delta S / \delta \Phi_{\Phi=170^\circ} \approx 2 \times 10^{-7}$. Tal região, portanto, será considerada como linear para as condições de simulação, uma vez que se utilizando do conjunto padrão para as variáveis de simulação, temos que uma alteração na velocidade média de escoamento de 0 para 5 ms^{-1} , implicará em uma variação de defasagem dos feixes recombinados em cerca de $0,30^\circ$.

A análise de Φ nos permite ainda analisar as consequências de variações do tamanho da fibra, visto que conseguir separar com precisão um pedaço de fibra com 34,9 mm de

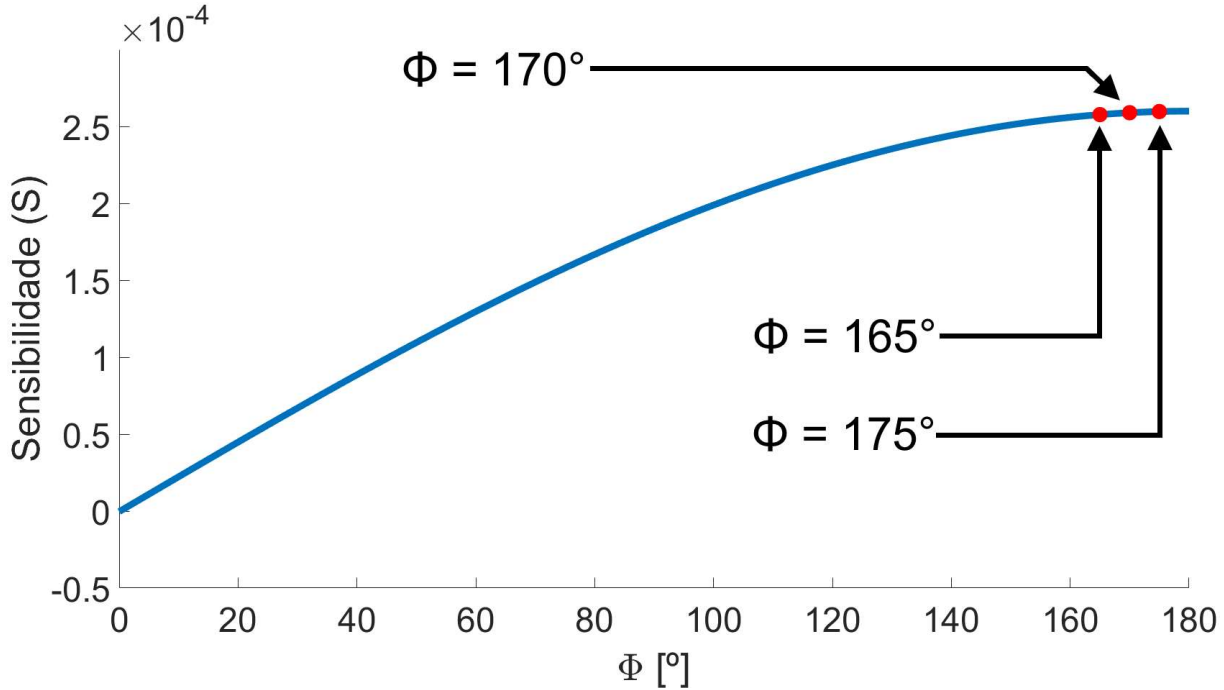


Figura 10 – Interferência da adição de atraso de fase na sensibilidade do sistema.

comprimento é algo muito simples em uma simulação, mas penoso caso fosse realizado experimentalmente no laboratório.

Como demonstrado pela Equação 3.12, Φ é linearmente proporcional à L_{HiBi} , e com as condições utilizadas para a simulação, $\delta\Phi/\delta L_{HiBi} = 4,88^\circ/\text{mm}$. Como consequência, temos que, caso se deseje obter $\Phi = 170 \pm 5^\circ$, deve-se realizar um corte de tamanho $L_{HiBi} = 34.9 \pm 1.1\text{mm}$.

3.3 Considerações finais

Diante dos resultados de simulação levantados, podemos concluir que o modelo de sensor para vazão proposto neste capítulo é uma alternativa aos métodos convencionais de medição, tendo uma sensibilidade para velocidade média de vazão de até $2,59 \times 10^{-1} \text{mW/ms}^{-1}$ que pode se considerar linear para os parâmetros utilizados na simulação. A influência de cada um dos parâmetros também foi apresentada e discutida, de modo a auxiliar na fase de projeto.

Também é possível estimar a resolução do sensor se considerarmos a resolução do fotodetector a ser utilizado, quanto mais preciso o equipamento, melhor a resolução geral do sistema. Considerando a utilização de um ANRITSU CMA5 com resolução de $2.31 \mu\text{W}$, é possível obter uma resolução de $8,9 \times 10^{-3} \text{ms}^{-1}$ para os parâmetros estipulados como padrões neste capítulo.

Devido a sua característica de não possuir nenhuma parte dentro da tubulação, o

sistema proposto não induz queda de pressão na tubulação e não cria turbulência, além de ser seguro para aplicação em áreas classificadas, visto que não gera calor, fagulha ou arco elétrico. O comprimento de onda da fonte também pode ser alterado dado as características do fluido a ser medido, ou seja, utilizar uma frequência que tenha baixa absorção e não interaja com as substâncias presentes no meio móvel.

Na prática, pode-se utilizar uma seção tubular para a montagem do sensor, onde serão realizadas as perfurações, alinhamento e fixação de colimadores e conectores para fibra óptica. Uma vez confeccionada, tal seção pode ser instalada junto a tubulação em que se deseja realizar a medição de vazão e por fim, ligar os conectores da seção tubular às saídas do acoplador, para fechar o circuito óptico. Também é importante lembrar que ao utilizar seção tubular de maior diâmetro, ângulo mais agudo entre colimadores e uma fonte com menor comprimento de onda é possível alcançar valores de sensibilidade superiores ao aqui apresentado a partir dos parâmetros D , β e λ padrões estabelecidos.

O modelo proposto se diferencia de seus similares por ser construído em fibra (apenas um trecho em espaço aberto), ser implementado em uma sessão reta da tubulação e por utilizar um elemento passivo para realizar o atraso de fase. Trabalhos anteriores (CARVALHO; BLAKE, 1994) utilizam uma célula de Pockels (TOBAL et al., 2020), gerador de frequência e quilômetros de fibra para gerar tal atraso, além de usar tubulações com ângulos retos, o que pode não ser viável para algumas aplicações. Já outros utilizam, além de ângulos retos, toda a montagem em espaço aberto (TRBALIC, 2020), o que pode trazer muitos problemas em ambientes com trânsito de pessoas, cargas e veículos, além de sofrer interferências do ambiente externo como, por exemplo, mudança da temperatura do ar ou depósito de sólidos suspensos (poeira e fuligem) (IEMA, 2020).

Contudo, deve-se lembrar que para a simulação foram realizadas algumas considerações para simplificar o problema, implementações práticas do sistema devem considerar aspectos como: flutuação da fonte de luz, o espalhamento dinâmico da luz, atenuação, vibrações, presença de sólidos em suspensão e turbidez. No entanto, alguns destes pontos podem ser contornados através de processos de calibração, como no caso da atenuação e espalhamento de luz, e por medições paralelas para a realização de compensação, como no caso da flutuação da fonte de luz e turbidez do líquido.

4 Interferômetro de Sagnac como sensor de temperatura utilizando uma PMF

A temperatura é uma variável muito importante para diversos processos industriais, laboratoriais, logísticos, clínicos e de climatização. Portanto, monitorar com precisão e de forma confiável esta grandeza é fundamental para reduzir desgastes mecânicos, falhas de equipamentos, controle de qualidade, prevenção de acidentes e manutenção à vida (POLE et al., 2020; YUAN; WANG; XIA, 2020; LEONOV et al., 2020; VILLA; ARTEAGA-MARRERO; RUIZ-ALZOLA, 2020).

Medidores clássicos de temperatura incluem termopares, termistores, termorresistências, tubos de mercúrio, detectores de infravermelho, entre outros (EDNALDO; SANTOS, 2020; CUI; SUN; SUN, 2020; PECORARO et al., 2020; WEBSTER, 2021; CUI et al., 2020). Contudo, devido às suas características, sensores ópticos construídos em fibra têm ganhado espaço principalmente nas indústrias de óleo e gás (BALDWIN, 2018; ZHOU; YU; PENG, 2019), devido as suas propriedades intrínsecas já discutidas anteriormente no Capítulo 1.

Os dispositivos ópticos comumente empregados para esse tipo de medição são as grades de Bragg em fibra (FBG, do inglês *Fiber Bragg Gratings*) e interferômetros Fabry-Perot (FPI, do inglês *Fabry-Perot Interferometer*), com sensibilidades de cerca de dezenas de pm/°C e dezenas de nm/°C, respectivamente (PEREIRA et al., 2021; LEAL-JUNIOR et al., 2018; LEAL-JUNIOR et al., 2019a; LEAL-JUNIOR et al., 2019b; LI et al., 2020; CUI et al., 2020; FU et al., 2020; CHEN et al., 2020). Outros dispositivos ópticos, como os interferômetros também demonstram sua viabilidade como termômetros, alcançando sensibilidades de centenas de nm/°C (MA et al., 2021; ZHAO et al., 2021; HAN et al., 2021b; WANG et al., 2020).

Entre os interferômetros mais utilizados para uso como sensores de temperatura, podemos destacar os que utilizam o modelo Sagnac que possuem em seu laço fibras com alta birrefringência. Geralmente são empregadas fibras de cristal fotônico (PCF do inglês *Photonic Crystal Fiber*) que possuem estruturas vazadas que são preenchidas com materiais de alto coeficiente termo-óptico (REYES-VERA; CORDEIRO; TORRES, 2017; CUI et al., 2012; SHI; LI; CHEN, 2018; MA et al., 2019; ZHAO et al., 2012; LI et al., 2017; WANG et al., 2019; ZHAO et al., 2020), fibras do tipo gravata-borboleta (STARODUMOV et al., 1997) e PANDA (DOMÍNGUEZ-CRUZ et al., 2018; SHAO et al., 2015; SHAO et al., 2018).

Enquanto os modelos que utilizam PMFs do tipo PANDA e gravata-borboleta

apresentam sensibilidades entre cerca de $1.0 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ e $2,5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, as PCFs preenchidas com materiais de alto coeficiente termo-óptico possuem sensibilidades que variam de $1,5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ à $16,5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ a depender da montagem e do preenchimento escolhido. Entretanto, o processo de fabricação e preenchimento das PCFs é mais complexo, o que eleva o custo do sistema.

Neste capítulo será discutida a montagem e operação do interferômetro de Sagnac com um metro de PMF como elemento sensor. Ao utilizar uma PMF do tipo PANDA com valor de birrefringência de $4,2 \times 10^{-4}$ e rastreo de pico como método de leitura, os resultados deste trabalho apontam uma sensibilidade de $-1,62 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ com uma alta linearidade.

4.1 Montagem do interferômetro

A montagem do interferômetro proposto para a medição de temperatura consiste em uma fonte de banda larga de luz infra-vermelha, um analisador de espectro, circulador, acoplador, controlador de polarização e uma PMF como elemento sensor, como exibido na Figura 11.

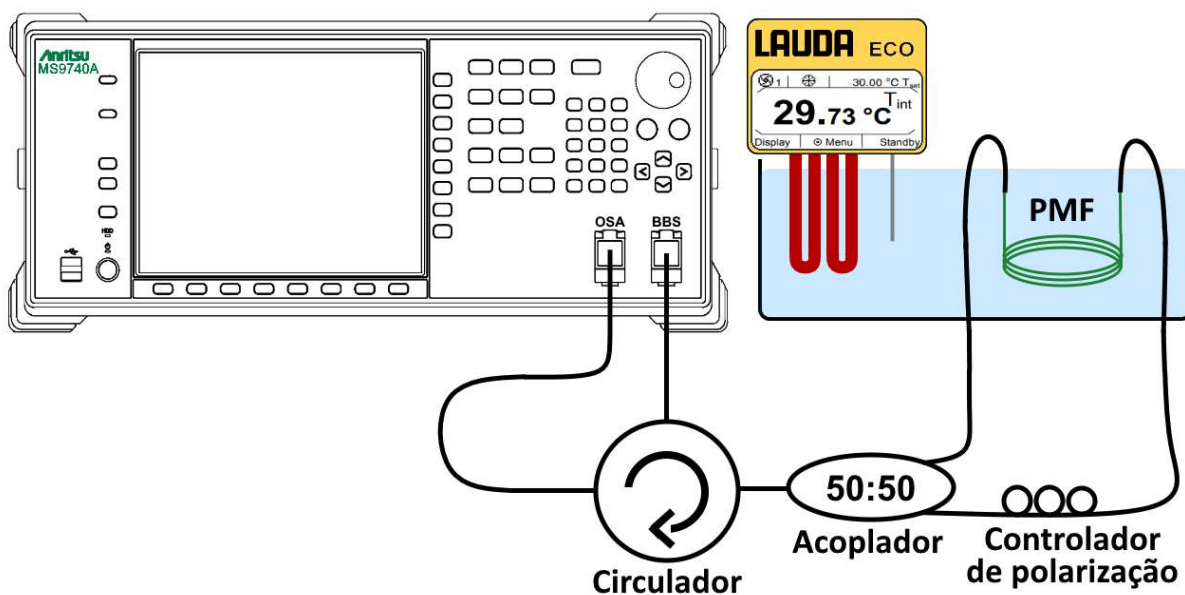


Figura 11 – Montagem do interferômetro de Sagnac para medição de temperatura utilizando uma PMF tipo PANDA como elemento sensor.

Nesta configuração, a luz oriunda da fonte é acoplada à entrada do circulador pela porta 1 e em seguida é acoplada ao acoplador 50:50, onde é dividida em dois feixes de mesma intensidade que se propagam em sentidos opostos pelo laço do interferômetro, passando pela PMF e se recombinando posteriormente no acoplador, após isso, retorna ao circulador pela porta 2 para serem redirecionadas, através da porta 3, ao analisador de espectro. Também é possível notar um controlador de polarização no laço, que tem como

função rotacionar os feixes, garantindo que exista uma inclinação próxima à 90° entre eles, e por consequência, uma maior amplitude pico-vale no espectro transmitido.

Para a obtenção dos dados experimentais, foi utilizado o analisador de espectro Anritsu MS9740A com uma resolução de 0.03nm para coleta de informações do espectro refletido na porta 3 do circulador. Este equipamento também desempenhou o papel de fonte luminosa que consistiu em uma banda de 60 nm centrada em 1544 nm com 200 μ W de potência de pico. A PMF do tipo PANDA utilizada na montagem experimental como elemento sensor foi a PM1550-XP da ThorLabs ([THORLABS, 2017](#)) de um metro de comprimento e $4,2 \times 10^{-4}$ de birrefringência.

A temperatura da água foi controlada utilizando o Lauda ECO RE630, que utiliza trocadores de calor e convecção forçada para alterar e manter estável a temperatura da água. Como destacado pelo fornecedor ([LAUDA, 2011](#)), o processo de aquecimento e resfriamento não é homogêneo devido as suas características de operação e funcionamento, e portanto, existe uma flutuação de temperatura de cerca de ± 0.02 K durante o processo.

4.2 Resultados e discussão

4.2.1 Simulação

Fibras de alta birrefringência, como a PMF, inseridas em um laço de Sagnac criam caminhos ópticos com trechos de diferentes índices de refração a depender da orientação do feixe. Quando recombinados os feixes que trafegaram pelo eixo rápido e lento da PMF aparece um padrão de interferência, como demonstrado pela Equação 4.1 ([DOMÍNGUEZ-CRUZ et al., 2018](#)).

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_c^2}{B \cdot L_{PMF}} \quad (4.1)$$

Portanto, temos que o espaçamento entre os picos ($\Delta\lambda$) depende do comprimento de onda médio entre eles (λ_c), da birrefringência (B) e comprimento (L_{PMF}) da PMF. Saber o valor de ($\Delta\lambda$) para este sensor é fundamental, visto que o método de medição consiste em rastrear o deslocamento do pico, e portanto, a distância entre picos é um dos parâmetros que se deve levar em consideração ao determinar o espectro de leitura mínimo que o OSA deve possuir para determinada faixa de operação.

Numericamente, podemos simular a resposta transmitida do interferômetro (T) conforme a Equação 4.2 ([LIU et al., 2020](#)).

$$T = (1 - \frac{\cos(2\pi \cdot B \cdot L_{PMF})}{\lambda})/2 \quad (4.2)$$

Com o objetivo de confirmar que o padrão de interferência obtido pelos testes experimentais tem de fato origem na diferença de fases entre os feixes contrapropagantes, foi realizada uma comparação com os resultados da simulação. Para isso, a Equação 4.2 foi aprimorada com o incremento de termos que representam a fonte (Src) e as atenuações presentes no sistema (Att), resultando na Equação 4.3.

$$T_{att} = Src \cdot Att \cdot (1 - \frac{\cos(2\pi BL)}{\lambda})/2 \quad (4.3)$$

Temos na Figura 12 a comparação entre a resposta gerada pela simulação utilizando a Equação 4.3 como modelo matemático e o espectro obtido experimentalmente como resposta do sensor em questão para uma temperatura da 25.0°C.

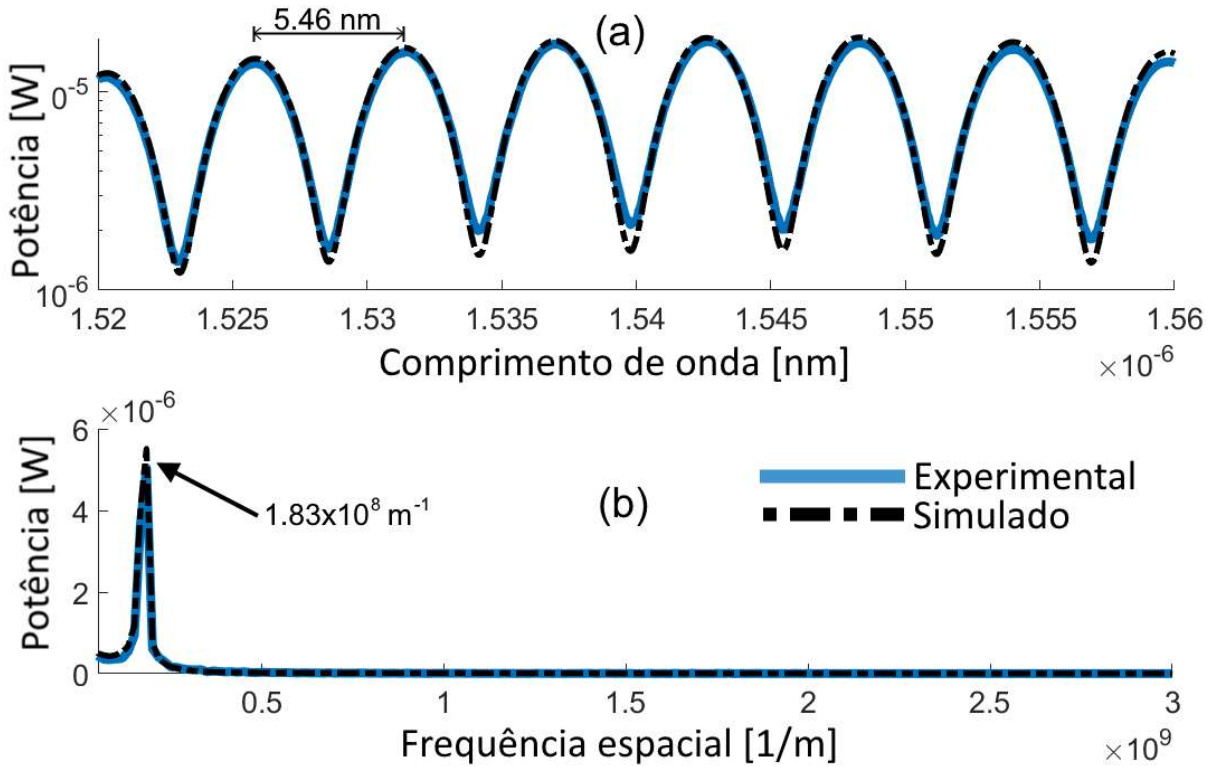


Figura 12 – Comparação entre os resultados experimentais e simulados para as respostas espectrais (a) e frequências espaciais (b).

Na Figura 12(a) podemos observar que o espectro transmitido simulado é muito próximo ao resultado experimental, com uma distância entre picos de cerca de 5,46nm. Na Figura 12(b) se trata de uma análise das frequências espaciais obtidas através de uma transformada rápida de Fourier dos espectros, que na prática, representam as distâncias entre os picos mais frequentes. Podemos notar que a potência do sinal está concentrado em apenas uma frequência espacial, de $1,83 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$.

A partir da análise da 12, há evidência de que o padrão de interferência formado está relacionado com a presença de uma fibra de alta birrefringência no interferômetro de

Sagnac, sendo a próxima etapa relacionar o aumento de temperatura com o deslocamento dos picos.

4.2.2 Experimento

Para a coleta dos dados experimentais, a temperatura alvo da água foi alterada gradativamente, em intervalos pré-definidos, processo que durou por cerca de 10 min para cada degrau, tempo em que inclui o tempo de subida e estabilização. Os dados foram então coletados pelo OSA, cada leitura consiste em 2001 pontos, para comprimentos de onda entre 1510 e 1570 nm com resolução de 0,03 nm.

Para visualização do efeito de deslocamento do padrão de interferência no espectro, a Figura 13 exibe os espectros medidos entre 1540 e 1550 nm para cinco temperaturas espaçadas de 0.1°C.

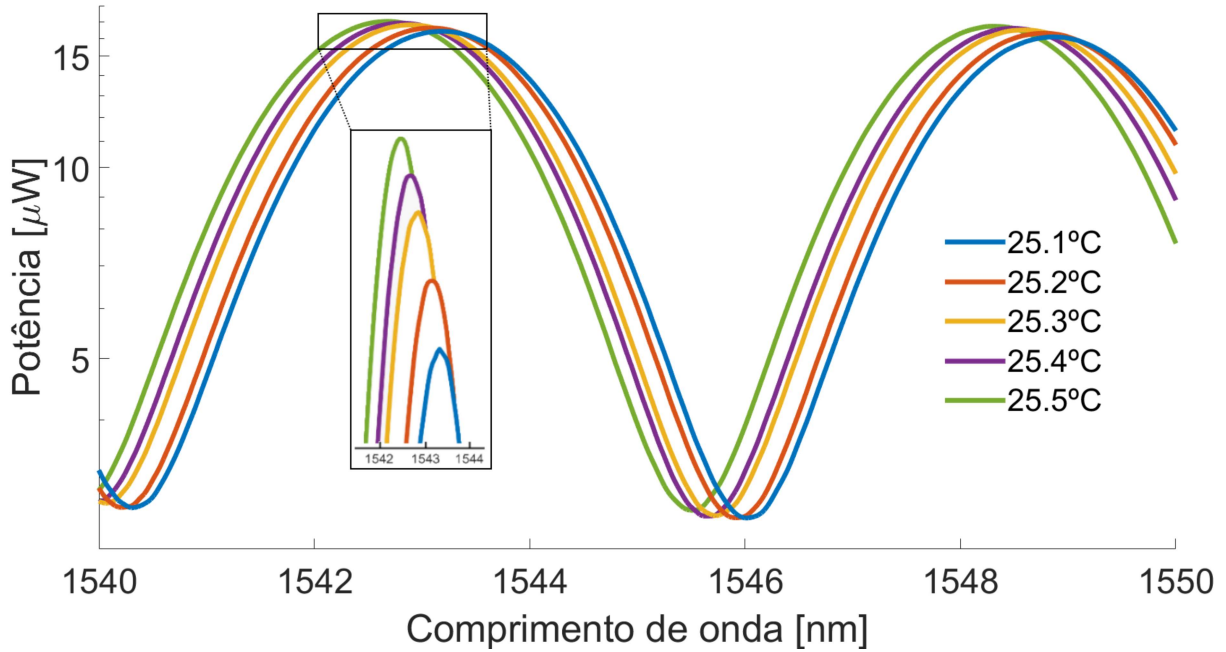


Figura 13 – Visualização do deslocamento do padrão de interferência para degraus de 0.1°C entre 1540 e 1550 nm.

Como visto na Figura 13, fica evidente que existe uma relação entre a alteração da temperatura do meio e o deslocamento do padrão de interferência. Isto ocorre porque a variação de temperatura da fibra a faz expandir (ou contrair), o que afeta seu comprimento e sua espessura, que por consequência altera a birrefringência, visto que a PMF tipo PANDA não possui simetria radial. Como visto pela Equação 4.1, ligeiras alterações nos valores de L_{PMF} e B ocasionam pequenas mudanças nos valores de $\Delta\lambda$, dando a impressão de deslocamento do padrão de interferência.

Para determinar a sensibilidade do sensor em questão através do método de rastreo de pico, foram selecionados um conjunto de valores de temperatura entre 25 e 30 °C, tais

valores foram então postos como temperatura alvo do Lauda ECO RE630, e após chegar e estabilizar na temperatura desejada, foi realizada a leitura do espectro eletromagnético do sinal refletido pelo interferômetro. Após coletados, os dados foram analisados por um programa que identificava o maior pico do espectro de uma determinada temperatura e o registrava. Para a observação seguinte, o *script* buscava pelo pico mais próximo ao detectado na etapa anterior e o registrava, e assim suscetivamente para as demais observações. O resultado deste rastreo de pico pode ser visto pela Figura 14.

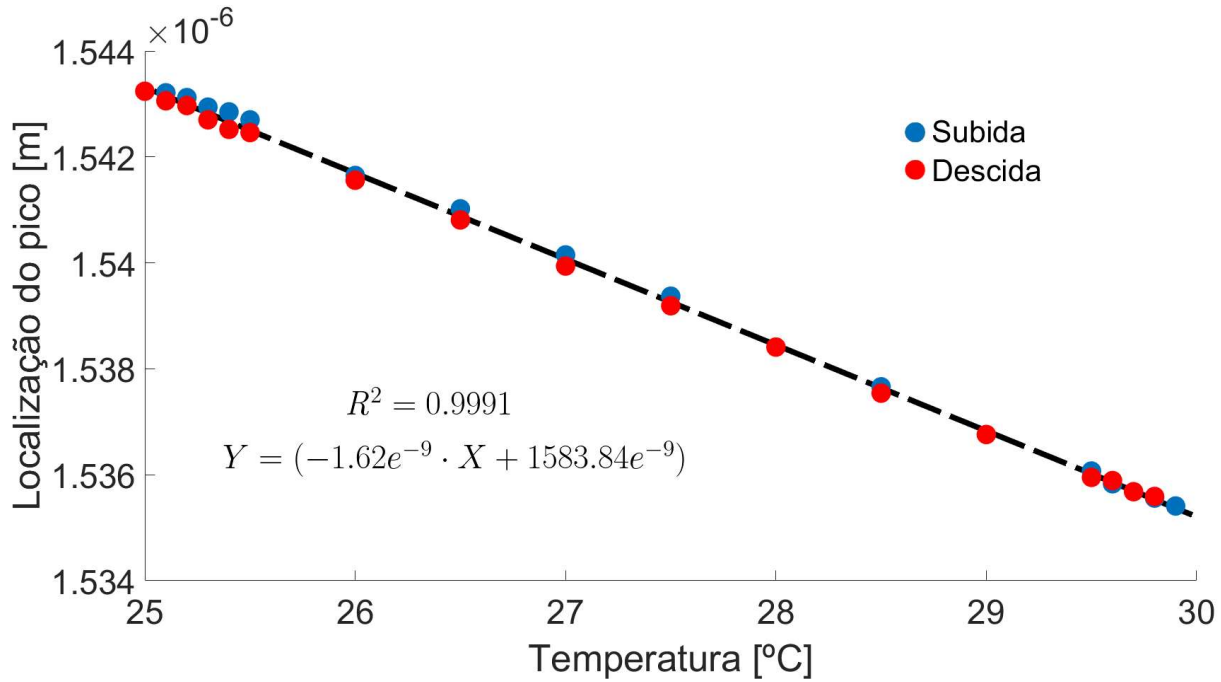


Figura 14 – Localização dos picos em função da temperatura para a faixa de temperatura entre 25 e 30 °C.

Com o objetivo de identificar a presença do efeito de histerese no processo foram realizadas medidas durante o aquecimento, e logo em sequência, no resfriamento do líquido. Como constatado pelo gráfico da Figura 14, não foi notada a presença de histerese na faixa analisada, o que temos é uma medição altamente linear, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9991 e sensibilidade de $-1,62 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. A resolução da leitura do sistema de medição apresentado dependerá da resolução do instrumento utilizado para medição, para este trabalho, como mencionado anteriormente, foi utilizado um analisador de espectro Anritsu MS9740A, com uma resolução de $0,03 \text{ nm}$. Portanto, podemos calcular que a variação mínima de temperatura de tal sensor é capaz de detectar é de $0,0185^\circ\text{C}$.

É importante notar que, para utilização do método de rastreo de pico, as observações devem ser realizadas de tal forma que o deslocamento de padrão de interferência do espectro seja inferior ao valor de $\Delta\lambda$, caso contrário, podem aparecer problemas relacionados ao rastreo por perda de referência. Sabendo-se que a regressão linear dos dados nos indica uma sensibilidade de $-1,62 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ e que a distância entre picos é de aproximadamente $5,46 \text{ nm}$ para a faixa do espectro analisada, o mínimo intervalo de

observação deve ser inferior à 1.69°C . Em outras palavras, a frequência de amostragem da temperatura deve ser suficientemente alta a ponto de garantir que a diferença entre uma amostra e outra seja inferior ao mínimo intervalo de observação.

Para estudar o comportamento do sensor em uma faixa de temperatura mais ampla, foram realizadas medições entre 18 e 42°C , com intervalos de 3°C entre elas. Evidentemente o intervalo de medição escolhido é superior ao intervalo de observação calculado para este sensor, porém, como já sabemos a sensibilidade do sensor e tendo a temperatura do Lauda como referência, foi possível utilizar os dados coletados para a análise proposta.

Desta vez, a técnica utilizada foi um pouco diferente. Como não foi possível rastrear diretamente o pico, foi escolhido inicialmente um dos picos como referência e anotado para a próxima leitura, para uma temperatura de cerca de 3°C maior. Foi utilizada a sensibilidade anteriormente medida para estimar a região do espectro para a qual este pico de referência se deslocou, e com isso identifica-lo. Caso fosse utilizado o processo de rastreo de pico sem primeiro restringir a região de busca com base na estimativa de deslocamento, teríamos um erro de rastreo, como exibido na Figura 15

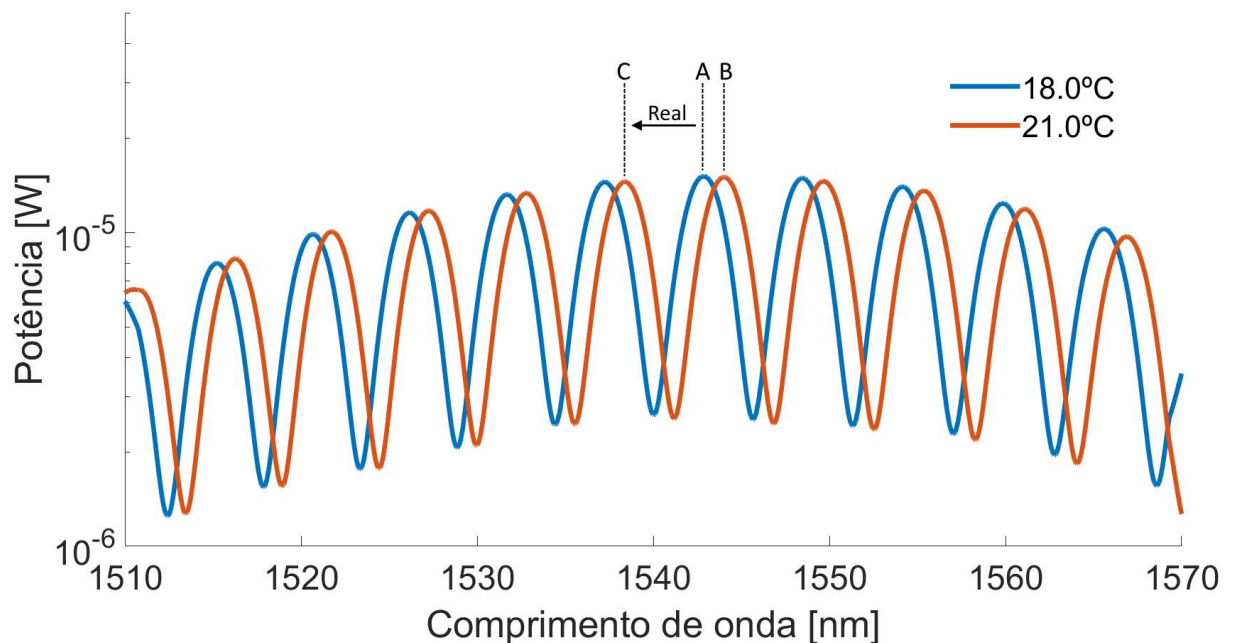


Figura 15 – Erro de rastreo de pico para grandes intervalos de medição.

Podemos observar pela Figura 15 os padrões de interferência para as temperaturas de 18 e 21°C e em destaque, alguns pontos de interesse para a análise proposta. O ponto A foi o escolhido como referência para a temperatura de 18°C , portanto, caso fosse utilizada a técnica de rastreo de pico sem antes estimar o deslocamento, o ponto de referência para a temperatura de 21°C seria atribuído erroneamente ao ponto B, e não à C.

Definida a metodologia adotada para esta análise, temos na Figura 16 as observações realizadas com uma ampla faixa de medição, de 18 à 42°C .

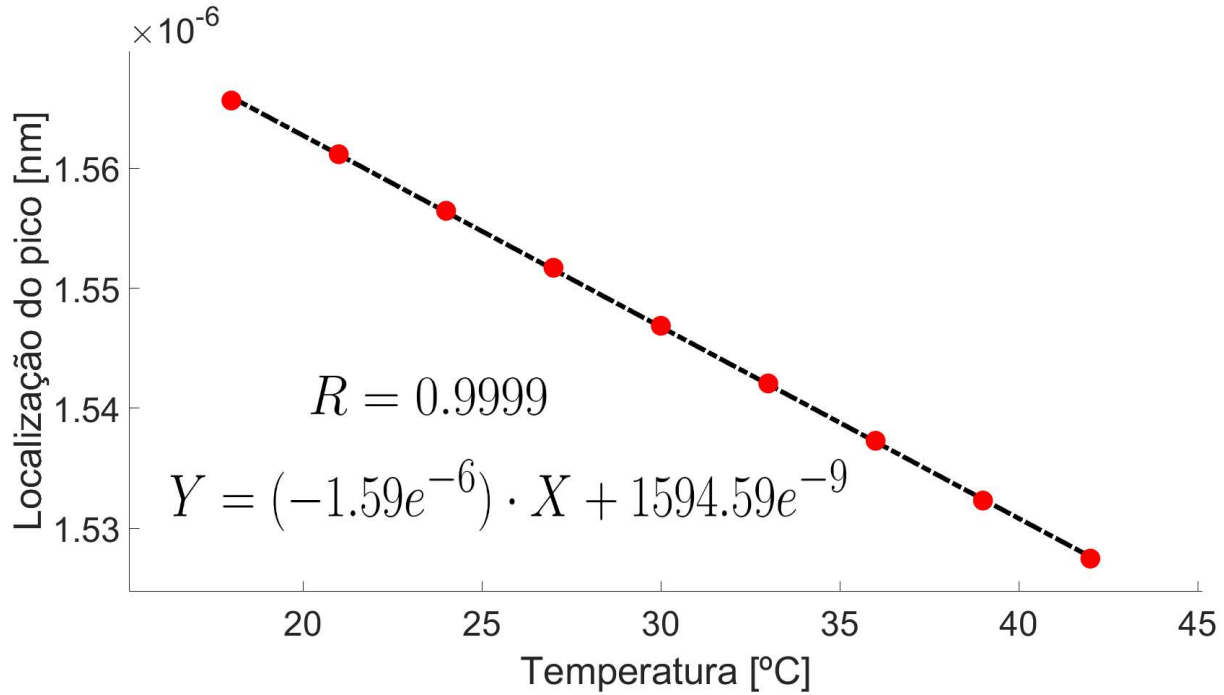


Figura 16 – Localização dos picos em função da temperatura para a faixa de temperatura entre 18 e 21 °C.

Como observado, mesmo para uma faixa de temperatura mais ampla, a resposta do sinal continua altamente linear, com um coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9999$) e sensibilidade de $-1,59 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. A resolução do sistema teve uma pequena alteração, passando de $0,0185^\circ\text{C}$ para $0,0189^\circ\text{C}$, uma vez que depende da sensibilidade e resolução do OSA. A variação na sensibilidade foi atribuída a perturbações físicas no laço do Sagnac, pois durante toda a parte de experimentação foi observado que qualquer mudança no posicionamento das fibras ou dos componentes ópticos, por menor que fosse, era capaz de alterar a resposta espectral do sistema (SHAO et al., 2018).

4.3 Considerações finais

O sensor de temperatura baseado em um interferômetro de Sagnac com uma PMF de 1 m de comprimento e birrefringência de $4,2 \times 10^{-4}$ aqui demonstrado, experimentalmente e através de simulação, exibiu uma resposta altamente linear e com uma elevada sensibilidade de cerca de $1,6 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ para uma faixa de medição entre 18 e 42°C , ainda que com uma montagem mais simples que quando comparada a outros trabalhos similares (DOMÍNGUEZ-CRUZ et al., 2018; SHAO et al., 2015; SHAO et al., 2018). A resolução alcançada foi de $0,019^\circ\text{C}$ utilizando o Anritsu MS9740A para aquisição do espectro eletromagnético refletido.

Embora os testes terem sido realizados entre a faixa de 18 à 42°C , é provável que o sensor opere com a mesma sensibilidade para faixas de temperatura maiores,

dado a sua alta linearidade e aos resultados de outros trabalhos que também utilizaram interferômetros de Sagnac como sensores de temperatura para maiores amplitudes térmicas (DOMÍNGUEZ-CRUZ et al., 2018; SHI; LI; CHEN, 2018; REYES-VERA; CORDEIRO; TORRES, 2017).

É importante lembrar que o valor do mínimo intervalo de observação está relacionado à sensibilidade do sistema, quanto maior a sensibilidade, mais frequentemente devem ser realizadas as observações para que não existam erros de rastreo do pico, logo tal característica deve ser considerada na hora de projetar um sensor do tipo para algum determinado processo.

Portanto, temos um sensor de temperatura com uma sensibilidade elevada e linear, ampla faixa de medição, montagem simples e relativamente barata, além de todos os outros benefícios intrínsecos aos sensores ópticos previamente descritos. Entretanto, devido a sua fragilidade e susceptibilidade à interferência provenientes de mudanças em seu posicionamento, é aconselhável a fixação do sensor, para que a alteração de sua acomodação não provoque erros de leitura.

5 Interferômetro de Sagnac como sensor de temperatura utilizando uma EDF

Apesar de não ser caracterizada como uma fibra HiBi, as fibras dopadas com érbio podem conter uma certa birrefringência residual, isto ocorre devido a imperfeições no processo de fabricação, que incluem elipsoidalidade do núcleo, estresse na estrutura interna e não-homogeneidades em geral (ROJAS-SANCHEZ; TENTORI, 2020; TENTORI et al., 2007).

Como discutido anteriormente no Capítulo 4, fibras birrefringentes podem ser utilizadas como elementos sensores em interferômetros de Sagnac para a medição de temperatura. Portanto, este capítulo tem por objetivo, pela primeira vez, explorar a viabilidade do uso de um EDF em substituição à PMF, para isso será descrito o processo de aquisição de dados e analisados os resultados obtidos.

5.1 Montagem do interferômetro.

A montagem do interferômetro para a obtenção dos dados experimentais consiste na utilização de um analisador de espectro óptico Anritsu MS9740A tanto para aquisição do espectro refletido quanto como fonte luminosa, através de sua fonte banda larga de 60 nm centrada em 1544 nm e com 200 μW de potência de pico, uma fibra M5-980-125 da FiberCore com cerca de 13 m de comprimento (FIBERCORE, 2013), uma estufa de esterilização e secagem com temperatura controlável da Ethik Technology, além de componentes ópticos como circulador, acoplador e controlador de polarização, como mostra a Figura 17.

Como o valor de birrefringência da fibra M5-980-125 não foi informada pelo fabricante, esta foi estimada utilizando-se a Equação 4.1 anteriormente mencionada. O valor calculado foi de aproximadamente $2,1 \times 10^{-5}$ a 25°C , número cerca de dez vezes inferior quando comparado ao de fibras classificadas como de alta birrefringência, que possuem uma ordem de grandeza de 10^{-4} (FRAZÃO; BAPTISTA; SANTOS, 2007).

5.2 Resultados e discussão

A temperatura do forno foi monitorada e as observações realizadas periodicamente. Após esperar cerca de 10 minutos para a estabilização da temperatura, a leitura do espectro refletido entre 1570 e 1625 nm era realizada pelo OSA. Foram realizadas medições para 8 diferentes temperaturas que variaram entre $25,6$ e $38,9^\circ\text{C}$, como exibido pela Figura 18.

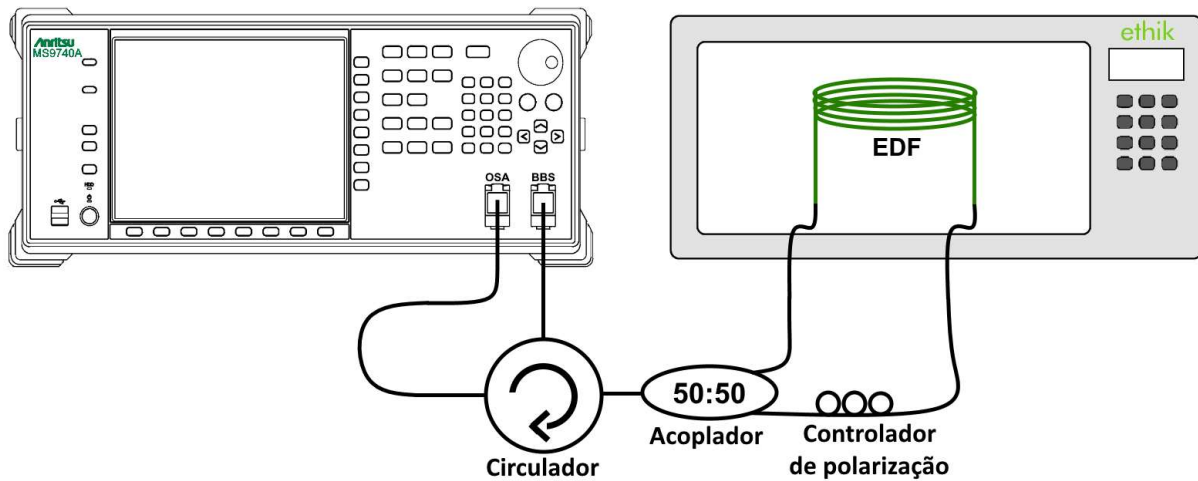


Figura 17 – Montagem do interferômetro de Sagnac para medição de temperatura utilizando uma EDF como elemento sensor.

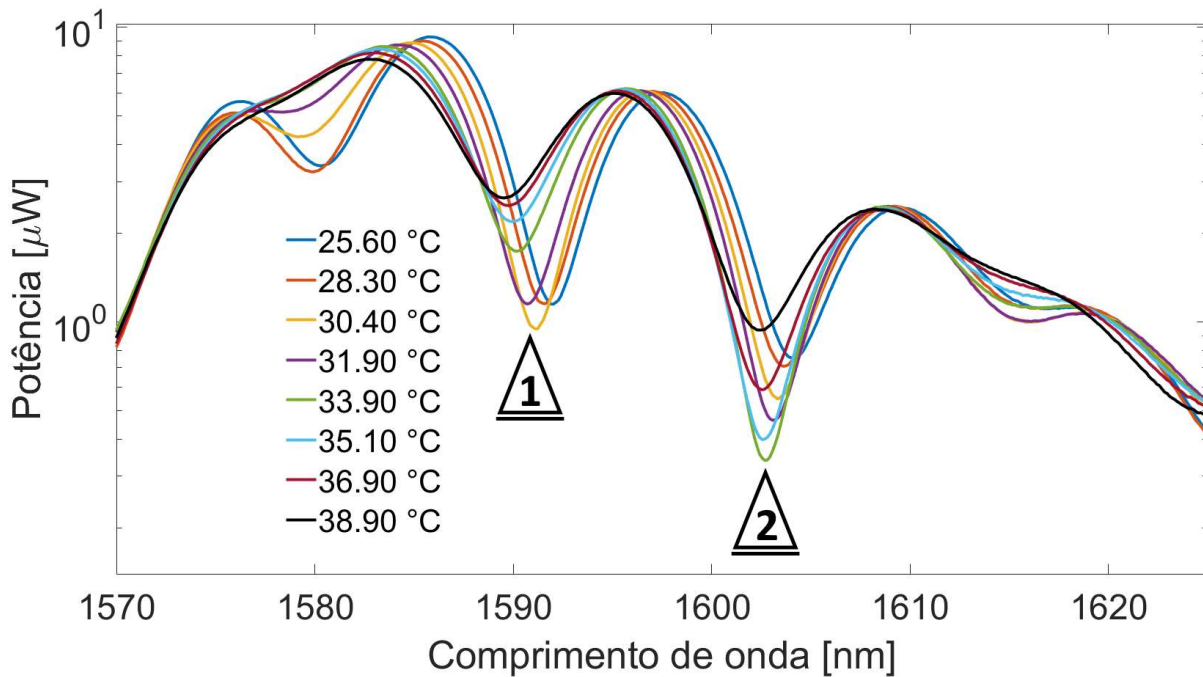


Figura 18 – Espectro refletido das observações realizadas utilizando uma EDF como elemento sensor para medições de temperatura.

Diferentemente do caso do sensor de temperatura explorado no capítulo anterior, foram obtidas respostas mais lineares ao se analisar o deslocamento dos vales do espectro, e não os picos. Foram selecionadas as duas regiões indicadas na Figura 18 para análise como vale 1 e 2. Estas regiões foram selecionadas por apresentarem claras depressões para toda amplitude térmica observada, ao contrário de regiões próximas 1580 e 1615 nm nas quais há um achatamento da curva.

O formato das curvas não nos remete claramente a um formato cossenoidal como os resultados do Capítulo 4, isso ocorre devido à curva de absorção característica do EDF e sua dependência com a temperatura (BOLSHTYANSKY; CONTI; WYSOCKI,

2000; YUCEL; ASLAN; BURUNKAYA, 2020), dependência esta que foi atribuída ao achatamento da curva em certas regiões do espectro em decorrência do aquecimento da fibra.

Para melhor visualizar as regiões 1 e 2 destacadas, a Figura 19 exibe ambas faixas de interesse.

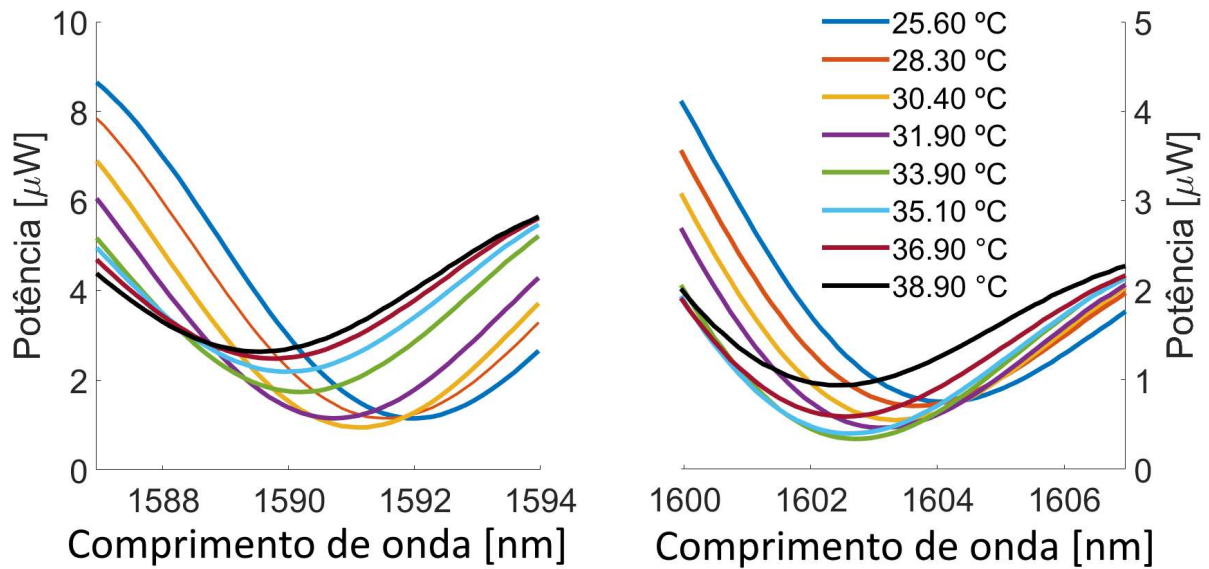


Figura 19 – Espectro refletido das observações realizadas utilizando uma EDF como elemento sensor para medições de temperatura.

Utilizando-se do deslocamento dos vales das regiões 1 e 2 do espectro refletido podemos traçar uma relação entre este movimento e a variação de temperatura como exibido na Figura 20.

Ao examinar o deslocamento dos mínimos locais das regiões de interesse 1 e 2, fica evidente a sua correlação com a temperatura, expressa em nos valores dos coeficientes de determinação (R^2) de 0.967 e 0.980 respectivamente. Também é possível calcular a sensibilidade, que neste caso foi diferente para os dois vales analisados, sendo de -147 pm/°C e -214 pm/°C para a primeira e segunda região, respectivamente. Tais sensibilidades resultam em uma resolução de até 0,1402 °C ao se utilizar o Anritsu MS9740A como analisador de espectro.

Assim como no capítulo anterior, tal deslocamento do espectro eletromagnético refletivo é atribuído às mudanças no comprimento e birrefringência da fibra devido ao processo de expansão térmica e características termo-ópticas do material (SHAO et al., 2018). Os desvios entre a regressão linear e as observações podem ser atribuídos ao caráter de aquecimento não homogêneo do forno, visto que a resistência utilizada para regular a temperatura interna está localizada apenas de um dos lados, além da resolução do termômetro de referência não ser tão alta (ETHIK, 2021).

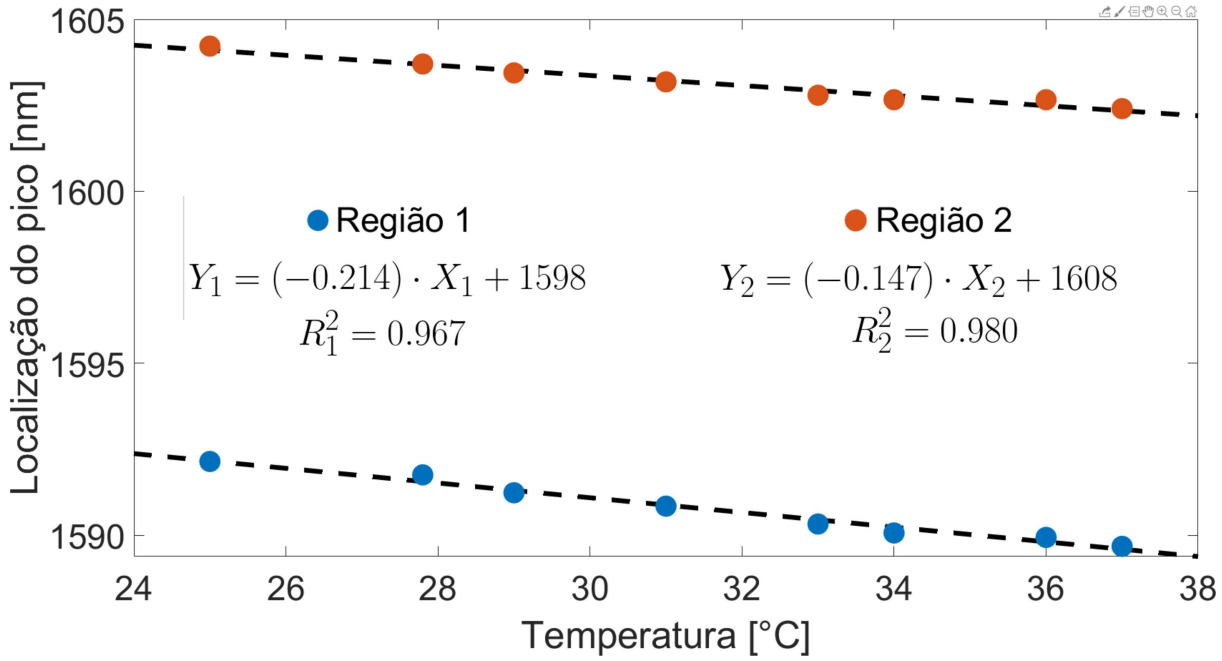


Figura 20 – Variação da localização dos vales das regiões 1 e 2 em função da temperatura.

Para estimar o máximo alcance operacional teórico do sensor proposto é necessário usar as sensibilidades obtidas para calcular a região em que ambos vales podem estar em temperaturas distintas, ou seja, fazendo com que a resposta do sensor perca sua característica injetiva (Equação 3.9). Existirá um limite numérico entre as regiões 1 e 2 da Figura 18 em que ambos os vales poderão estar, seja o vale 1 devido a um aumento da temperatura, ou o vale 2 pela diminuição dela.

Para encontrar este limite imaginário, temos L_1 e L_2 sendo a localização dos vales 1 e 2 à 25,6 °C além de suas respectivas sensibilidades S_1 e S_2 , a máxima T_{max} e a mínima T_{min} variação de temperatura (sendo 25,6°C a referência). Com isso, podemos escrever a Equação 5.1.

$$L_1 + S_1 \cdot (T_{min} - 25.6) = L_2 + S_2 \cdot (T_{max} - 25.6) \quad (5.1)$$

Rearranjando os termos para isolar as variáveis de temperatura e substituindo as constantes, temos a Equação 5.2.

$$T_{max} = 1.4579 \cdot T_{min} + 70.65 \quad (5.2)$$

Como indicado pela Equação 5.2, o alcance teórico do sistema de medição é variável, dependendo da aplicação desejada. Devido às limitações do tempo de uso do laboratório durante a pandemia de COVID-19, não foi possível realizar medições visando explorar os limites da faixa de medição do sensor desenvolvido, portanto ao assumir que a resposta se mantenha linear por uma ampla faixa de temperatura, podemos ter, por exemplo, uma

medição entre 0,00 e 70,65°C, ou ainda entre 20,13 à 100,00°C. Tal versatilidade faz com que o sensor aqui proposto tenha uso em diversas aplicações sem haver a necessidade da mudança de sua montagem física.

Tal resultado demonstra que uma EDF totalmente passiva dentro de um laço de Sagnac pode ser uma opção interessante para a medição de temperatura, devido a sua sensibilidade e linearidade para um sistema sensor que pode ser facilmente interrogado para uma ampla faixa de temperaturas. Tal alcance operacional se demonstrou superior ao apresentado no Capítulo 3 devido ao valor de sensibilidade ser inferior quando comparada à PMF como elemento sensor. Portanto os resultados obtidos indicam ser possível utilizar um método de interrogação mais simples e ainda assim com uma resposta à variação de temperatura superior a apresentadas por FBGs.

5.3 Considerações finais

Foi apresentado neste trabalho, pela primeira vez, a construção de um sistema de medição de temperatura utilizando 13 m de uma EDF como elemento sensor, atingindo sensibilidades de até -214 pm/°C com uma alta linearidade e com um alcance dinâmico. Os resultados demonstram que o uso de tal dispositivo é uma opção viável para aplicações tanto no meio de pesquisas acadêmicas quanto na indústria devido à sua resposta e suas características intrínsecas por ser um sensor óptico em fibra como, por exemplo, ser seguro para uso em áreas classificadas, dimensões e peso reduzidos, além de poder ser instalado à grande distância do interrogador.

Trabalhos futuros incluem a melhor compreensão e uso de outros efeitos relacionados à presença de dopantes terra-rara em fibras de sílica para assim combinar a medição de múltiplas variáveis simultaneamente. Outra possibilidade é utilizar a propriedade de alteração da curva de absorção e emissão da EDF em montagens semelhantes, visando a construção de filtros ópticos regulados por temperatura para aplicações no estudo de LASER.

6 Conclusão

Este trabalho foi realizado com o intuito de estudar montagens em fibra para aplicações de sensoriamento, e os resultados que aqui foram apresentados e discutidos enfatizam a viabilidade da utilização destes sistemas ópticos de medição, em especial o interferômetro de Sagnac. Tais dispositivos apresentaram uma resposta altamente linear, sensível e com uma grande amplitude operacional, além de seus benefícios como a possibilidade de uso em áreas classificadas, instalação do elemento sensor a quilômetros de distância do interrogador, dimensões e massa reduzidas, flexibilidade, além de sua inerência a interferência por campos elétricos, magnéticos e gravitacionais externos.

Em contrapartida aos métodos existentes que utilizam geradores de frequência para alterar o índice de refração de uma célula Pokels, o Capítulo 3 demonstrou, através de simulações, como a montagem proposta para a medição de vazão utilizando um elemento óptico passivo para produzir o atraso de fase base, desta forma diminuindo a complexidade e custo do sistema de medição. A sensibilidade calculada varia conforme os parâmetros físicos de instalação, porém, para o caso definido arbitrariamente como referência, esse valor foi de $2,59 \times 10^{-1} mW/ms^{-1}$, que para uma resolução de $2.31 \mu W$ do interrogador, capaz de perceber alterações de até 8,9 mm/s na velocidade média da vazão ou de $7 \times 10^{-5} m^3/s$ em vazão volumétrica. Dada tal sensibilidade, resolução e amplitude operacional é possível deduzir que tal sensor pode ser uma opção interessante para uso laboratorial e industrial.

No Capítulo 4, temos os resultados de simulações numéricas e experimentais do funcionamento de um sensor de temperatura em fibra utilizando-se de uma PMF no laço de um interferômetro Sagnac como elemento sensor. Foi possível comparar os resultados obtidos experimentalmente com os dados simulados e com isso, evidenciar o fenômeno que embasa o funcionamento do sensor. Foram obtidos resultados próximos aos apresentados em trabalhos similares presentes na literatura, e apresentada a técnica de rastreamento de pico utilizada, bem como suas limitações e condições de operação. A sensibilidade linear de $-1,62 nm/^{\circ}C$ e a resolução de $1,85 \times 10^{-3} ^{\circ}C$ obtidas o torna viável para aplicações que demandem alta precisão como, por exemplo, o controle de processos isotérmicos e caracterização de reações químicas.

Por fim, o Capítulo 5 trouxe pela primeira vez na literatura, por meio da análise dos resultados experimentais, a caracterização de um interferômetro de Sagnac como sensor de temperatura utilizando uma EDF como elemento sensor. Ao utilizar-se da birrefringência residual presente na fibra, foi possível obter sensibilidades lineares de até $-214 pm/^{\circ}C$ para uma ampla faixa de medição através do rastreamento dos vales presentes no padrão de interferência refletido. Tal dispositivo pode ser empregado para a detecção

direta de temperatura, porém, através de mais pesquisas, também possui potencial para ser empregado como elemento amplificador controlado por temperatura na área do estudo de LASER ou ainda como um sensor multivariável através da exploração de outros efeitos não-lineares da EDF.

Investigações futuras incluem a montagem física do sensor de vazão apresentado no Capítulo 3 de modo a estudar sua viabilidade prática, bem como o estudo da possibilidade de seu uso para escoamentos multifásicos e heterogêneos. O uso de montagens mais complexas para os interferômetros apresentados no Capítulo 4 e Capítulo 5 com o objetivo de melhorar a sensibilidade e averiguar sua capacidade de detecção multivariável também é uma linha a se explorar.

Referências

- ADDANKI, S.; AMIRI, I.; YUPAPIN, P. Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers. *Results in Physics*, Elsevier BV, v. 10, p. 743–750, set. 2018. Citado na página 43.
- AGRAWAL, G. *Fiber-Optic Communication System*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- AL-HAYALI, S. K.; AL-JANABI, A. H. Effect of graphene nanoparticle coating on the detection performance of cladding etched no-core fiber interferometer sensor for relative humidity measurement. *Optical Fiber Technology*, Elsevier BV, v. 55, p. 102154, mar. 2020. Citado na página 32.
- AMERICA', O. S. of. *Handbook of Optics Third Edition, 5 Volume Set*. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 9780071701600. Citado na página 29.
- ASADZADEH, A.; ARASHPOUR, M.; LI, H.; NGO, T.; BAB-HADIASHAR, A.; RASHIDI, A. Sensor-based safety management. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 113, p. 103128, 5 2020. ISSN 0926-5805. Citado na página 23.
- AVELLAR, L.; DELGADO, G.; MARQUES, C.; FRIZERA, A.; LEAL-JUNIOR, A.; ROCON, E. Polymer optical fiber-based smart garment for impact identification and balance assessment. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, 2021. Citado na página 29.
- BAI, C.; DALLASEGA, P.; ORZES, G.; SARKIS, J. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 229, p. 107776, 11 2020. ISSN 0925-5273. Citado na página 23.
- BAI, Y.; MIAO, Y.; ZHANG, H.; YAO, J. Simultaneous measurement of temperature and relative humidity based on a microfiber sagnac loop and mos 2. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 38, n. 4, p. 840–845, 2020. Citado na página 32.
- BALDWIN, C. Fiber optic sensors in the oil and gas industry: Current and future applications. Elsevier, p. 211–236, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 47.
- BAO, Y.; HUANG, Y.; HOEHLER, M. S.; CHEN, G. Review of fiber optic sensors for structural fire engineering. *Sensors 2019, Vol. 19, Page 877*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, p. 877, 2 2019. Citado na página 23.
- 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 29.
- 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. Citado na página 59.
- BUDINSKI, V.; DONLAGIC, D. Fiber-optic sensors for measurements of torsion, twist and rotation: A review. *Sensors 2017, Vol. 17, Page 443*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, p. 443, 2 2017. Citado na página 23.

CARVALHO, R. T. de; BLAKE, J. Slow-flow measurements and fluid dynamics analysis using the fresnel drag effect. *Applied Optics*, The Optical Society, v. 33, n. 25, p. 6073, set. 1994. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 45.

CARVALHO, R. T. de; BLAKE, J. N.; SANDERS, G. A. titlesagnac interferometers for accurate measurements of true nonreciprocal effects/title. In: DEPAULA, R. P. (Ed.). *Fiber Optic and Laser Sensors XI*. [S.l.]: SPIE, 1994. Citado na página 35.

CHEN, B.; BAO, Q.; TONG, L. Direct observation of multimode interference in rare-earth doped micro/nanofibers. *Optics Express*, The Optical Society, v. 27, n. 19, p. 26728, set. 2019. Citado na página 39.

CHEN, J.; WANG, J.; LI, X.; SUN, L.; LI, S.; DING, A. 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 47.

CNI; IEL; ELETROBRÁS. *Instrumentação e Controle - Guia Básico*. Brasília: IEL/NC, 2008. Citado na página 28.

CUI, J.; LIU, H.; LI, X.; JIANG, S.; ZHANG, B.; SONG, Y.; ZHANG, W. 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 47.

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. Citado na página 47.

CUI, Y.; JIANG, Y.; LIU, T.; HU, J.; JIANG, L. A dual-cavity fabry-perot interferometric fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of high-temperature and high-gas-pressure. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 80582–80587, 2020. Citado na página 47.

CUI, Y.; SHUM, P. P.; HU, D. J. J.; WANG, G.; HUMBERT, G.; DINH, X.-Q. Temperature sensor by using selectively filled photonic crystal fiber sagnac interferometer. *IEEE Photonics Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 4, n. 5, p. 1801–1808, out. 2012. Citado na página 47.

DING, Z.; TAN, Z.; GAO, Y.; WU, Y.; YIN, B. Strain and temperature discrimination using a fiber bragg grating concatenated with PANDA polarization-maintaining fiber in a fiber loop mirror. *Optik*, Elsevier BV, v. 221, p. 165352, nov. 2020. Citado na página 30.

DOMÍNGUEZ-CRUZ, R.; MAY-ARRIOJA, D. A.; MARTÍNEZ-MANUEL, R.; LOPEZ-CORTES, D. 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 4 vezes nas páginas 47, 49, 54 e 55.

DUNN, W. *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Controls*. Nova Iorque: Mac Draw Hill Education, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 35.

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 47.

EID, M. M. A.; RASHED, A. N. Z.; EL-DIN, E. S. Simulation performance signature evolution of optical inter satellite links based booster EDFA and receiver preamplifiers. *Journal of Optical Communications*, Walter de Gruyter GmbH, v. 0, n. 0, out. 2020. Citado na página 32.

ETHIK. *Estufa para esterilização e secagem 400-TD*. 2021. Disponível em: <www.ethik.com.br/produto/estufa-para-esterilizacao-e-secagem>. Citado na página 59.

FARANDA, R. S.; FUMAGALLI, K.; BIELLI, M. Lithium-ion batteries for explosive atmosphere. In: *2019 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC EUROPE)*. [S.l.]: IEEE, 2019. Citado na página 35.

FENG, W.; TSUBOKAWA, M. High birefringence and polarization-holding ability in nanosized optical fibers with si bowtie cores. *Optics Communications*, Elsevier BV, v. 466, p. 125603, jul. 2020. Citado na página 30.

FERREIRA, M. F.; CASTRO-CAMUS, E.; OTTAWAY, D. J.; LÓPEZ-HIGUERA, J. M.; FENG, X.; JIN, W.; JEONG, Y.; PICQUÉ, N.; TONG, L.; REINHARD, B. M. et al. Roadmap on optical sensors. *Journal of Optics*, IOP Publishing, v. 19, n. 8, p. 083001, 2017. Citado na página 23.

FIBERCORE. *Erbium Doped Fiber MetroGain*. [S.l.], 2013. Rev. 1. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 57.

FLORES-BRAVO, J.; ILLARRAMENDI, M.; ZUBIA, J.; VILLATORO, J. Optical fiber interferometer for temperature-independent refractive index measuring over a broad range. *Optics & Laser Technology*, Elsevier BV, v. 139, p. 106977, jul. 2021. Citado na página 32.

FRAJUCA, C.; BORTOLI, F.; PRADO, A.; MAGALHAES, N.; SILVA, W. D.; SOUZA, R. Modeling a calibrator for laser interferometer gravitational wave detectors. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2021. v. 1730, n. 1, p. 012083. Citado na página 32.

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. Citado na página 57.

FU, C.; LI, P.; BAI, Z.; WANG, Y. Helical long period fiber grating inscribed in elliptical core polarization-maintaining fiber. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 59378–59382, 2021. Citado na página 30.

FU, H.; WANG, Q.; DING, J.; ZHU, Y.; ZHANG, M.; YANG, C.; WANG, S. Fe₂O₃ nanotube coating micro-fiber interferometer for ammonia detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier BV, v. 303, p. 127186, jan. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 47.

GALDIERI, F. J.; SUTILI, T.; MELNIKOFF, N.; BORDONALLI, A. C.; CONFORTI, E. Influence of exterior acoustic noise on narrow linewidth laser measurements using self-homodyne optical fiber interferometer. *Optik*, Elsevier BV, v. 204, p. 164101, fev. 2020. Citado na página 32.

GASHO, E. G.; KISELEVA, A. I. Analysis of energy-saving measures in industrial steam supply systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, v. 791, p. 012042, abr. 2020. Citado na página 40.

GIANCOLI, D. C. *Physics*. [S.l.: s.n.], 2021. ISBN 9780321625922. Citado na página 36.

HAN, X.; ZHAO, L.; WANG, J.; WANG, L.; HUANG, M.; CHEN, C.; YANG, P.; LI, Z.; ZHU, N.; WANG, S. et al. High-accuracy differential resonant pressure sensor with linear fitting method. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, IOP Publishing, v. 31, n. 4, p. 045006, 2021. Citado na página 28.

HAN, Y.; LIU, B.; WU, Y.; MAO, Y.; WU, J.; ZHAO, L.; NAN, T.; WANG, J.; TANG, R.; ZHANG, Y.; LIU, Y. Ultra-compact silicon-microcap based improved michelson interferometer high-temperature sensor. *Opt. Express*, OSA, v. 29, n. 5, p. 6703–6713, Mar 2021. Citado na página 47.

HE, X.; MA, C.; WANG, X.; WANG, Z.; YUAN, L. Pressure vector sensor based on an orthogonal optical path sagnac interferometer. *Optics Express*, The Optical Society, v. 28, n. 6, p. 7969, mar. 2020. Citado na página 32.

IBRAHIM, R. I.; ODAH, M. K.; SHAFEEQ, D. A.; SALMAN, A. D. Drag reduction and flow enhancement in iraqi crude oil pipelines using PMMA polymer and CNTs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, v. 765, p. 012004, mar. 2020. Citado na página 40.

IEMA. *Relatório da Qualidade do Ar na Grande Vitória*. [S.l.], 2020. Disponível em: iema.es.gov.br/qualidadedoar/relatorios. Citado na página 45.

INGRAO, C.; EVOLA, R. S.; CANTORE, P.; BERNARDI, P. D.; BORGHI, A. D.; VESCE, E.; BELTRAMO, R. The contribution of sensor-based equipment to life cycle assessment through improvement of data collection in the industry. *Environmental Impact Assessment Review*, Elsevier, v. 88, p. 106569, 5 2021. ISSN 0195-9255. Citado na página 23.

INMETRO. *Portaria Inmetro nº 319 de 23 de outubro de 2009*. Brasília: [s.n.], 2009. Citado na página 27.

JIANG, J.; GENG, M.; LIU, Q.; ZHANG, Z. Design of a reconfigurable optical filter based on triple-ring-assisted mach-zenhnder interferometer with large bandwidth tuning capability. *Acta Photonica Sinica*, v. 50, p. 713002, 7 2021. ISSN 1004-4213. Citado na página 24.

KOTB, H. E.; SABRY, Y. M.; ABDALLAH, M. S.; SAYED, M. O.; OMRAN, H. Tunable microwave single-bandpass photonic filter based on amplified mems-based gires-tournois interferometer. *National Radio Science Conference, NRSC, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 2020-September, p. 216–221, 9 2020. Citado na página 24.

KÜHNEN, J.; SONG, B.; SCARSELLI, D.; BUDANUR, N. B.; RIEDL, M.; WILLIS, A. P.; AVILA, M.; HOF, B. Destabilizing turbulence in pipe flow. *Nature Physics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 14, n. 4, p. 386–390, jan. 2018. Citado na página 35.

KYSELAK, M.; DVORAK, F.; MASCHKE, J.; VLCEK, C. Phase shift response of birefringent PANDA fiber after the end of thermal exposure during recovery to ambient temperature. *Optical and Quantum Electronics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 52, n. 10, set. 2020. Citado na página 31.

LAUDA. *LAUDA ECO SILVER - Operating instructions*. [S.l.], 2011. Rev. A1. Citado na página 49.

LAUE, M. Die mitführung des lichtes durch bewegte körper nach dem relativitätsprinzip. *Annalen der Physik*, Wiley, v. 328, n. 10, p. 989–990, 1907. Citado na página 36.

LEAL-JUNIOR, A.; CASAS, J.; MARQUES, C.; PONTES, M. J.; FRIZERA, A. Application of additive layer manufacturing technique on the development of high sensitive fiber bragg grating temperature sensors. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 12, p. 4120, 2018. Citado na página 47.

LEAL-JUNIOR, A. G.; DÍAZ, C. A.; FRIZERA, A.; MARQUES, C.; RIBEIRO, M. R.; PONTES, M. J. Simultaneous measurement of pressure and temperature with a single fbg embedded in a polymer diaphragm. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 112, p. 77–84, 2019. Citado na página 47.

LEAL-JUNIOR, A. G.; DIAZ, C. R.; MARQUES, C.; FRIZERA, A.; PONTES, M. J. Analysis of viscoelastic properties influence on strain and temperature responses of fabry-perot cavities based on uv-curable resins. *Optics & Laser Technology*, Elsevier, v. 120, p. 105743, 2019. Citado na página 47.

LEONOV, O. A.; SHKARUBA, N. Z.; CHERKASOVA, E. I.; ODINTSOVA, A. A. Quality assessment of temperature measurements in incoming inspection of raw meat. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, v. 1515, p. 032030, abr. 2020. Citado na página 47.

LI, C.; YANG, W.; YU, X.; FAN, J.; XIONG, Y.; YANG, Y.; LI, L. A knotted shape core cladding optical fiber interferometer for simultaneous measurement of displacement and temperature. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, Elsevier BV, v. 39, p. 100778, maio 2020. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 47.

LI, X.-G.; ZHAO, Y.; ZHOU, X.; CAI, L. High sensitivity all-fiber sagnac interferometer temperature sensor using a selective ethanol-filled photonic crystal fiber. *Instrumentation Science & Technology*, Informa UK Limited, v. 46, n. 3, p. 253–264, nov. 2017. Citado na página 47.

LI, Z.; YAO, Z. J.; HAIDRY, A. A.; PLECENIK, T.; XIE, L. J.; SUN, L. C.; FATIMA, Q. Resistive-type hydrogen gas sensor based on tio2: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, Pergamon, v. 43, p. 21114–21132, 11 2018. ISSN 0360-3199. Citado na página 23.

LIU, M.; GONG, B. A three-dimensional laser interferometer gravitational-wave detector. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, v. 10, n. 1, p. 1–6, 2020. Citado na página 32.

LIU, Q.; XING, L.; YAN, S.; LV, L.; LIU, Z. Sensing characteristics of photonic crystal fiber sagnac interferometer based on novel birefringence and vernier effect. *Metrologia*, IOP Publishing, v. 57, n. 3, p. 035002, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 49.

- MA, J.; WU, S.; CHENG, H.; YANG, X.; WANG, S.; LU, P. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on encapsulated s-taper fiber modal interferometer. *Optics Laser Technology*, v. 139, p. 106933, 2021. ISSN 0030-3992. Citado na página 47.
- MA, M.; CHEN, H.; LI, S.; JING, X.; ZHANG, W.; LIU, Y.; ZHU, E. Highly sensitive temperature sensor based on sagnac interferometer with liquid crystal photonic crystal fibers. *Optik*, Elsevier BV, v. 179, p. 665–671, fev. 2019. Citado na página 47.
- MANGELL, A. Flow measurement techniques. *World Pumps*, Elsevier BV, v. 2008, n. 507, p. 32–34, dez. 2008. Citado na página 35.
- MOLLAH, M. A.; USHA, R. J.; TASNIM, S.; AHMED, K. Detection of cancer affected cell using sagnac interferometer based photonic crystal fiber refractive index sensor. *Optical and Quantum Electronics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 52, n. 9, set. 2020. Citado na página 32.
- MOLLAH, M. A.; YOUSUFALI, M.; FAYSAL, M. R. B. A.; HASAN, M. R.; HOSSAIN, M. B.; AMIRI, I. S. Highly sensitive photonic crystal fiber salinity sensor based on sagnac interferometer. *Results in Physics*, Elsevier B.V., v. 16, p. 103022, 3 2020. ISSN 22113797. Citado na página 24.
- NAG, A.; MITRA, A.; MUKHOPADHYAY, S. C. Graphene and its sensor-based applications: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 270, p. 177–194, 2 2018. ISSN 0924-4247. Citado na página 23.
- NAZEMI, H.; JOSEPH, A.; PARK, J.; EMADI, A. Advanced micro- and nano-gas sensor technology: A review. *Sensors 2019, Vol. 19, Page 1285*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, p. 1285, 3 2019. Citado na página 23.
- NORTHROP, R. *Introduction to instrumentation and measurements*. Florida: CRC Press, 2018. Citado na página 24.
- OH, S.; HABERL, J. S.; BALTAZAR, J. C. Analysis methods for characterizing energy saving opportunities from home automation devices using smart meter data. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 216, p. 109955, 6 2020. ISSN 0378-7788. Citado na página 23.
- OHARA, Y.; SUZUKI, T.; CHOI, S.; SASAKI, O. Vibration distribution measurement using downsampling phase-shifting interferometer. *Optical Engineering*, SPIE-Intl Soc Optical Eng, v. 59, p. 1, 3 2020. ISSN 0091-3286. Citado na página 24.
- PADRON, I. *Interferometry*. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 9789535104032. Citado na página 32.
- PECORARO, V.; PETRI, D.; COSTANTINO, G.; SQUIZZATO, A.; MOJA, L.; VIRGILI, G.; LUCENTEFORTE, E. *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 47.
- PEREIRA, K.; COIMBRA, W.; LAZARO, R.; FRIZERA-NETO, A.; MARQUES, C.; LEAL-JUNIOR, A. G. Fbg-based temperature sensors for liquid identification and liquid level estimation via random forest. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 21, n. 13, p. 4568, 2021. Citado na página 47.

- PEVEC, S.; DONLAGIĆ, D. Multiparameter fiber-optic sensors: a review. *Optical Engineering*, SPIE-Intl Soc Optical Eng, v. 58, n. 07, p. 1, jul 2019. ISSN 0091-3286. Citado na página 23.
- PHADNIS, M. G. Real time linearization of sensor response using a novel polynomial estimation method. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, IEEE, v. 23, n. 1, p. 73–78, 2020. Citado na página 28.
- PIZZAIA, J. P. L.; CASTELLANI, C. E. S.; LEAL-JUNIOR, A. G. Numerical analysis of a sagnac interferometer as a monophasic fluid flow meter sensor. In: SBMO (Ed.). *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica*. [S.l.], 2020. p. 930. ISSN 978-65-89532-00-2. Citado na página 25.
- POLE, M.; SADEGHILARIDJANI, M.; SHITTU, J.; AYYAGARI, A.; MUKHERJEE, S. High temperature wear behavior of refractory high entropy alloys based on 4-5-6 elemental palette. *Journal of Alloys and Compounds*, Elsevier BV, v. 843, p. 156004, nov. 2020. Citado na página 47.
- RAJAN, G. *Optical Fiber Sensors - Advanced Techniques and applications*. Florida: CRC Press, 2015. Citado na página 23.
- REIDER, G. A. *Photonics*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016. Citado na página 31.
- REYES-VERA, E.; CORDEIRO, C. M. B.; TORRES, P. Highly sensitive temperature sensor using a sagnac loop interferometer based on a side-hole photonic crystal fiber filled with metal. *Applied Optics*, The Optical Society, v. 56, n. 2, p. 156, jan. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 55.
- ROJAS-SANCHEZ, A.; TENTORI, D. Simple method for the characterization of birefringence of single-mode optical fibers. *OSA Continuum*, The Optical Society, v. 3, n. 6, p. 1650, jun. 2020. Citado na página 57.
- RONG, P.; ZHANG, C.; WARD, W. E.; ZHU, H.; DAI, H. Compensation optimization for a static mars wind imaging michelson interferometer. *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier Ltd, v. 142, p. 106589, 7 2021. ISSN 01438166. Citado na página 24.
- RUAN, J. Fiber curvature sensor based on concave-heterotypic cascaded fiber sagnac interferometer. *Microwave and Optical Technology Letters*, Wiley, v. 62, n. 11, p. 3645–3649, jun. 2020. Citado na página 32.
- SARMA, P.; SINGH, H. K.; BEZBORUAH, T. Fiber optic capillary flow viscometer. *IEEE Sensors Letters*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 3, n. 2, p. 1–4, fev. 2019. Citado na página 41.
- SCHUBERT, C.; ABEND, S.; GERSEMAN, M.; GEBBE, M.; SCHLIPPERT, D.; BERG, P.; RASEL, E. M. Multi-loop atomic Sagnac interferometry. feb 2021. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- SHAMY, R. S. E.; KHALIL, D.; SWILLAM, M. A. Mid infrared optical gas sensor using plasmonic mach-zehnder interferometer. *Scientific Reports*, Nature Research, v. 10, p. 1–9, 12 2020. ISSN 20452322. Citado na página 24.

SHAO, L.; HU, J.; LU, H.; DU, J.; WU, T.; WANG, Y. High-sensitivity temperature sensor based on polarization maintaining fiber sagnac loop. *Photonic Sensors*, Springer Science and Business Media LLC, v. 9, n. 1, p. 25–32, out. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 47, 54 e 59.

SHAO, L.-Y.; LUO, Y.; ZHANG, Z.; ZOU, X.; LUO, B.; PAN, W.; YAN, L. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic sagnac interferometers based on vernier-effect. *Optics Communications*, Elsevier BV, v. 336, p. 73–76, fev. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 54.

SHARBIRIN, A. S.; ZAINI, M. K. A.; BRAMBILLA, G.; RAHMAN, B. M. A.; GRATAN, K. T. V.; ISMAIL, M. F.; AHMAD, H. 3d-printed tilt sensor based on an embedded two-mode fiber interferometer. *IEEE Sensors Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 21, n. 6, p. 7565–7571, mar. 2021. Citado na página 32.

SHEN, T.; DAI, X.; ZHANG, D.; WANG, W.; FENG, Y. ZnO composite graphene coating micro-fiber interferometer for ultraviolet detection. *Sensors*, MDPI AG, v. 20, n. 5, p. 1478, mar. 2020. Citado na página 32.

SHI, M.; LI, S.; CHEN, H. A high-sensitivity temperature sensor based on sagnac interferometer employing photonic crystal fiber fully filled with ethanol. *Applied Physics B*, Springer Science and Business Media LLC, v. 124, n. 6, maio 2018. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 55.

SPITZER, D. W. *Industrial Flow Measurement*. [S.l.: s.n.], 2021. ISBN 9781556178719. Citado na página 35.

STARODUMOV, A. N.; ZENTENO, L. A.; MONZON, D.; ROSA, E. D. L. Fiber sagnac interferometer temperature sensor. *Applied Physics Letters*, AIP Publishing, v. 70, n. 1, p. 19–21, jan. 1997. Citado na página 47.

TEH, H. Y.; KEMPA-LIEHR, A. W.; WANG, K. I.-K. Sensor data quality: a systematic review. *Journal of Big Data 2020 7:1*, SpringerOpen, v. 7, p. 1–49, 2 2020. ISSN 2196-1115. Citado na página 23.

TENTORI, D.; AYALA-DÍAZ, C.; TREVIÑO-MARTÍNEZ, F.; MENDIETA-JIMÉNEZ, F. Evaluation of the residual birefringence of single-mode erbium-doped silica fibers. *Optics Communications*, Elsevier BV, v. 271, n. 1, p. 73–80, mar. 2007. Citado na página 57.

THORLABS. *Polarization-Maintaining Fiber: Panda Style PM1550-XP*. [S.l.], 2017. Rev. C. Citado na página 49.

TOBAL, F. H. F.; GALETI, J. H.; FELAO, L. H. V.; HIGUTI, R. T.; KITANO, C. Optical phase detection method for measurements and calibration of pockels cell-based sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 69, n. 12, p. 9822–9832, dez. 2020. Citado na página 45.

TORO, C.; AKHTAR, W. W. and Humza. *Implementing Industry 4.0: The Model Factory as the Key Enabler for the Future of Manufacturing*. Cham: Springer, 2021. Citado na página 23.

TRBALIC, B. *Implementation of the Fizeau aether drag experiment for an Undergraduate Physics Laboratory*. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 45.

TSELIKOV, A.; BLAKE, J. Sagnac-interferometer-based fresnel flow probe. *Applied Optics*, The Optical Society, v. 37, n. 28, p. 6690, out. 1998. Citado na página 35.

VILLA, E.; ARTEAGA-MARRERO, N.; RUIZ-ALZOLA, J. Performance assessment of low-cost thermal cameras for medical applications. *Sensors*, MDPI AG, v. 20, n. 5, p. 1321, fev. 2020. Citado na página 47.

VIRGILIO, A. D. D.; ALTUCCI, C.; BAJARDI, F.; BASTI, A.; BEVERINI, N.; CAPOZZIELLO, S.; CARELLI, G.; CIAMPINI, D.; FUSO, F.; GIACOMELLI, U. et al. Sensitivity limit investigation of a sagnac gyroscope through linear regression analysis. *The European Physical Journal C*, Springer, v. 81, n. 5, p. 1–9, 2021. Citado na página 32.

VIRGILIO, A. D. D.; BASTI, A.; BEVERINI, N.; BOSI, F.; CARELLI, G.; CIAMPINI, D.; FUSO, F.; GIACOMELLI, U.; MACCIONI, E.; MARSILI, P. et al. Underground sagnac gyroscope with sub-prad/s rotation rate sensitivity: Toward general relativity tests on earth. *Physical Review Research*, APS, v. 2, n. 3, p. 032069, 2020. Citado na página 32.

WAN, Y.; PAN, Y.; LU, J.; WU, B. Study on the optimization of metering characteristics of water flow standard device. In: *2019 Chinese Control Conference (CCC)*. [S.l.]: IEEE, 2019. Citado na página 35.

WANG, G.; LU, Y.; YANG, X.; DUAN, L.; YAO, J. Square-lattice alcohol-filled photonic crystal fiber temperature sensor based on a sagnac interferometer. *Applied Optics*, The Optical Society, v. 58, n. 8, p. 2132, mar. 2019. Citado na página 47.

WANG, Q.; MENG, H.; FAN, X.; ZHOU, M.; LIU, F.; LIU, C.; WEI, Z.; WANG, F.; TAN, C. Optical fiber temperature sensor based on a mach-zehnder interferometer with single-mode-thin-core-single-mode fiber structure. *Review of Scientific Instruments*, AIP Publishing LLC, v. 91, n. 1, p. 015006, 2020. Citado na página 47.

WEBSTER, E. Base-metal thermocouple tolerances and their utility in real-world measurements. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, fev 2021. ISSN 0957-0233. Citado na página 47.

WILLET, J.; KING, J.; WETSER, K.; DYKSTRA, J. E.; ESSINK, G. H. O.; RIJNAARTS, H. H. Water supply network model for sustainable industrial resource use a case study of zeeuws-vlaanderen in the netherlands. *Water Resources and Industry*, Elsevier BV, v. 24, p. 100131, dez. 2020. Citado na página 40.

XING, M. *Fabrication of single-crystal sapphire fibres for sensor applications*. Tese (Doutorado) — University of Glasgow, 2020. Citado na página 29.

XIONG, X.; MATSUKUMA, H.; SHIMIZU, Y.; GAO, W. 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, p. 094002, 9 2020. ISSN 13616501. Citado na página 24.

- YANKOV, M. P.; MOURA, U. C. de; ROS, F. D. Power evolution modeling and optimization of fiber optic communication systems with EDFA repeaters. *Journal of Lightwave Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 39, n. 10, p. 3154–3161, maio 2021. Citado na página 32.
- YI, D.; HUO, Z.; GENG, Y.; LI, X.; HONG, X. PDMS-coated no-core fiber interferometer with enhanced sensitivity for temperature monitoring applications. *Optical Fiber Technology*, Elsevier BV, v. 57, p. 102185, jul. 2020. Citado na página 32.
- YUAN, H.; WANG, Z.; XIA, L. Design of temperature and humidity detection system for a material warehouse based on GM. In: *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. [S.l.]: IEEE, 2020. Citado na página 47.
- 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 59.
- ZHANG, T.; ZHENG, Y.; WANG, C.; MU, Z.; LIU, Y.; LIN, J. A review of photonic crystal fiber sensor applications for different physical quantities. <https://doi.org/10.1080/05704928.2017.1376681>, Taylor and Francis, v. 53, p. 486–502, 7 2017. Citado na página 23.
- ZHAO, C.-L.; WANG, Z.; ZHANG, S.; QI, L.; ZHONG, C.; ZHANG, Z.; JIN, S.; GUO, J.; WEI, H. Phenomenon in an alcohol not full-filled temperature sensor based on an optical fiber sagnac interferometer. *Optics Letters*, The Optical Society, v. 37, n. 22, p. 4789, nov. 2012. Citado na página 47.
- ZHAO, J.; ZHAO, Y.; BAI, L.; ZHANG, Y. nan. Sagnac interferometer temperature sensor based on microstructured optical fiber filled with glycerin. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier BV, v. 314, p. 112245, out. 2020. Citado na página 47.
- ZHAO, Y.; DAI, M.; CHEN, Z.; LIU, X.; GANDHI, M. S. A.; LI, Q.; FU, H. Y. Ultrasensitive temperature sensor with vernier-effect improved fiber michelson interferometer. *Opt. Express*, OSA, v. 29, n. 2, p. 1090–1101, Jan 2021. Citado na página 47.
- ZHAPBASBAYEV, U.; RAMAZANOVA, G.; BOSSINOV, D. Z.; KENZHALIYEV, B. Flow and heat exchange calculation of waxy oil in the industrial pipeline. *Case Studies in Thermal Engineering*, Elsevier BV, v. 26, p. 101007, ago. 2021. Citado na página 40.
- ZHOU, X.; YU, Q.; PENG, W. Fiber-optic fabry–perot pressure sensor for down-hole application. *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, v. 121, p. 289–299, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 47.
- ZOU, L.; GE, C.; WANG, Z. J.; CRETU, E.; LI, X. Novel tactile sensor technology and smart tactile sensing systems: A review. *Sensors 2017, Vol. 17, Page 2653*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, p. 2653, 11 2017. Citado na página 23.