

Renan Costa Lazaro

**Medição de Densidade, Calor Específico e
Condutividade Térmica em Líquidos baseada
em Redes de Bragg**

Vitória, ES, Brasil

Maio 2021

Renan Costa Lazaro

Medição de Densidade, Calor Específico e Condutividade Térmica em Líquidos baseada em Redes de Bragg

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE/UFES)

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Gomes Leal Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt Castellani

Vitória, ES, Brasil

Maio 2021

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

C837 Costa Lazaro, Renan, 1992-
m Medição de Densidade, Calor Específico e Condutividade
Térmica em Líquidos baseada em Redes de Bragg / Renan Costa
Lazaro. - 2021.
90 f. : il.

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

I. Leal Júnior, Arnaldo. II. Castellani, Carlos. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV.
Título.

CDU: 621.3



UFES

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Credenciamento/MEC 609 de 18/03/2019

420ª ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Ata da sessão de defesa da 420ª Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, do aluno Renan Costa Lazaro, candidato ao grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Às nove horas do dia vinte e cinco de maio de dois mil e vinte um, via webconferência, o presidente da Comissão Examinadora, Prof. Arnaldo Gomes Leal Júnior, iniciou a sessão apresentando a Comissão constituída, além dele próprio, que é o Orientador, pelos professores Carlos Alberto Ferreira Marques (Examinador Externo) - UA, Carlos Eduardo Schmidt Castellani (Coorientador) - UFES e Anselmo Frizera Neto (Examinador Interno) - UFES. A seguir, o presidente passou a palavra ao candidato, que, em 50 minutos, apresentou a sua dissertação, intitulada "Medição de Densidade, Calor Específico e Condutividade Térmica em Líquidos baseada em Redes de Bragg". Finda a apresentação, o presidente passou a palavra aos membros da Comissão para procederem à arguição do candidato. Finda a arguição, o presidente convidou a Comissão para dirigir-se a uma sala virtual reservada, para deliberação. Após a deliberação, a Comissão convidou o candidato para acesso à sala virtual e o presidente informou aos presentes que a dissertação fora Aprovada. Logo após, o presidente declarou encerrada a sessão, e eu, Aline Oliveira Amaral, lavrei esta ata, que é assinada pelos membros da Comissão Examinadora. Vitória, 25/05/2021.

Carlos Alberto Ferreira Marques

Carlos Eduardo Schmidt Castellani

Anselmo Frizera Neto

Arnaldo Gomes Leal Júnior



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
ARNALDO GOMES LEAL JUNIOR - SIAPE 3106424
Departamento de Engenharia Mecânica - DEM/CT
Em 25/05/2021 às 10:56

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/196781?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
ANSELMO FRIZERA NETO - SIAPE 1834196
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT
Em 25/05/2021 às 14:59

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/197036?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
CARLOS EDUARDO SCHMIDT CASTELLANI - SIAPE 2302532
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT
Em 25/05/2021 às 18:17

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/197319?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
Reconhecido por meio da Portaria MEC nº 609, de 14/03/2019

ATESTADO DE PARTICIPAÇÃO

Atestamos, para os devidos fins, que **Carlos Alberto Ferreira Marques** participou como examinador externo da Sessão de Defesa de Mestrado em Engenharia Elétrica intitulada “Medição de Densidade, Calor Específico e Condutividade Térmica em Líquidos baseada em Redes de Bragg”, apresentada nesta data por Renan Costa Lazaro, candidato ao grau de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo.

Vitória, 25 de maio de 2021.

ALINE OLIVEIRA AMARAL
Secretária Acadêmica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGE
Mestrado/Doutorado – CT/UFES



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
ALINE OLIVEIRA AMARAL - SIAPE 1165000
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE/CT
Em 25/05/2021 às 09:18

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/196592?tipoArquivo=O>

*Este trabalho é dedicado às famílias que
perderam seus entes queridos por causa da covid-19.*

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, por arquitetar cada momento da minha vida. Agradeço também à minha namorada, Ivone Fiorin, por estar ao meu lado nos anos mais difíceis da minha vida, tornando-os, não só mais suportáveis, mas também fazendo-me olhar para eles como meus anos de maior aprendizado e conquistas. À minha mãe, Lourdes da Penha Costa, ao meu irmão, Ewerton Costa Lazaro, e aos meus avós, Zilda Pianca Costa e Laurentino Antônio Costa, por todo o suporte e apoio familiar que tive ao longo da vida.

Agradeço também aos professores que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, em especial aos meus orientadores Arnaldo Gomes Leal Júnior e Carlos Eduardo Schmidt Castellani, pelo suporte e pelos ensinamentos que me foram dados. À todos os professores do PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFES) que trabalham sempre para nos entregar o melhor. Aos professores Anselmo Frizera Neto, Jair Adriano Lima Silva e à professora Maria José Pontes, por todas as experiências e amizades que acumulei nos projetos dos quais fiz parte.

Agradeço, sem exceção, a todos os amigos que fiz no LabTel (Laboratório de Telecomunicações - UFES), pelo aprendizado compartilhado, pelas conversas na hora do café (de todos os assuntos imagináveis) e pelos momentos de descontração. Ao grande amigo Welton Duque, pela ajuda em programação VBA e pelas conversas filosóficas e intelectuais de corredor. Também aos amigos que fiz nos projetos “P&D Sensores” e “PPSUS”.

À PETROBRAS, pelo financiamento do projeto de pesquisa “Fibra Óptica na Medição de Nível e de Interface Água-Óleo em Tanques de Produção”, do qual trabalhei como pesquisador. À CNPq/FAPES, pelo financiamento do "PROGRAMA DE APOIO A NÚCLEOS EMERGENTES (PRONEM)".

"I get by with a little help from my friends"
Beatles

Resumo

O monitoramento de propriedades térmicas em líquidos é uma importante e complexa tarefa, amplamente aplicada em processos industriais. Tal importância se deve ao fato das propriedades térmicas dos fluidos (utilizados em processos industriais) estarem diretamente relacionadas à eficiência nas operações. Em operações de refino de óleo bruto, por exemplo, parâmetros como temperatura, viscosidade e condutividade térmica relacionam-se diretamente com a eficiência volumétrica do óleo. Nessas operações, soluções ópticas, como sensores em fibra, vêm sendo largamente desenvolvidas, pois, além de serem intrinsecamente seguros, possuem ainda características como: imunidade à interferência eletromagnética, compactidade, capacidade de multiplexação e estabilidade química. Em medições térmicas, métodos estacionários e transientes são majoritariamente projetados para o uso de componentes alimentados por corrente elétrica. Apesar disso, alguns desses métodos, como o *Modified transient plane source* (MTPS), admitem modificações, a depender das características da aplicação. Assim, este trabalho apresenta um sistema em fibra óptica para medição de densidade, calor específico e condutividade térmica em líquidos, baseado no método MTPS e nas FBGs. Para a tarefa, foi desenvolvida, a princípio, uma metodologia de caracterização de FBGs, que permite um controle automático dos equipamentos de coleta de dados, além da caracterização simultânea de várias FBGs. Em seguida, um sistema óptico de medição de densidade baseado em diafragmas é proposto. O sensor (com sensibilidade 0,025 nm/kPa) é construído a partir de duas FBGs, sendo uma delas embutida no diafragma e a outra, usada para compensar a variação de temperatura no líquido. Além disso, o material dos diafragmas (borracha nitrílica) é resistente à corrosão e químicamente estável, podendo ser aplicado em líquidos como o petróleo bruto. Para estimativas de calor específico e condutividade térmica, uma FBG (com sensibilidade 11,5 pm/°C e coeficiente de correlação $R^2 = 0,9999$) é utilizada em três experimentos, nomeados experimento no tanque, no Béquier e na proveta. As estimativas obtidas evidenciam a repetibilidade e reprodutibilidade do sistema, além da possibilidade de ajustes de acurácia através de uma constante de calibração. Por fim, são apresentadas análises da potência térmica, que mostram uma necessidade mínima de potência térmica para reduzir o impacto das perdas de convecção no método.

Palavras-chave: Densidade. Condutividade Térmica. Calor Específico. Sensores ópticos. Redes de Bragg em fibra.

Abstract

The monitoring of thermal properties in liquids is an important and complex task, widely applied in industrial processes. Which highlights this importance is the fact that thermal properties of fluids are usually related with the efficiency of these industrial processes. In crude oil refining operations, for example, parameters such as temperature, viscosity and thermal conductivity are directly related to the volumetric efficiency of the oil. In these operations, optical solutions, such as fiber sensors, have been widely developed due to their intrinsic operation, in addition to characteristics such as: immunity to electromagnetic interference, compactness, multiplexing capacity and chemical stability. For the thermal measurements assessment, stationary and transient methods are mostly designed for electrically-powered components. Despite this, some of these methods, such as *Modified transient plane source* (MTPS), admit physical modifications in their design, depending on the application demands. Thus, this work presents an optical system for measuring density, specific heat and thermal conductivity in liquids, based on MTPS and fiber Bragg gratings. For the task, a methodology of characterization of FBGs was developed, which allows an automatic control of data collection, in addition to the simultaneous characterization of several FBGs simultaneously. Thereafter, an optical diaphragm-based system is proposed for the task of measuring density. The sensor (with sensitivity of 0,025 nm/kPa) is constructed with two FBGs, in which one is embedded between the diaphragms and the other is used to compensate the liquid temperature variation. In addition, the diaphragm material (nitrile rubber) is corrosion resistant and chemically stable, which enables operations in liquids such as crude oil. For the estimation of specific heat and thermal conductivity, an FBG (with sensitivity of 11,5 pm/°C and determination coefficient $R^2 = 0,9999$) is applied in three experiments, named tank, beaker and test tube. The results show the repeatability and reproducibility of the system, in addition to the possibility of accuracy adjustments through a calibration constant. Finally, an analysis of thermal power and flexibility of the methodology are performed, describing the heat distribution in the setup and the possibility of constructing a liquid detection system.

Keywords: Density. Thermal conductivity. Specific heat. Optical sensors. Fiber Bragg gratings.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxo de calor q_x conduzido ao longo de uma amostra cilíndrica submetida a um gradiente de temperatura ΔT . Adaptado de (INCROPERA et al., 2007).	34
Figura 2 – Exemplo dos tipos de transferência de calor (condução, convecção e radiação), representados no aquecimento de uma panela com água. Adaptado de (KOSKY et al., 2013).	35
Figura 3 – Condução de calor a nível molecular de um fluido. O gráfico (à esquerda) representa a temperatura e o fluxo de calor da amostra. O gradiente de temperatura aplicado ao fluido faz com que as moléculas se colidam, conduzindo a energia térmica do topo para o fundo da amostra. Adaptado de (INCROPERA et al., 2007).	36
Figura 4 – Condutividade térmica tipicamente encontrado em diferentes materiais (à 25 °C e pressão de 1 atm). Note que óleos possuem valores típicos de condutividade térmica em torno de 0,1-0,2 W/mK, enquanto a água apresenta condutividade térmica de 0,613 W/mK. Adaptado de (INCROPERA et al., 2007).	40
Figura 5 – Esquemático dos métodos estacionários de medição de condutividade térmica apresentados no Quadro ???: (a) método Absoluto, (b) método Comparativo. Adaptado de (ZHAO et al., 2016).	41
Figura 6 – Esquemático do método transiente da potência pulsada. Adaptado de (ZHAO et al., 2016).	42
Figura 7 – Distribuição de temperatura no método Fio Quente. Adaptado de (ZHAO et al., 2016).	43
Figura 8 – Esquemático do método TPS, que mostra o sensor <i>hot disk</i> (b) inserido entre duas amostras iguais de material (a). Adaptado de (AL-AJLAN, 2006).	44
Figura 9 – Representação de uma fibra óptica monomodo (em escala).	45
Figura 10 – Representação das perturbações periódicas de uma FBG.	46
Figura 11 – Representação do índice de refração de uma FBG. Adaptado de (ANTUNES, 2011).	47
Figura 12 – Simulação de uma FBG uniforme em função de sua temperatura. Na simulação, foram geradas 40 amostras de temperatura, que resultaram em um deslocamento (<i>red shift</i>) de λ_B (destacado em (a)). A curva inserida em (b) representa o gráfico de λ_B versus temperatura, que evidencia a linearidade da FBG com a temperatura.	52

Figura 13 – Esquemático do sistema de caracterização de FBGs, montado no Laboratório de Telecomunicações (LabTel/UFES).	53
Figura 14 – Interface gráfica do programa de caracterização de FBGs desenvolvido. Os campos posicionados na parte superior esquerda da figura são utilizados para configurar o banho termostático. Já os campos na parte superior direita, são utilizados na configuração do interrogador óptico. Os dois gráficos da parte inferior esquerda e direita da figura mostram, respectivamente, os dados de temperatura de referência e comprimento de onda de Bragg que estão sendo coletados pelo programa.	54
Figura 15 – Fluxograma que descreve a lógicas do programa de caracterização de FBGs desenvolvido. (a) apresenta o comportamento inicial e final do programa, (b) descreve a lógica de processamento dos dados e (c) detalha os passos de acréscimo e decréscimo da temperatura.	56
Figura 16 – Tratamento dos dados coletados pelo sistema de caracterização. Os dados coletados são armazenados em um arquivo de texto (esquerda) e importados para uma planilha (direita) por meio de um código de macros, programado na linguagem <i>Visual Basic</i>	57
Figura 17 – Dados experimentais coletados de duas FBGs uniformes simultaneamente. No experimento, foram programados 5 ciclos de subida e descida de temperatura, variando de 20 a 50 °C, com saltos de 5°C e 5 minutos de espera. O experimento durou 8 horas e 42 minutos sem nenhuma interferência humana durante a coleta dos dados.	57
Figura 18 – Curvas de caracterização das duas FBGs usadas para validar a metodologia de caracterização desenvolvido.	58
Figura 19 – Resultado dos experimentos de prova de conceito. A curva apresenta temperaturas medidas na água e no óleo mineral ao longo do tempo a partir de um sensor de temperatura baseado em redes de Bragg em fibra.	58
Figura 20 – Sistema óptico de medição de densidade (baseado em um sensor de diafragma) aplicado no fundo de um tanque. A imagem ampliada destaca aspectos construtivos do sensor, em que duas FBGs são utilizadas: uma embutida no diafragma, e outra próxima do sensor (utilizada na calibração da curva de caracterização).	60
Figura 21 – Curvas de caracterização de (a) pressão e (b) temperatura da FBG incorporada ao diafragma.	61
Figura 22 – (a) estimativas de pressão realizadas com o sensor diafragma em diferentes condições de temperatura (sem compensação de temperatura). (b) Estimativas de pressão medidas pelo do sensor proposto com compensação de temperatura (utilizando um FBG adicional como referência de temperatura).	62

Figura 23 – Mudança de comprimento de onda em função do nível dos líquidos (água e diesel), medida a partir do sensor diafragma proposto.	64
Figura 24 – Valores estimados de densidade de água, diesel e petróleo bruto, medidos pelo o sensor diafragma proposto.	64
Figura 25 – Esquemático das estruturas utilizadas para a avaliação do método proposto, sendo tais estruturas baseadas em: (a) tanque de acrílico, (b) Béquer de vidro e (c) proveta de vidro.	68
Figura 26 – Curva de caracterização do sensor de temperatura baseado em FBG.	71
Figura 27 – Curva da temperatura medida no experimento do tanque de acrílico.	71
Figura 28 – Calor específico e condutividade térmica da água, estimados nos três ciclos do experimento do tanque	72
Figura 29 – Calor específico e condutividade térmica da água e do óleo mineral, estimados no experimento do Béquer	73
Figura 30 – Calor específico e condutividade térmica da água, do óleo mineral e do Kryo 51, estimados nos experimentos da proveta e do Béquer.	74
Figura 31 – (a) deslocamento no comprimento de onda da FBG causado pela pressão da água aplicada ao sensor diafragma. (b) curvas de regressão linear da temperatura medida no Béquer para correntes de 0,25; 0,5; 0,75 e 1 A.	75

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades térmicas dos líquidos utilizados na regressão polinomial. .	70
Tabela 2 – Estimativas de C_p e k encontrados no estudo da potência potência térmica do sistema.	77

Lista de abreviaturas e siglas

TPS	<i>Transient Plane Source</i> (Fonte plana transiente)
MTPS	<i>Modified Transient Plane Source</i> (Fonte plana transiente modificada)
FBG	<i>Fiber Bragg gratings</i> (Redes de Bragg em fibra)
SLED	Fonte óptica de espectro largo (SuperLED)

Lista de símbolos

A	Área da seção transversal
c	Constante de calibração
C_V	Capacidade de calor volumétrico
C_p	Capacidade de calor específico
E	Emissividade térmica
h	Coefficiente convectivo
H	Altura da amostra cilíndrica
I_0	Amplitude da corrente elétrica
k	Condutividade térmica
k_x, k_y, k_z	Condutividade térmica nas direções x, y e z
k_τ	Condutividade térmica a meio período da corrente
L, Δx	Variação da posição ou comprimento da amostra
m	Massa da amostra
Q	Quantidade de calor
q_x	Taxa de transferência de calor na direção x
q_{Rad}''	Fluxo de calor por Radiação
$\frac{dQ}{dt}$	Fluxo de calor
q_g''	Fluxo de calor gerado
q_x''	Fluxo de calor na direção x
q_{conv}''	Fluxo de calor por convecção
r_1, r_2	Distâncias entre a fonte de calor e os sensores de temperatura
R	Resistência térmica da amostra
S	Inclinação da curva de temperatura versus Ln do tempo no método Fio Quente

T	Temperatura
T_s	Temperaturas de superfície
T_{inf}	Temperaturas de corrente livre
ΔT	Variação de temperatura
V	Volume
α	Difusividade térmica; coeficiente de expansão térmica da fibra óptica
β	Coefficientes de regressão linear ou polinomial
ρ	Densidade
ϵ	Emissividade do corpo; torção axial aplicada à FBG
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
λ_{IN}	Comprimento de onda emitido na entrada da fibra
n_{eff}	Índice de refração efetivo da fibra óptica
Λ	Período da FBG
δ_{neff}	Variação do valor médio da modulação
ξ	Visibilidade das franjas da FBG
$\phi(z)$	Variação do período gravado ao longo da FBG
$\Delta\lambda_B$	Variação do comprimento de onda de Bragg
P_ϵ	Constante fotoelástica efetiva do material fibra
ζ	Coefficiente termo-óptico da fibra

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Motivação	27
1.2	Objetivos Gerais	28
1.3	Objetivos Específicos	28
1.4	Justificativa	28
1.5	Contribuições e publicações	30
1.6	Estrutura do texto	31
2	REFERENCIAL TEÓRICO	33
2.1	Introdução	33
2.2	Fundamentos de Transferência de calor	33
2.2.1	Equação fundamental da calorimetria	33
2.2.2	Regime estacionário e regime transiente	34
2.2.3	Condução	35
2.2.4	Convecção	37
2.2.5	Radiação	38
2.2.6	Propriedades térmicas dos fluidos	38
2.3	Métodos de Medição de Condutividade Térmica	40
2.3.1	Método Estacionário Absoluto	40
2.3.2	Método Estacionário Comparativo	41
2.3.3	Método Transiente da Potência Pulsada	42
2.3.4	Método Transiente Fio Quente	43
2.3.5	Método Transiente <i>Transient Plane Source</i> (TPS)	43
2.3.6	Método Transiente <i>Modified Transient Plane Source</i> (MTPS)	44
2.4	Sensores em fibra óptica	45
2.4.1	Fundamentos de Fibra Óptica	45
2.4.2	Tipos de Dispositivos Ópticos	45
2.4.2.1	Redes de Bragg em fibra	46
2.4.2.2	Sensores ópticos baseados em diafragma	48
3	SISTEMA AUTOMÁTICO DE COLETA DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DE TEMPERATURA EM FBGS	51
3.1	Introdução	51
3.2	Simulação	51
3.3	Sistema de Caracterização de Temperatura	51
3.3.1	Gravação e caracterização da FBG	51

3.3.2	Princípio de funcionamento	52
3.3.3	Software de controle e coleta de dados para caracterização de temperatura em FBGs	53
3.3.4	Resultados e discussões	55
4	MEDIÇÃO DA DENSIDADE	59
4.1	Introdução	59
4.2	Princípio de Funcionamento	59
4.2.1	Materiais e métodos	59
4.3	Resultados e Discussões	61
4.3.1	Caracterização da pressão e temperatura	61
4.3.2	Estimativas de densidade	63
5	MEDIÇÃO DE CALOR ESPECÍFICO E CONDUTIVIDADE TÉRMICA	67
5.1	Introdução	67
5.2	Princípio de Funcionamento	67
5.2.1	Materiais e Métodos	67
5.2.1.1	Experimento I: Análise no Tanque de acrílico	67
5.2.1.2	Experimento II: Análise no Béquero de vidro	67
5.2.1.3	Experimento III: Análise na Proveta de vidro	67
5.2.1.4	Experimento IV: Análise da potência térmica	68
5.2.2	Capacidade de calor específico	68
5.2.3	Condutividade térmica	69
5.3	Resultados e Discussões	70
5.3.1	Experimento I: Análise no Tanque de acrílico	70
5.3.2	Experimento II: Análise no Béquero de vidro	73
5.3.3	Experimento III: Análise no Proveta de vidro	74
5.3.4	Experimento IV: Análise da potência térmica	74
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	83

1 Introdução

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema óptico de medições térmicas, baseado em um sensor diafragma, no método MTPS (do inglês, *Modified Transient Plane Source*) e nas redes de Bragg em fibra (FBG, do inglês *Fiber Bragg Gratings*). A metodologia apresentada permite estimar densidade, calor específico e condutividade térmica em líquidos de maneira segura (por não usar corrente elétrica para realizar as medições), sem pôr em risco operações com fluidos inflamáveis, como ocorre por exemplo na indústria de óleo e gás. Por se tratar de uma estrutura óptica baseada em FBGs, o sistema permite ainda implementações como medições quasi-distribuídas e multiparamétricas a partir de uma mesma sonda.

1.1 Motivação

O sensoriamento é um processo que pode ser aplicado a diferentes áreas de conhecimento. Sejam em procedimentos industriais, médicos, químicos, agrícolas ou até por meio de dispositivos IoT, sensores eletrônicos e ópticos atuam com a finalidade de monitorar e corrigir diferentes processos, atribuindo-lhes maior eficiência e segurança ([HEIKENFELD et al., 2018](#)). Uma vez que a correção de falhas operacionais depende deste monitoramento, é importante que a tecnologia de sensores esteja presente nas diversas áreas industriais, em especial aquelas de maiores impactos econômicos ([SCHÜTZE; HELWIG; SCHNEIDER, 2018](#)).

Na indústria de óleo e gás, por exemplo, um sensoriamento térmico ineficiente em operações de tratamento do óleo bruto pode resultar em perdas ambientais e econômicas. Nessas operações, a coleta de dados por meio de sensores, seja em tempo real, seja através da retirada de amostras, fornece as informações necessárias para o controle de qualidade do óleo ([MARTIN; COLPITTS, 1996](#)). Vale ressaltar que a coleta de dados nesses ambientes deve ser realizada com cautela, devido ao perigo de explosão e contaminação por toxinas liberadas no processamento do óleo ([MARQUES et al., 2015](#)). Assim, é importante que sejam aplicadas soluções seguras de monitoramento, a fim de proteger, não só a estrutura física das operações, mas também a vida daqueles que trabalham e compartilham estes locais ([AKPOMUVIE; ORHIOGHENE; BENEDICT, 2011](#)).

Para solucionar esse problema, estudos científicos frequentemente propõem tecnologias de sensores ópticos como alternativa dos usuais sensores eletrônicos. Isto se deve ao fato de sensores ópticos não serem alimentados por correntes elétricas, mas por ondas eletromagnéticas ([UDOH; NJUGUMA; PRABHU, 2014](#)). Além disso, tecnologias puramente ópticas apresentam imunidade à interferência eletromagnética, são quimicamente

estáveis, compactas e permitem medições multiparamétricas e quasi-distribuídas a partir de uma mesma sonda. Todas essas características dão aos sensores ópticos uma grande vantagem nas operações industriais, quando comparados a sensores eletrônicos (LEAL-JUNIOR; FRIZERA; MARQUES, 2020). Em se tratando de sensores térmicos, estruturas interferométricas (como os interferômetros de Mach-Zehnder e Fabry-Perot) e redes de Bragg são frequentemente utilizadas por serem linearmente relacionadas à temperatura do dispositivo (WANG et al., 2010a; MARQUES et al., 2015).

Assim, sensores ópticos para medição de temperatura, densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica podem evitar prejuízos financeiros, ambientais e sociais para as indústrias, em especial as de extração e processamento de óleo bruto. Uma vez que estes parâmetros estão, direta ou indiretamente, relacionados entre si, e cada um deles traz uma informação diferente acerca do líquido analisado, o monitoramento simultâneo de todas essas propriedades pode trazer um conhecimento térmico mais detalhado acerca do líquido analisado.

1.2 Objetivos Gerais

Esta dissertação tem por objetivo implementar uma metodologia capaz de estimar densidade, calor específico e condutividade térmica de líquidos a partir de uma estrutura óptica baseada em redes de Bragg em fibra.

1.3 Objetivos Específicos

- Implementação de metodologia que automatize a coleta de dados na caracterização de sensores de temperatura;
- Desenvolvimento de um sensor óptico, baseado em uma estrutura de diafragmas, que use a pressão hidrostática para estimar a densidade de diferentes líquidos.
- Implementação de uma metodologia de estimação de calor específico e condutividade térmica, a partir das redes de Bragg em fibra;
- Levantamento de estudo sobre a distribuição de potência térmica no sistema, levando à compreensão das perdas de potência por convecção.

1.4 Justificativa

A substituição de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis tem sido o foco de diversos temas de pesquisas (BEIMS et al., 2020). Tal fato se justifica pelo petróleo ser considerado o principal responsável pelo contínuo aumento da poluição ambiental (FAHIM;

ALSAHHAF; ELKILANI, 2010), além da principal fonte de energia (com cerca de 85% do consumo energético mundial) (LI et al., 2021). Além disso, estudos apontam um aumento anual de 1,6% no consumo energético mundial para as próximas duas décadas (ZHANG et al., 2017). Por conta desses fatores, a indústria de óleo e gás possui um criterioso controle de qualidade, uma vez que o não monitoramento do refino (destilação, conversão e tratamento do petróleo) pode resultar na ineficiência volumétrica dos produtos finais e, portanto, elevados prejuízos financeiros (MILLER, 1996).

Devido ao ambiente corrosivo e inflamável encontrado dentro de tanques óleo bruto, sensores ópticos e indutivos são comumente usados para monitorar as camadas de materiais formadas dentro dos tanques (i.e., gás, espuma, óleo, emulsão, água e lama), pois, diferentemente de sensores eletrônicos, neles não há corrente elétrica em contato com os fluidos avaliado (LEAL-JUNIOR et al., 2018). Além de serem intrinsecamente seguros, sensores ópticos ainda apresentam características importantes, como: imunidade a interferência eletromagnética, estabilidade química, capacidade de multiplexação e de medições multiparamétricas, tornando-os ideais para o sensoriamento em ambientes industriais inflamáveis (LEAL-JÚNIOR et al., 2019). Assim, sensores ópticos são frequentemente propostos na avaliação de nível de interface (DÍAZ et al., 2018; LEAL-JUNIOR et al., 2018), pressão (Neeharika; Pattnaik, 2016) e temperatura (TONG et al., 2020) em tanques e reservatórios de óleo bruto.

Embora muitos desses sensores apresentem alta sensibilidade e aspectos construtivos relativamente simples, sensores ópticos térmicos como de calor específico e condutividade térmica ainda são pouco explorados, devido à dificuldade no controle de fluxos de calor (CARLOMAGNO; DISCETTI; ASTARITA, 2011). Em (SILVA et al., 2018), o autor utiliza um laser pulsado centrado em 1480 nm para implementar um fio quente óptico, e então conseguir relacionar a variação da temperatura (gerada por esse fluxo de calor) com a condutividade térmica. Apesar da insensibilidade ao fluxo de calor, da segurança na medição e da simplicidade matemática decorrente do método fio quente utilizado, o sistema é complexo e caro, por necessitar de um interrogador óptico e um laser pulsado para a realização das estimativas.

Em (PEVEC; DONLAGIC, 2017), os autores apresentam um sensor óptico multiparamétrico para medições simultâneas de condutividade térmica, pressão, índice de refração e temperatura em gases. O sensor consiste em três interferômetros de Fabry-Perot de diferentes comprimentos cascadeados, e a relação do comprimento de onda observado, com as propriedades medida é obtida a partir da transformada inversa de Fourier do sinal óptico medido. O sistema apresenta alta sensibilidade e repetibilidade, e poderia ser adaptado para medições em líquidos. Por outro lado, para aplicações em tanques de óleo bruto, a tecnologia ficaria limitada à incapacidade de multiplexação, sendo necessário várias sondas para realizar medições quasi-distribuídas.

Para medições quasi-distribuídas de pressão e densidade em líquidos, uma metodologia baseada em diafragmas é descrita em (LEAL-JUNIOR et al., 2018). Uma vez que os sensores são baseados em redes de Bragg em fibra, se torna relativamente simples a multiplexação de vários diafragmas em uma mesma sonda. Dessa forma, as redes de Bragg em fibra se tornam uma promissora tecnologia para aplicações em tanques e reservatórios, como os de óleo bruto. Além disso, a relação de propriedades como pressão, densidade, temperatura, calor específico e condutividade térmica podem ser combinadas às redes de Bragg para a elaboração de um sensor multiparamétrico para avaliação das principais propriedades térmicas.

1.5 Contribuições e publicações

As contribuições deste trabalho compreendem uma metodologia de caracterização de temperatura em sensores FBGs, a partir de um *software* computacional desenvolvido para este fim. O *software* conecta um interrogador óptico de FBGs a um equipamento de banho termostático, permitindo uma pré-configuração do experimento e uma coleta de dados simultânea entre os dois equipamentos. Além disso, é possível ainda caracterizar simultaneamente múltiplas FBGs a partir de apenas um experimento.

Para fins científicos, foi elaborado um sistema óptico de sensores FBGs capaz de estimar densidade, calor específico e condutividade térmica de diferentes líquidos. Além disso, o sistema ainda faz as estimativas da pressão e temperatura dos líquidos, que, nos experimentos, foram considerados parâmetros secundários, uma vez que não estariam dentro do objetivo principal do trabalho.

Através dos estudos apresentados nesta dissertação, foram publicados 2 artigos em congressos internacionais e 1 artigo em revista, são eles:

- **R. C. Lazaro**, C. Marques, C. E. S. Castellani and A. Leal-Júnior, "FBG-based measurement systems for density, specific heat capacity and thermal conductivity assessment for liquids," in IEEE Sensors Journal, Jan 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3049574.
- K. Pereira, **R. C. Lazaro**, W. C. de Moraes Junior, A. Frizera Neto, A. G. Leal-Junior, "Simulation of FBG Temperature Sensor Array for Oil Identification via Random Forest Classification". Eng. Proc. Nov 2020, 2, 20, doi: 10.3390/ecs-7-08177.
- **R. C. Lazaro**, C. E. S. Castellani, M. J. Pontes, A. G. Leal-Júnior, "Fiber Bragg gratings sensor for thermal conductivity measurements in liquids", In: International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Aveiro, Nov 2019.

1.6 Estrutura do texto

Esta dissertação está estruturalmente dividida em 6 capítulos. Além deste capítulo, que descreve aspectos introdutórios da dissertação, o Capítulo 2 faz um levantamento do referencial teórico necessário para compreender as relações térmicas e ópticas apresentadas nesta dissertação. O Capítulo 3 apresenta um sistema de caracterização de sensores de temperatura, além de resultados de simulação e prova de conceito. O Capítulo 4 apresenta aspectos construtivos do sensor de densidade, além de resultados experimentais. No Capítulo 5 são apresentadas as relações teóricas e experimentais que permitem as estimativas de calor específico e condutividade térmica em líquidos. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2 Referencial Teórico

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta o referencial teórico necessário para a compreensão do método desenvolvido neste trabalho. Aqui estão apresentados conceitos fundamentais de transferência de calor e de propriedades térmicas em fluidos. Estes conceitos, combinados a alguns métodos já existentes de medição de condutividade térmica, permitem compreender as interações térmicas por trás do sistema construído. Além disso, o capítulo ainda aborda conceitos relacionados a fibra óptica e sensores ópticos, em especial as redes de Bragg em fibra.

2.2 Fundamentos de Transferência de calor

Medição de propriedades térmicas em líquidos é um importante procedimento na indústria, especialmente em operações de tratamento de óleo e gás ([MILLER, 1996](#)). Uma vez que o manuseio do petróleo bruto (e outros líquidos combustíveis) tornam o ambiente de trabalho tóxico e inflamável, existe hoje uma real necessidade do uso de sensores que realizam medições de forma seguras e precisas, sem colocar em risco a integridade dos equipamentos e dos trabalhadores responsáveis por tais operações ([MARQUES et al., 2015](#)).

Para entender como estes sensores funcionam, é importante ter em mente conceitos de calorimetria, regimes de operação e os principais tipos de transferência de calor. Além disso, é necessário que se conheça quais técnicas vêm sendo utilizadas e desenvolvidas atualmente, tirando proveito dos pontos positivos e propondo melhorias dos pontos negativos de cada uma delas, a fim que seja projetado um sensor capaz de realizar medições rápidas, precisas e seguras ([CEZAIIRLIYAN; MAGLIC; PELETISKY, 2012](#)).

2.2.1 Equação fundamental da calorimetria

Sendo assim, a primeira diferenciação importante a ser feita é entre calor sensível e calor latente. De acordo com [Incropera et al. \(2007\)](#), calor latente é a quantidade de calor absorvida pelo material para que ocorra uma mudança de estado, como por exemplo uma água que evapora após atingir seu ponto de ebulição. Já o calor sensível é a quantidade de calor que resulta na alteração da temperatura do material sem a mudança de estado. Uma vez que este trabalho apresenta um sistema de medição de parâmetros térmicos em líquidos, é importante entender o conceito de quantidade calor sensível, que pode ser

descrito pela equação fundamental da calorimetria:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T, \quad (2.1)$$

onde Q (em cal ou J) é a quantidade de calor aplicado ao material, m (em g ou kg) é a massa do corpo, C_p (em cal/g°C ou J/g°C) é a capacidade de calor específico do material e ΔT (em °C) é a variação de temperatura causada pela quantidade de calor aplicada ao material. Um outro ponto relevante para o estudo de calorimetria é conhecer o regime de operação em que o sistema atuará.

2.2.2 Regime estacionário e regime transiente

Segundo [Kosky et al. \(2013\)](#), transferência de calor pode ser definida como a energia térmica em movimento, decorrente de uma diferença espacial de temperatura entre dois pontos. Dessa forma, a transferência de calor pressupõe um gradiente de temperatura espacial no sistema, caso contrário, não haverá movimento de energia térmica (fluxo de calor). Por exemplo, considere um sistema composto por uma barra de ferro cilíndrica, inicialmente em repouso (a uma temperatura T_0), de área A e comprimento Δx , conforme apresentado na Figura 1. Se, num instante de tempo t_0 , os lados dessa barra começam a ser aquecidos por temperaturas T_1 e T_2 (onde $T_1 > T_2$), um gradiente de temperatura espacial (ΔT) será produzido na barra, fazendo com que a energia térmica q_x flua do lado mais quente para o lado mais frio da barra (regime transiente). Dessa forma, a temperatura espacial em cada ponto da barra mudará ao longo do tempo, até que, num instante t_1 , o sistema encontre um novo ponto de equilíbrio (regime estacionário). Após o instante t_1 , não havendo alteração nas condições de contorno do sistema, a temperatura espacial em cada ponto da barra se manterá inalterada, até que, em um instante t_2 , o sistema sofra uma nova alteração, que o levará novamente para o regime transiente.

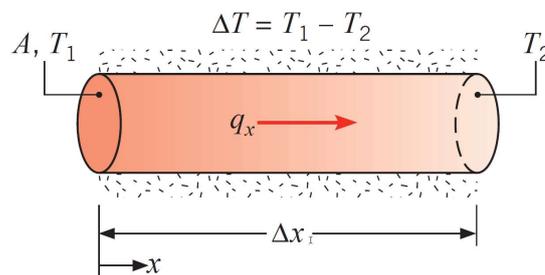


Figura 1 – Fluxo de calor q_x conduzido ao longo de uma amostra cilíndrica submetida a um gradiente de temperatura ΔT . Adaptado de ([INCROPERA et al., 2007](#)).

Considerando o exemplo dado, entende-se como regime estacionário os intervalos de tempo entre t_1 e t_2 . Os intervalos de t_0 a t_1 e t_3 em diante são considerados regime transiente. Nos instantes anteriores à t_0 , a barra encontra-se toda a uma mesma temperatura T_0 , não havendo gradiente de temperatura espacial. Nesta ocasião, diz-se que a barra está em

equilíbrio térmico, mas não há troca de calor por não existir gradiente de temperatura no sistema (PAUL et al., 2010). Ao longo deste trabalho serão apresentadas técnicas estacionárias e transientes de medição de condutividade térmica, por isso, a diferença entre os dois regimes deve estar clara ao leitor. De modo simplificado, térmicas estacionárias consideram a temperatura em função do espaço para cálculo da condutividade térmica, enquanto técnicas transientes utilizam a temperatura em função do tempo (ZHAO et al., 2016).

Feita essa distinção entre os regimes de operação, é importante conhecer detalhadamente as três formas de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Para uma compreensão rápida destes conceitos, considere a Figura 2, que ilustra uma panela com água sendo aquecida no fogão (KOSKY et al., 2013). A fonte de calor, posicionada abaixo da panela, aquece-a, emitindo calor em forma de radiação (ainda que não haja um meio material para a energia se propagar). Em seguida, a energia irradiada, que aquece o fundo da panela, flui entre os átomos da panela, chegando até a água e ao cabo por meio do fenômeno de condução de calor. No líquido, ocorre a chamada convecção natural, que faz com que a água quente do fundo (menos densa) suba, distribuindo o calor por todo o líquido (ÇENGEL, 2012). As três subseções seguintes detalham melhor esses três importantes conceitos de transferência de calor.

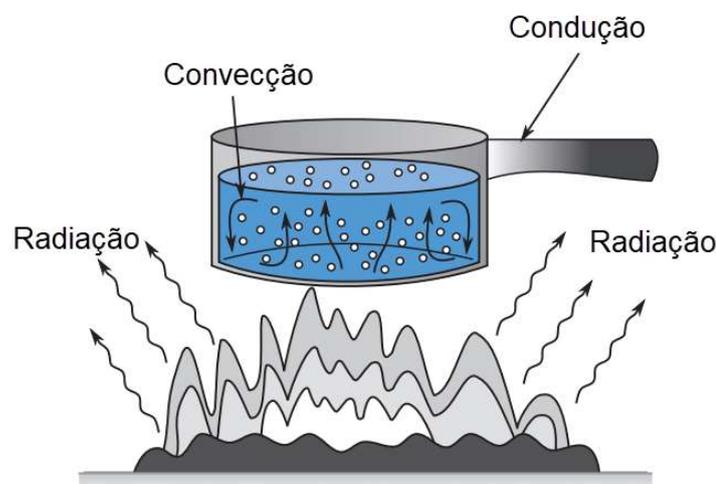


Figura 2 – Exemplo dos tipos de transferência de calor (condução, convecção e radiação), representados no aquecimento de uma panela com água. Adaptado de (KOSKY et al., 2013).

2.2.3 Condução

Aos olhos da física, transferência de calor por condução tem relação direta com colisões randômicas (atômicas e moleculares), que possibilitam o movimento intrínseco da energia de um ponto a outro da matéria (GHASSEMI; SHAHIDIAN, 2017). Esta definição pode ser vista na Figura 3 (b), onde as moléculas mais energéticas (parte superior) de um

líquido tendem a se chocarem por meio de colisões randômicas, conduzindo a energia para a parte menos energética do material (parte inferior). Em sólidos, essas colisões são mais frequentes em um nível atômico, por meio de vibrações estruturais (INCROPERA et al., 2007). Na Figura 3 (a) é mostrada a curva de distribuição espacial de temperatura, sendo o eixo T referente à temperatura, o eixo x referente à posição e q_x'' o fluxo de calor.

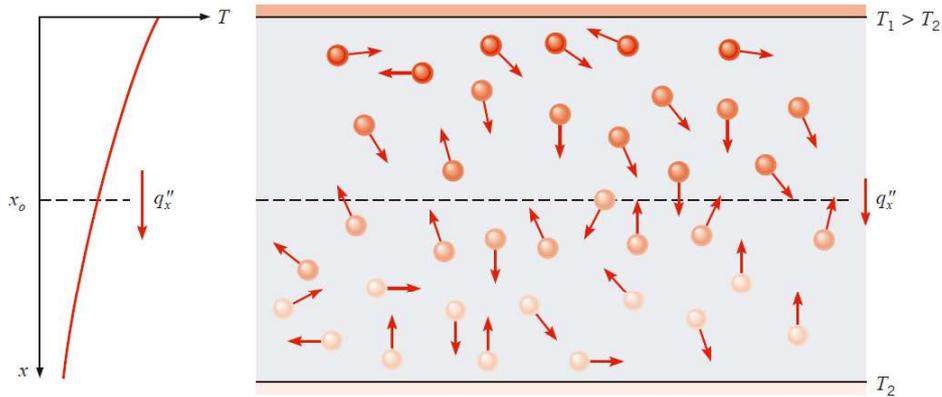


Figura 3 – Condução de calor a nível molecular de um fluido. O gráfico (à esquerda) representa a temperatura e o fluxo de calor da amostra. O gradiente de temperatura aplicado ao fluido faz com que as moléculas se colidam, conduzindo a energia térmica do topo para o fundo da amostra. Adaptado de (INCROPERA et al., 2007).

Esse fenômeno físico que ocorre na condução pode ser descrito pela Lei de Fourier. De forma breve, a Lei de Fourier descreve matematicamente o comportamento da condução de calor como (ÇENGEL, 2012):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_g'' = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.2)$$

onde x, y e z são as direções de propagação do calor, k_x , k_y e k_z (em W/g°C) são as condutividades térmicas do material em cada direção, $\frac{\Delta T}{\Delta x}$, $\frac{\Delta T}{\Delta y}$ e $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ representam as variações de temperatura em cada direção, q_g (em W/m) refere-se à geração de energia térmica no sistema, ρ , é a densidade do material, C_p é a capacidade de calor específico do material e dT/dt é a variação de temperatura em um instante de tempo. A expressão $\rho \dot{C}_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}$ também pode ser compreendida como a taxa de acúmulo de energia do material (em W/m). A seção 2.2.6 discute mais detalhadamente outros parâmetros térmicos abordados na pesquisa.

Apesar da complexidade da Equação 2.2, algumas considerações no modelo podem ser feitas (a depender da necessidade de cada aplicação) (ÇENGEL, 2012). Por exemplo, na maioria dos experimentos, a amostra de material utilizada é considerada isotrópica, o que implicaria em condutividades térmicas iguais em todas as direções, isto é: $k = k_x = k_y = k_z$.

Uma vez que o material é isotrópico, a transferência de energia também se comporta de maneira similar em todas as direções, sendo assim, uma representação unidimensional é suficiente para descrever a condução nas três direções, retirando-se da Equação 2 as componentes referentes às orientações y e z . Feitas estas simplificações e considerando o sistema em regime estacionário, a taxa de transferência de calor (em W) pode ser definida como:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}, \quad (2.3)$$

e o fluxo de calor (em W/m) como:

$$q_x'' = \frac{q_x}{A}, \quad (2.4)$$

onde A é a área da seção transversal do material, $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ é a variação da temperatura em direção à coordenada x , e k é a condutividade térmica do material, que pode ser calculada por:

$$k_x \equiv - \frac{q_x''}{(\partial T / \partial x)}, \quad (2.5)$$

Na seção 2.3 serão apresentados com mais detalhes alguns dos métodos mais usuais de medições de condutividade térmica, tanto em regime estacionário quanto em regime permanente.

2.2.4 Convecção

Além da condução, há também duas outras formas de transferência de calor, são elas a convecção e a radiação. Na convecção, a troca de calor pode ocorrer de duas maneiras: entre fluido e o meio externo (corrente livre) ou apenas dentro do próprio fluido (OULDER et al., 1998). Neste último caso, o aquecimento não uniforme do líquido gera um empuxo gravitacional devido às diferentes densidades, isto é, uma parte do líquido, por ser mais quente que outra, se torna menos densa, criando um movimento circular natural dentro do fluido (conforme ilustrado na Figura 2) (KOSKY et al., 2013). O fluxo de energia térmica na convecção é modelado pela lei de resfriamento de Newton (CARLOMAGNO; DISCETTI; ASTARITA, 2011), descrita como:

$$q_{Conv}'' = h \cdot (T_s - T_\infty), \quad (2.6)$$

onde Q_{Conv} (em W ou J/s) representa o fluxo de calor por convecção, h é o coeficiente convectivo (em W/m²°C), T_s é a temperatura da superfície (em °C) e T_∞ a temperatura de corrente livre (em °C).

No caso da convecção acontecer somente dentro do líquido, T_∞ será substituído pela temperatura média de entrada e saída do fluido (BEJAN, 2013). Além desses dois

cenários de convecção natural, há também a chamada convecção forçada, muito utilizada em processos de resfriamento para controle de temperatura (VERBOVEN et al., 2000), mas que não será o foco desta dissertação.

Em problemas envolvendo convecção, o grande desafio está na obtenção de h , que, mesmo para sensores atuantes em regime estacionário, demandam técnicas complexas de modo que o coeficiente convectivo h (CARLOMAGNO; DISCETTI; ASTARITA, 2011). Uma vez que a convecção transfere calor de maneira não uniforme ao fluido, o coeficiente convectivo depende não só das propriedades térmicas do material, mas também de informações sobre o regime de escoamento (laminar ou turbulento) (VERBOVEN et al., 2000).

2.2.5 Radiação

A radiação é definida como a emissão de calor em forma de onda eletromagnética decorrente de alterações nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria (desde que possua temperatura acima de 0 K) (Incropera et al. (2007)). Diferente da condução e convecção, a radiação não necessita de um meio material para ser propagada, podendo inclusive ser transmitida no vácuo (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2010). O fluxo de calor (em W ou J/s) irradiada por um corpo pode ser obtido por meio da relação de Stefan-Boltzmann, como (LIENHARD, 2013):

$$q_{Rad} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.7)$$

onde A é a área da superfície (em m^2), ϵ é a emissividade do corpo, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$) e T é a temperatura do corpo (em K).

Embora a radiação seja emitida por superfícies de temperatura acima de 0 K, as incertezas causadas pela perda por radiação a baixas temperaturas (menores que 1000K) podem ser negligenciadas (ZHAO et al., 2016). Uma vez que esta dissertação trabalha com temperaturas entre 290 e 310 K, as perdas por radiação não serão consideradas nas análises. Caso seja de interesse do leitor, um estudo aprofundado acerca da radiação pode ser encontrado em (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2010).

2.2.6 Propriedades térmicas dos fluidos

Além dos três tipos de transferência de calor citados, é importante compreender os principais parâmetros térmicos que, direta ou indiretamente, relacionam-se com o calor específico (C_p) e a condutividade térmica (k). Na indústria de óleo e gás, por exemplo, o monitoramento de parâmetros térmicos é constante, pois a eficiência volumétrica do óleo processado depende diretamente de parâmetros térmicos como densidade, volume, calor específico e condutividade térmica (MARTIN; COLPITTS, 1996). Em Kliche et al. (2011), é apresentado um sensor capaz de medir condutividade térmica (k), Calor específico

(Cp) e difusividade térmica (α) em misturas de gases como CO_2 and N_2 , por meio de um micro-fio de silício como fonte de energia térmica transitória. Berge, Adl-Zarrabi e Hagentoft (2013) apresenta um sensor de calor específico baseado na técnica *Transient Plane Source* (TPS), apresentada pela primeira vez por Song, Groß e Hahne (1993).

Uma relação entre Cp, k e a densidade (ρ), por exemplo, pode ser vista na equação da difusividade térmica (em m^2/s), descrita por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp}, \quad (2.8)$$

onde ρ é dado em kg/m^3 ou kg/l . Segundo Incropera et al. (2007), a difusividade térmica relaciona a condutividade térmica (capacidade conduzir energia térmica) com a capacidade de armazenar energia ($\rho \cdot Cp$) que o material possui.

Uma outra forma de relacionar Cp, k e ρ é por meio da efusividade térmica (E). De acordo com Salazar (2003) e Emanuel (2006), efusividade térmica mede a capacidade que o material possui de trocar calor com o meio externo, e é dada por:

$$E = \sqrt{k \cdot \rho \cdot Cp}, \quad (2.9)$$

onde E é dado em $W \cdot s^{1/2}/m^2K$. A densidade, por sua vez, quantifica o quão pesado um material é, relacionando a massa e o volume como:

$$\rho = \frac{massa}{volume}, \quad (2.10)$$

onde ρ é dado em kg/m^3 ou kg/l . Dentre os diversos métodos de estimar ρ , métodos baseados na pressão hidrostática são amplamente utilizados, pois relacionam a densidade a parâmetros de simples obtenção, como pressão, gravidade e nível do líquido (LEAL-JUNIOR; FRIZERA; MARQUES, 2020).

Por fim, a condutividade térmica é uma importante propriedade térmica que quantifica a capacidade que um material, sólido líquido ou gás, tem de transportar calor de um ponto a outro (quando imerso em um gradiente de temperatura) (INCROPERA et al., 2007). Conforme mostra a Figura 4, em líquidos não metálicos, valores típicos de condutividade térmica (à temperatura ambiente) giram em torno de 0,1 a 0,2 W/mK em óleos e 0.613 W/mK em água (sendo tais valores dependentes da temperatura do líquido) (TURGUT; TAVMAN; TAVMAN, 2009). As técnicas comerciais mais utilizadas para medir condutividade térmica em líquidos baseiam-se em tecnologias eletrônicas, apesar de serem contra-indicadas em experimentos com líquidos inflamáveis (TURGUT; TAVMAN; TAVMAN, 2009). Na Figura 4 são apresentados valores típicos da condutividade térmica de diversos materiais.

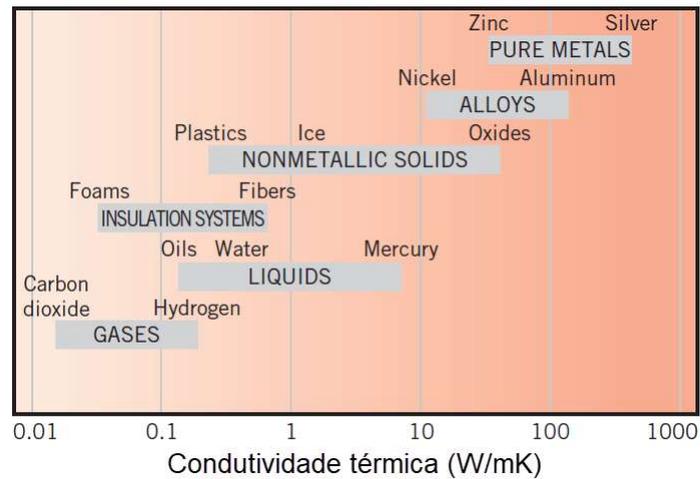


Figura 4 – Condutividade térmica tipicamente encontrado em diferentes materiais (à 25 °C e pressão de 1 atm). Note que óleos possuem valores típicos de condutividade térmica em torno de 0,1-0,2 W/mK, enquanto a água apresenta condutividade térmica de 0,613 W/mK. Adaptado de (INCROPERA et al., 2007).

2.3 Métodos de Medição de Condutividade Térmica

Conforme discutido na seção 2.2.2, as técnicas de medição de condutividade térmica (e de outros parâmetros térmicos) podem ser divididos em dois: métodos estacionários e métodos transientes. Em (ZHAO et al., 2016), é apresentado um estudo acerca das técnicas mais estudadas nos últimos 30 anos. Segundo Zhao et al. (2016), dentre os principais métodos estacionários destacam-se o método absoluto e o comparativo, enquanto nos transientes estão o método da potência pulsada, o do fio quente e o *transiente plane source* (TPS).

2.3.1 Método Estacionário Absoluto

Em métodos estacionários, a condutividade térmica é determinada por meio da variação de temperatura da amostra ΔT em função da posição, quando submetida a um fluxo de calor Q (ZHAO et al., 2016). De acordo com Paul et al. (2010), técnicas estacionárias podem determinar o valor de k a partir da simplificação da lei de Fourier, dada por:

$$k = \frac{Q/A}{\Delta T/L}, \quad (2.11)$$

onde q é a quantidade de calor, ΔT a variação da temperatura da amostra, A a área da seção transversal e L o comprimento da amostra.

Apesar da simplicidade na Equação 2.11, Paul et al. (2010) destaca que, para seu uso, o sistema deve ser considerado unidimensional. Sendo assim, o desafio de se construir um sensor em regime estacionário está justamente na dificuldade de se estabilizar as condições

de contorno, temperatura e fluxo de calor em uma dimensão. A Figura 5 apresenta o esquemático de quatro desses métodos estacionários de medição de condutividade térmica.

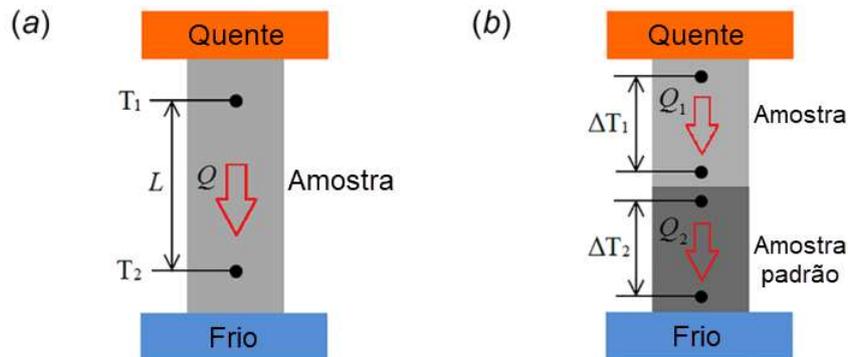


Figura 5 – Esquemático dos métodos estacionários de medição de condutividade térmica apresentados no Quadro ??: (a) método Absoluto, (b) método Comparativo. Adaptado de (ZHAO et al., 2016).

A Figura 5 (a) ilustra o método absoluto de medição de condutividade térmica. Este método consiste em posicionar uma amostra de material entre duas fontes de calor (uma quente e outra fria) com potências térmicas conhecidas. Após a amostra entrar em equilíbrio térmico, dois pontos de temperaturas são coletados por meio dos sensores T_1 e T_2 . Uma vez que são conhecidas a quantidade de calor Q , a área A , o comprimento L e a variação de temperatura ($\Delta T = T_2 - T_1$), a Equação 2.11 pode ser utilizada para o cálculo de k . O método pode apresentar erros inferiores a 1% (ASTM, 2013).

2.3.2 Método Estacionário Comparativo

Apesar da simplicidade do método absoluto, um grande desafio da técnica é o cálculo de Q , que pode ser compensado com o uso da técnica comparativa (Figura 5 (b)). A técnica usa uma amostra padrão, com valores conhecidos, para medir a condutividade térmica de outra amostra, eliminando assim a necessidade de se conhecer a quantidade de calor gerada no sistema. Para isso, dois sensores de temperatura são posicionados em cada material, de modo que a condutividade térmica seja calculada em função das variações de temperatura das amostras (ΔT_1 e ΔT_2) por meio da equação:

$$k_1 = k_2 \frac{A_2 \Delta T_2 L_1}{A_1 \Delta T_1 L_2}, \quad (2.12)$$

onde os parâmetros com subscritões 1 e 2 representam, respectivamente, propriedades da amostra analisada e da amostra padrão. Uma grande vantagem deste método é que, uma vez que não é necessário conhecer a quantidade de calor para calcular a condutividade térmica. Nesta técnica, também não é necessário compensar as eventuais perdas de calor existentes no sistema.

2.3.3 Método Transiente da Potência Pulsada

A fim de superar as desvantagens existentes nos métodos de estado estável (como perdas de calor parasita, resistência ao contato dos sensores de temperatura e longo tempo de espera para atingir o regime estacionário), uma variedade de técnicas transientes foram desenvolvidas. A primeira dessas técnicas recebe o nome de método de potência pulsada, apresentado pela primeira vez por [Maldonado \(1992\)](#). Assim como o método de condutância paralela, esta técnica também é uma derivação do método absoluto.

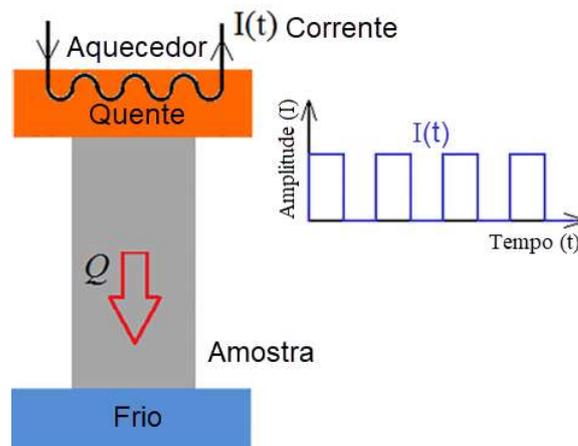


Figura 6 – Esquemático do método transiente da potência pulsada. Adaptado de ([ZHAO et al., 2016](#)).

Conforme apresentado na Figura 6, o método é composto por uma resistência, alimentada por uma corrente pulsada (quadrada ou senoidal), usada para aquecer a amostra (geralmente cilíndrica ou retangular) ([ZHAO et al., 2016](#)). O acionamento da corrente periódica resulta em uma leve variação na temperatura da amostra (tipicamente em torno de 0,3 K), que é medida por um termopar ([MALDONADO, 1992](#)). Neste caso, a condutividade térmica em função da temperatura pode ser obtida por meio da equação:

$$k = \frac{RI_0^2}{\Delta T} \tanh\left(\frac{k\tau}{2C_V}\right), \quad (2.14)$$

onde 2τ é o período da corrente, C_V é a capacidade de calor volumétrico, R é a resistência térmica da amostra, e I_0 é a amplitude da corrente elétrica. Desta forma, sendo todos os demais parâmetros conhecidos, a condutividade térmica pode ser calculada por meio de iterações numéricas. Em sua pesquisa, [Maldonado \(1992\)](#) relata incertezas de medição abaixo de 3% na performance do método.

No caso de $\tanh\left(\frac{k\tau}{2C_V}\right) \gg 1$, i.e., τ muito maior que o tempo de relaxamento do sistema, pode-se considerar que o sistema esteja em regime estacionário, e k poderá ser calculado

por:

$$k = \frac{RI_0^2}{\Delta T}. \quad (2.15)$$

2.3.4 Método Transiente Fio Quente

Um dos métodos transientes mais estudados nos últimos anos é o método do fio quente (MYLONA et al., 2020). Conforme mostra a Figura 7, a técnica consiste em utilizar um fio resistivo para aquecer a amostra (assumindo-se que a amostra é isotrópica e homogênea). Para levantar a equação do método, é considerado ainda que a fonte de calor é linear, tem comprimento infinito e diâmetro infinitesimal (TURGUT; TAVMAN; TAVMAN, 2009).

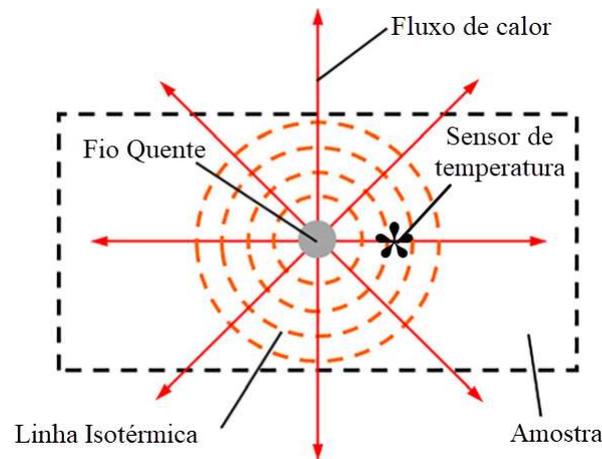


Figura 7 – Distribuição de temperatura no método Fio Quente. Adaptado de (ZHAO et al., 2016).

Para medir a temperatura da amostra, um sensor de temperatura é colocado a uma distância conhecida r do fio quente. Utilizando-se a escala logarítmica para representar o tempo, a condutividade térmica da amostra pode ser calculado por:

$$k = \frac{Q}{4\pi S} \quad (2.16)$$

onde Q é a quantidade de calor inserida na amostra e S é a inclinação da reta temperatura versus $\ln(t)$, sendo t o tempo de amostragem. Uma importante característica deste método é o baixo tempo de medição e a capacidade de medir condutividade térmica tanto em fluidos (1ms a 1s) quanto em sólidos (10s) (ZHAO et al., 2016).

2.3.5 Método Transiente *Transient Plane Source* (TPS)

O método TPS (também chamado método do disco quente) é baseado em um sensor fino, eletricamente isolado, envolvido por duas amostras idênticas de material (conforme ilustrado na Figura 8 (a) e (b)). Além de atuar como fonte de calor, o sensor,

quando alimentado por uma corrente constante, atua também como sensor de temperatura resistivo (WARZOHA; FLEISCHER, 2014).

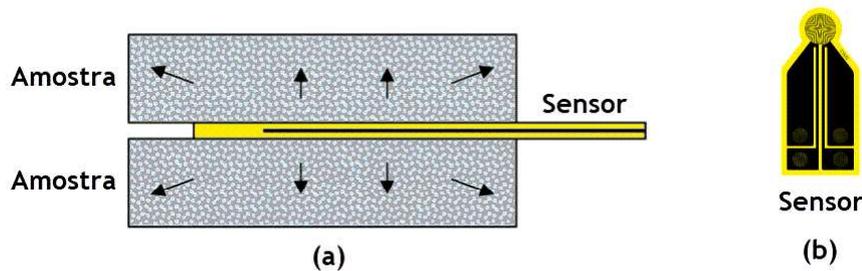


Figura 8 – Esquemático do método TPS, que mostra o sensor *hot disk* (b) inserido entre duas amostras iguais de material (a). Adaptado de (AL-AJLAN, 2006).

Zhao et al. (2016) detalha o método TPS como capaz de medir condutividade térmica de 0,005 a 500 W/mK, na faixa de temperatura de temperatura criogênica a 500K, incluindo líquidos, aerogéis e sólidos. Além disso, o método se tornou uma importante ferramenta por possuir design robusto, realizar medições rápidas e possibilitar o sensoramento de condutividade térmica e difusividade térmica, simultaneamente (WARZOHA; FLEISCHER, 2014). A condutividade térmica da amostra é obtida a partir da lei de Fourier, por meio da relação:

$$\frac{dQ}{dt} = kA \frac{dT}{dx}, \quad (2.17)$$

onde $\frac{dQ}{dt}$ é o fluxo de calor que percorre a amostra de área A gerando um gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$.

2.3.6 Método Transiente *Modified Transient Plane Source* (MTPS)

Além das vantagens já mencionadas do TPS, o método permite ainda modificações a fim de ajustá-lo de acordo com as necessidades do experimento. Assim, o TPS modificado (MTPS, do inglês *Modified Transient Plane Source*) têm sido amplamente estudado devido à sua capacidade de medir propriedades térmicas de sólidos, fluidos e sedimentos (ELKHOLY; SADEK; KEMPERS, 2019) de forma rápida, de simples preparação e flexível (HE, 2005a). Propriedades como calor específico e condutividade térmica são comumente obtidas com este método (HARRIS et al., 2014; HE, 2005b; ASHRAF, 2014).

Devido à simplicidade de execução e modificar do método TPS, a metodologia desenvolvida neste trabalho é baseada em conceitos do MTPS. Uma vez que os modelos do MTPS, a lei de Fourier de transferência de calor e as propriedades térmicas apresentadas na Seção 2.2.6 se relacionam direta ou indiretamente, uma descrição detalhada acerca do princípio de funcionamento do método proposto nesta dissertação é apresentada na Seção 5.2. Para melhor compreensão dos métodos de medição de condutividade térmica, o leitor pode recorrer ao compêndio documentado por Cezairliyan, Maglic e Peletsky (2012).

2.4 Sensores em fibra óptica

2.4.1 Fundamentos de Fibra Óptica

De forma breve, uma fibra óptica consiste em um guia de onda formado por um núcleo cilíndrico de vidro (geralmente feito de dióxido de silício) coberto por uma casca de índice de refração inferior ao do núcleo (Agrawal, 2011). Por possuir índice de refração menor, o núcleo da fibra tem a tarefa de propagar a luz ao longo do guia de onda por meio de reflexões internas do sinal emitido (sofrendo perdas relativamente pequenas). Além do núcleo e da casca, as fibras ópticas comerciais possuem ainda um revestimento interno e uma capa plástica (revestimento externo), que atuam como proteções contra torção e impacto, conforme ilustrado na Figura 9 (MIGNANI; BALDINI, 1996).

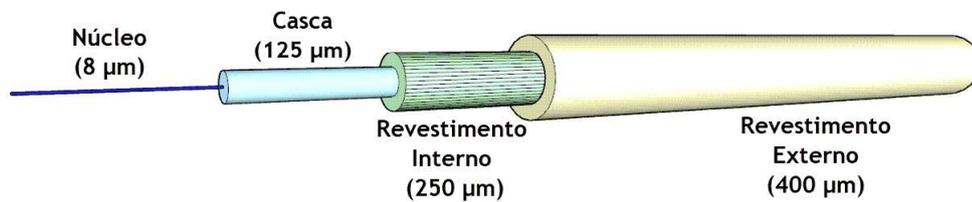


Figura 9 – Representação de uma fibra óptica monomodo.

Embora inicialmente utilizada como meio de transmissão de dados, as fibras ópticas vêm sendo amplamente utilizadas na construção de sensores (LEAL-JUNIOR, 2018; DÍAZ, 2018; SANCHEZ, 2020). O princípio de funcionamento desses sensores baseia-se na modulação das propriedades ópticas da luz guiada na fibra (como fase, intensidade, comprimento de onda ou polarização) (SANCHEZ, 2020). O interesse no estudo de sensores ópticos pode ser justificado por suas diversas vantagens quando comparados a sensores eletrônicos comerciais.

2.4.2 Tipos de Dispositivos Ópticos

Apesar de sensores eletrônicos serem amplamente utilizados no monitoramento de propriedades mensuráveis, dispositivos baseados em fibra óptica vêm ganhando espaço neste meio (UDOH; NJUGUMA; PRABHU, 2014). Este fato pode ser justificado porque sensores eletrônicos, quando comparados aos ópticos, apresentam baixa robustez à interferência eletromagnética, são menos resistentes à corrosão, possuem menor precisão, maior erro, maior incerteza e geram risco de explosão em locais de tratamento de produtos inflamáveis (DÍAZ et al., 2018). Por outro lado, sensores em fibra óptica são compactos, possuem imunidade a interferência eletromagnética, são quimicamente estáveis e intrinsecamente seguros, além de permitirem multiplexação (medições quasi-distribuídas) e medições multiparamétricas a partir de uma mesma sonda (LEAL-JÚNIOR et al., 2019).

Tecnologias ópticas baseadas em interferometria, redes de Bragg em fibra (FBG, do inglês, *fiber Bragg gratings*), superfície de ressonância plasmônica e specklegramas são frequentemente usadas na fabricação desses sensores ópticos (FUJIWARA; WU; SUZUKI, 2012). Dispositivos como as FBGs e os interferômetros de March-Zehnder e Fabry-Perot são comumente usados na fabricação de sensores de temperatura, pois respondem de forma linear às variações de temperatura. Além de temperatura, esses dispositivos podem ser utilizado como sensores de nível, pressão, vibração, densidade (LEAL-JUNIOR et al., 2018) e condutividade térmica (SILVA et al., 2018), em aplicações industriais, médicas, químicas, automobilísticas, agrícolas e na indústria de óleo e gás (LEAL-JUNIOR et al., 2018).

2.4.2.1 Redes de Bragg em fibra

A FBG pode ser definida como uma perturbação periódica no índice de refração (n) ao longo de uma fibra óptica, decorrente da exposição do núcleo da fibra a uma fonte óptica que possua um determinado padrão de interferência (Hill; Meltz, 1997). Para que tal padrão seja gerado, é possível utilizar-se de uma máscara de fase, que permite que apenas um padrão específico de luz, gerada por um laser ultravioleta, irradie na fibra e grave a FBG (HILL et al., 1993). Uma técnica também muito utilizada pode ser vista em (THOMAS et al., 2012), a qual utiliza um laser pulsado (da ordem de femtossegundos) para criar o padrão na fibra.

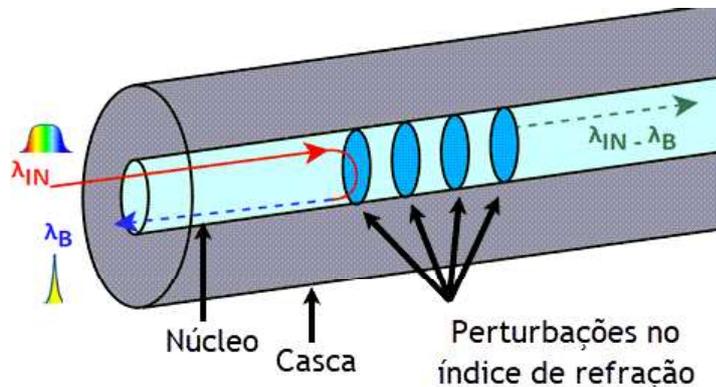


Figura 10 – Representação das perturbações periódicas de uma FBG.

A Figura 10 ilustra o comportamento da onda eletromagnética dentro de uma FBG. Conforme ilustrado, o sinal λ_{IN} , irradiado por uma fonte óptica de banda larga, entra na fibra e, ao interagir com as perturbações, cria um padrão de reflexão e refração no sinal (HILL et al., 1993). Como resultado deste processo, parte do sinal λ_{IN} , chamado comprimento de onda de Bragg (λ_B), é refletido de volta pela fibra, enquanto o restante do sinal ($\lambda_{IN}-\lambda_B$) atravessa as perturbações e é transmitido até a outra ponta da fibra. Além do padrão uniforme das perturbações ilustrado na Figura 10, outros padrões de FBG também são amplamente encontrados na literatura, tais como: Gaussiano, Cosseno levantado, *chirped*, defasagem em π (ERDOGAN, 1997).

O princípio de funcionamento de sensores baseados em FBG está no monitoramento do comprimento de onda de Bragg, à medida que a propriedade mensurada varia (MISHRA et al., 2011). De acordo com (HILL et al., 1993), o comprimento de onda de Bragg pode ser definido como:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (2.18)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo da fibra óptica e Λ é o período de modulação do índice de refração no núcleo da fibra.

A Figura 11 detalha os parâmetros de construção de uma FBG uniforme, cujo comprimento físico varia tipicamente da ordem de alguns milímetros até poucos centímetros (ANTUNES, 2011). A perturbação periódica induzida (δn_{eff}) ao longo do eixo de propagação é dada por:

$$\delta n_{eff}(z) = \bar{\delta n}_{eff}(z)1 + \xi(z)\cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \phi(z)\right] \quad (2.19)$$

onde $\bar{\delta n}_{eff}$ representa a variação do valor médio da modulação, ξ a visibilidade das franjas gravadas (com valores entre 0 e 1) e $\phi(z)$ descreve a variação do período ao longo da rede (no caso de FBGs não uniformes).

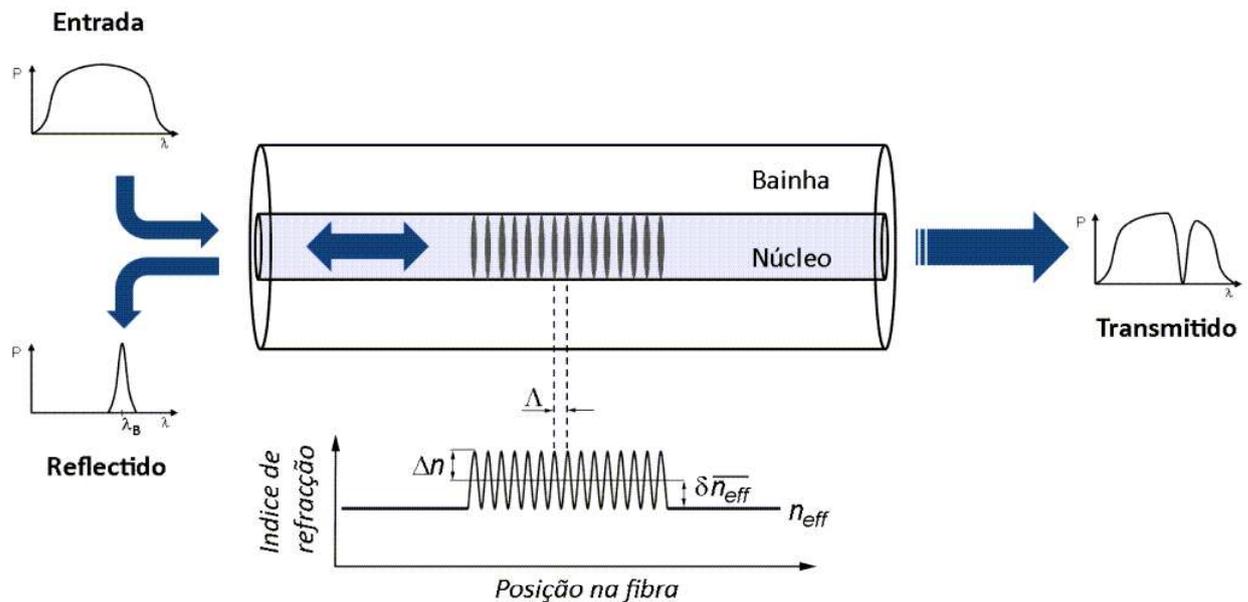


Figura 11 – Representação do índice de refração de uma FBG. Adaptado de (ANTUNES, 2011).

Uma vez que n_{eff} e Λ são afetados diretamente pela temperatura e pela tensão axial aplicados na região da FBG (LEAL-JÚNIOR et al., 2019), a Equação 2.18 pode ser escrita como:

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_B[(1 - P_\epsilon)\epsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T], \quad (2.20)$$

onde P_ϵ é a constante fotoelástica efetiva do material, ϵ é a torção axial aplicada à FBG, α é o coeficiente de expansão térmica da fibra, ζ é o coeficiente termo óptico da fibra e ΔT é a variação de temperatura em cima da rede de Bragg.

Partindo da Equação 2.20, pode-se concluir que a variação sofrida pelo comprimento de onda de Bragg está diretamente relacionada à torção axial (ou tensão mecânica) e à variação de temperatura na fibra. Uma vez que tais parâmetros produzem um efeito de compressão e dilatação ao longo da fibra óptica, o padrão de reflexão gerado pelas perturbações da FBG mudam, de modo que o comprimento de onda de pico (λ_B) sofra um deslocamento espectral conforme a temperatura e tensão mecânica na fibra variam (Hill; Meltz, 1997). Assim, o processo de construção de um sensor de temperatura baseado em FBG (descrito no Capítulo 3.3) consiste em relacionar a temperatura aplicada à FBG com o deslocamento que tal temperatura causa no comprimento de onda de Bragg.

2.4.2.2 Sensores ópticos baseados em diafragma

Além de serem diretamente dependentes da temperatura e torção mecânica, as FBGs permitem ainda abordagens indiretas na construção de sensores. Nestes casos, parâmetros como pressão e densidade podem ser relacionados ao comprimento de onda de Bragg por meio de adaptações no princípio de funcionamento do sensor. Dentre os diferentes princípios para estimar densidade (descritos em Wang et al. (2010b)), os métodos baseados em pressão hidrostática têm sido amplamente utilizados na estimativa de densidade em fluidos, onde a pressão é proporcional à gravidade, ao nível líquido e à densidade do fluido (LEAL-JUNIOR; FRIZERA; MARQUES, 2020). Assim, se o nível e a gravidade forem conhecidos, a densidade pode ser estimada a partir da pressão hidrostática (DÍAZ et al., 2018).

De forma breve, o método consiste em usar uma FBG envolvida por duas membranas finas (diafragmas) feitas de materiais como grafeno, resina epóxi, borracha natural ou borracha nitrílica (LEAL-JUNIOR; FRIZERA; MARQUES, 2020). As membranas são fixadas em uma estrutura mecânica, formando uma câmara de ar. Conforme a pressão do líquido varia, os diafragmas se expandem ou se contraem, gerando uma deformação na FBG e, portanto, um deslocamento no comprimento de onda de Bragg. Caracterizando-se a pressão aplicada no sensor em função do deslocamento de λ_B , é possível então construir um sensor diafragma baseado em FBG para medição de pressão (Neeharika; Pattnaik, 2016), por meio da relação:

$$\Delta\lambda_B = K_P \cdot \Delta P, \quad (2.21)$$

onde ΔP representa a variação da pressão hidrostática, $\Delta\lambda_B$ é a variação do comprimento de onda, K_P é a sensibilidade do diafragma. Considerando os valores de pressão, gravidade e nível do líquido, a densidade de um fluido pode ser determinada por meio da equação da

pressão hidrostática:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h, \quad (2.22)$$

em que g , h e ρ representam a gravidade, o nível e a densidade do líquido, respectivamente.

Vale ressaltar que, à medida que o sensor diafragma mede pressão do líquido, as mudanças de temperatura também resultam no deslocamento de λ_B , uma vez que as FBGs também são sensíveis à variação de temperatura (DÍAZ et al., 2018). Além disso, o módulo de elasticidade de materiais como a borracha níttrica são dependentes da temperatura, de modo que o aumento desta resulta na diminuição daquela (LEAL-JUNIOR et al., 2018). Com a redução do módulo de elasticidade do diafragma, o material se torna mais maleável e, portanto, mais sensível à pressão (LEAL-JUNIOR et al., 2018). Esse comportamento, chamado sensibilidade cruzada, pode ser mitigado por meio de métodos de compensação de deslizamento e sensibilidade (inclinação) da curva de característica do sensor, conforme discutido em (LEAL-JUNIOR et al., 2018) e (LEAL-JUNIOR et al., 2018).

3 Sistema Automático de Coleta de Dados e Caracterização de Temperatura em FBGs

3.1 Introdução

Este capítulo discute os resultados acerca da caracterização da FBG como sensor de temperatura. Partindo dos modelos matemáticos que descrevem o sinal em uma FBG uniforme, são apresentados resultados de uma simulação, que permite conhecer a resposta da FBG uniforme em função da temperatura. Além disso, é apresentada uma metodologia de caracterização, desenvolvida com a finalidade de automatizar o processo de aquisição dos dados de caracterização. Por fim, um sensor de temperatura baseado em FBG é utilizado para uma prova de conceito acerca da proposta desta dissertação.

3.2 Simulação

Antes da construção física do sistema de caracterização de FBGs, foi feita uma simulação da FBG uniforme, a partir da teoria dos modos acoplados (PRABHUGOUD; PETERS, 2004), para que fosse conhecido o comportamento de λ_B em função da temperatura na FBG. Na simulação, foram avaliados três parâmetros do comprimento de onda de Bragg, são eles: amplitude, a largura a meia altura (FWHM, do inglês *full width at half maximum*) e deslocamento de lambda ($\Delta\lambda_B$).

Os resultados da simulação mostraram que os valores de amplitude e FWHM são menos significativos à variação de temperatura do que $\Delta\lambda_B$. A Figura 12 mostra uma simulação de 40 curvas de λ_B em uma FBG uniforme centrada em 1540 nm (à 25 °C). Na inserção (a) da Figura 12 é mostrada uma imagem ampliada das curvas, que evidencia o deslocamento (*red shift*) causado pelo aumento de temperatura. Na inserção (b) da Figura 12 é mostrado o gráfico de $\Delta\lambda_B$ versus a temperatura utilizada na simulação. A curva mostra a boa relação de linearidade que as FBGs possuem com a temperatura (amplamente explorada na literatura).

3.3 Sistema de Caracterização de Temperatura

3.3.1 Gravação e caracterização da FBG

Para construção do sensor de temperatura baseado em FBG, foi utilizada uma fibra monomodo fotossensível GF1B (ThorLabs), gravada a partir da técnica de máscara

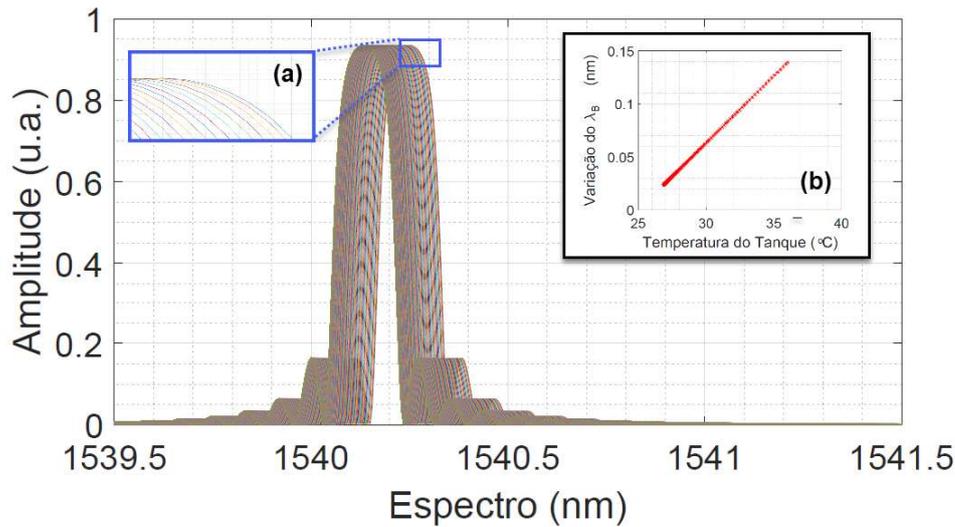


Figura 12 – Simulação de uma FBG uniforme em função de sua temperatura. Na simulação, foram geradas 40 amostras de temperatura, que resultaram em um deslocamento (*red shift*) de λ_B (destacado em (a)). A curva inserida em (b) representa o gráfico de λ_B versus temperatura, que evidencia a linearidade da FBG com a temperatura.

de fase e um laser pulsado Nd:YAG, com duração de pulso de 8 ns e comprimento de onda centrado em 266 nm (LOTIS TII LS-2137ULaser) (MIN et al., 2019). No processo, uma região de aproximadamente 45 mm de acrilato da fibra GF1B é removida, a fim de proteger a máscara de fase utilizada. O comprimento físico da FBG gravada é de aproximadamente 10 mm. A variação do comprimento de onda de Bragg pode ser vista na Equação 2.20.

3.3.2 Princípio de funcionamento

Uma vez que as estimativas de calor específico e condutividade térmica, propostas como objetivo deste trabalho, dependem diretamente da temperatura do líquido e, portanto, do comprimento de onda de Bragg medido, a caracterização da FBG é o processo que permite encontrar uma relação matemática entre λ_B e a temperatura (i.e., permite transformar a FBG em um sensor de temperatura). Como o comprimento de onda de Bragg é linearmente dependente da temperatura e da tensão axial (conforme mostrado na Equação 2.20), uma forma de buscar essa relação é anular qualquer efeito de tensão aplicada à FBG e calcular uma regressão linear de primeira ordem, no formato:

$$T = \beta_0 + \beta_1 \cdot \lambda_B, \quad (3.1)$$

onde β_0 e β_1 são os coeficientes da regressão linear e T a temperatura em cima da FBG.

Para obter essa relação, foi montado um teste de bancada conforme apresentado na Figura 13. Nela é mostrado um interrogador óptico de FBGs modelo sm125 (Micron Optics, USA) responsável por coletar os comprimentos de ondas de Bragg. A FBG é

então inserida em um equipamento de banho termostático modelo ECO Silver (LAUDA, Alemanha), que permite variar a temperatura de líquidos de forma rápida por meio de um bombeio interno (convecção forçada). Dentro do banho termostático, há um sensor de temperatura LRZ 918 Pt100/LiBus (Lauda-Brinkman, Alemanha) com resolução 0.02 K, que é usado por um sistema de controle para regular a temperatura dentro do fluido.

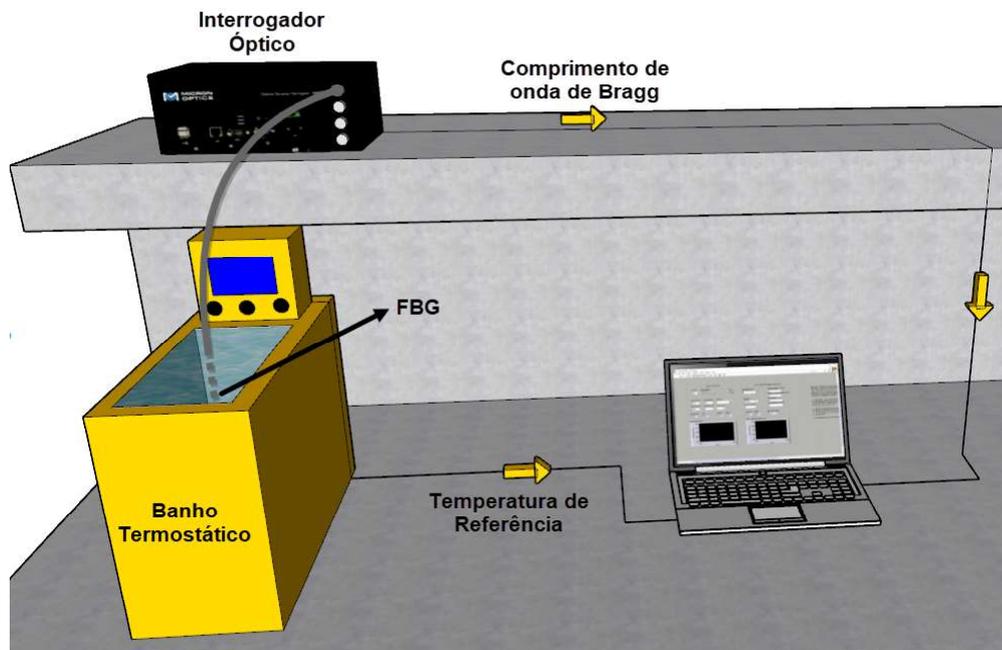


Figura 13 – Esquemático do sistema de caracterização de FBGs, montado no Laboratório de Telecomunicações (LabTel/UFES).

3.3.3 Software de controle e coleta de dados para caracterização de temperatura em FBGs

Por meio do software LabView (National Instruments, USA), foi desenvolvido um algoritmo que se conecta simultaneamente ao interrogador óptico e ao banho termostático, coletando, de forma síncrona, os dados de temperatura e comprimento de onda de Bragg. Além da coleta síncrona dos dados, o programa permite uma pré-configuração do processo de caracterização. Por meio de uma interface gráfica, mostrada na Figura 14, é possível configurar parâmetros como número de ciclos, temperaturas mínima e máxima, intervalos de temperatura e de tempo, bombeio e local de armazenamento dos dados, além das configurações básicas do interrogador óptico, como seleção de canal, número de FBGs na sonda e ajuste relativos ao formato do comprimento de onda lido.

A lógica utilizada na construção do programa pode ser compreendida através do fluxograma mostrado na Figura 15. Na Figura 15 (a) é apresentado o funcionamento básico do algoritmo, onde são feitas verificações de conexão do banho termostático e do interrogador óptico. O bloco de processamento é descrito na Figura 15 (b), que se inicia



Figura 14 – Interface gráfica do programa de caracterização de FBGs desenvolvido. Os campos posicionados na parte superior esquerda da figura são utilizados para configurar o banho termostático. Já os campos na parte superior direita, são utilizados na configuração do interrogador óptico. Os dois gráficos da parte inferior esquerda e direita da figura mostram, respectivamente, os dados de temperatura de referência e comprimento de onda de Bragg que estão sendo coletados pelo programa.

com a criação do arquivo de texto contendo os dados coletados. Tal estratégia foi adotada para que os dados sejam salvos não só no fim da coleta, mas pontualmente, a cada novo dado coletado. Dessa forma, caso alguma falha ocorra durante o processo, os dados já coletados não são perdidos. O controle da caracterização é realizado, na maior parte, por meio do banho termostático, de modo que o interrogador óptico seja usado apenas para receber os dados das FBGs. Realizados os passos iniciais, o programa inicia seu processamento, que consiste no controle dos atuadores (aquecedor, resfriador e bombeio) e na coleta de dados.

Considerando um "step" de temperatura como sendo a variação entre a temperatura atual e a seguinte (a ser controlada no banho termostático pelo programa), a lógica do controle de temperatura é baseada em uma variável "somador". Sempre que "somador" recebe +1, o banho termostático é configurado para um novo aumento de temperatura. Quando a temperatura do banho termostático atinge a máxima, conforme inicialmente configurada, a variável "somador" passa a receber o valor -1, resultando em um step de decréscimo na temperatura do banho termostático. O ciclo de medição ocorre quando a temperatura sai da temperatura configurada como mínima, chega à máxima e, então,

volta à mínima novamente (Veja a Figura 17, na qual 5 ciclos de coleta de dados são apresentados). Esta abordagem permite otimizar o código, de modo que o mesmo bloco de programa controle os atuadores tanto na subida quanto na descida de temperatura. A lógica dos passos de temperatura é mostrada na Figura 15 (c). Os arquivos executáveis e instruções de uso do sistema de caracterização apresentados podem ser encontrados em (LAZARO, 2019).

3.3.4 Resultados e discussões

Para validar o método de caracterização desenvolvido, foi realizada a caracterização de duas FBGs simultaneamente. As configurações pré-programadas no código variam a temperatura do banho termostático de 20 °C a 50 °C, com intervalos de 5 °C. Em cada intervalo de temperatura, o programa aguarda 5 minutos coletando, simultaneamente, dados de temperatura e comprimento de onda, medidos no sensor de temperatura de referência e no interrogador de FBGs, respectivamente. Os dados coletados, conforme mostrado na Figura 16, são armazenados em um arquivo de texto e importados para uma planilha, a qual foi complementada com um programa de macros que automatiza a importação dos dados.

O processo descrito anteriormente foi realizado em cinco ciclos de subidas e descidas de temperatura. Os comprimentos de onda de Bragg das duas FBGs (uma centrada em aproximadamente 1564 nm e outra, em aproximadamente 1568 nm) e a temperatura coletada pelo sensor de referência podem ser vistos na Figura 17.

Aplicando-se a regressão linear nos dados coletados, são obtidas as curvas de caracterização de cada FBG, mostradas na Figura 18. As sensibilidades das FBGs 1 e 2 são, respectivamente, de 10,9 pm/°C e 11,1 pm/°C, e o coeficiente de correlação de ambas $R^2 = 0,9998$.

Assim, as equações que permitem converter o comprimento de onda de Bragg das FBGs em temperaturas são:

$$T_{FBG1} = 0.01091 \cdot \lambda_{B1} + 1563,7762; \quad (3.2)$$

$$T_{FBG2} = 0.0111 \cdot \lambda_{B2} + 1567,8519; \quad (3.3)$$

onde λ_{B1} e λ_{B2} são os comprimentos de ondas de Bragg coletados pelo interrogador de FBGs.

Por fim, a Figura 19 traz dados de temperatura medidos com um sensor FBG. O objetivo do experimento é mostrar que, ao aplicar um fluxo de calor em líquidos de condutividades térmicas diferentes (mantendo-se as demais propriedades constantes), a inclinação do gráfico de temperatura versus tempo muda, de modo que esta inclinação seja proporcional às propriedades térmica do líquido. Na Figura 19 são apresentados dados de

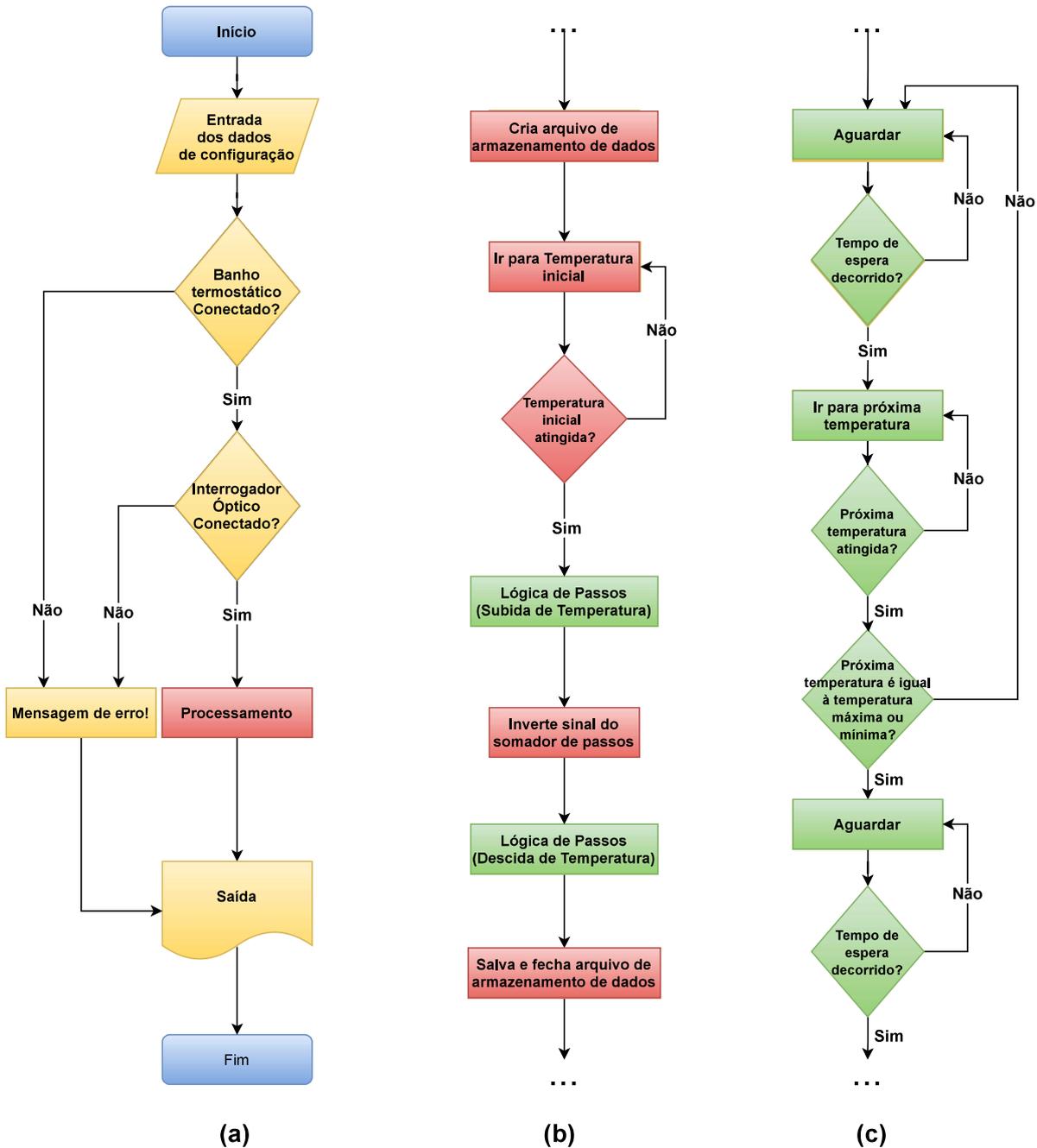


Figura 15 – Fluxograma que descreve a lógicas do programa de caracterização de FBGs desenvolvido. (a) apresenta o comportamento inicial e final do programa, (b) descreve a lógica de processamento dos dados e (c) detalha os passos de acréscimo e decréscimo da temperatura.

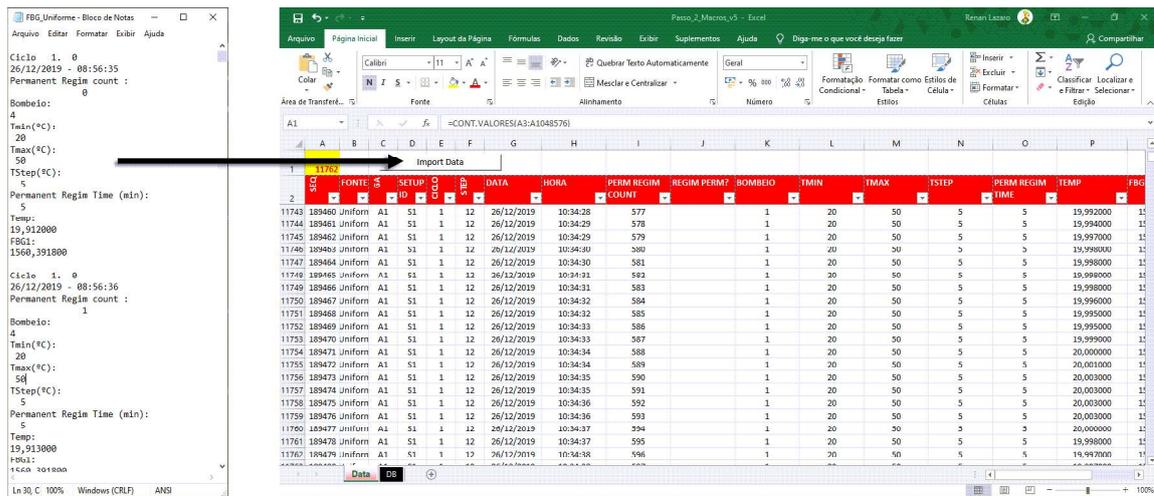


Figura 16 – Tratamento dos dados coletados pelo sistema de caracterização. Os dados coletados são armazenados em um arquivo de texto (esquerda) e importados para uma planilha (direita) por meio de um código de macros, programado na linguagem *Visual Basic*.

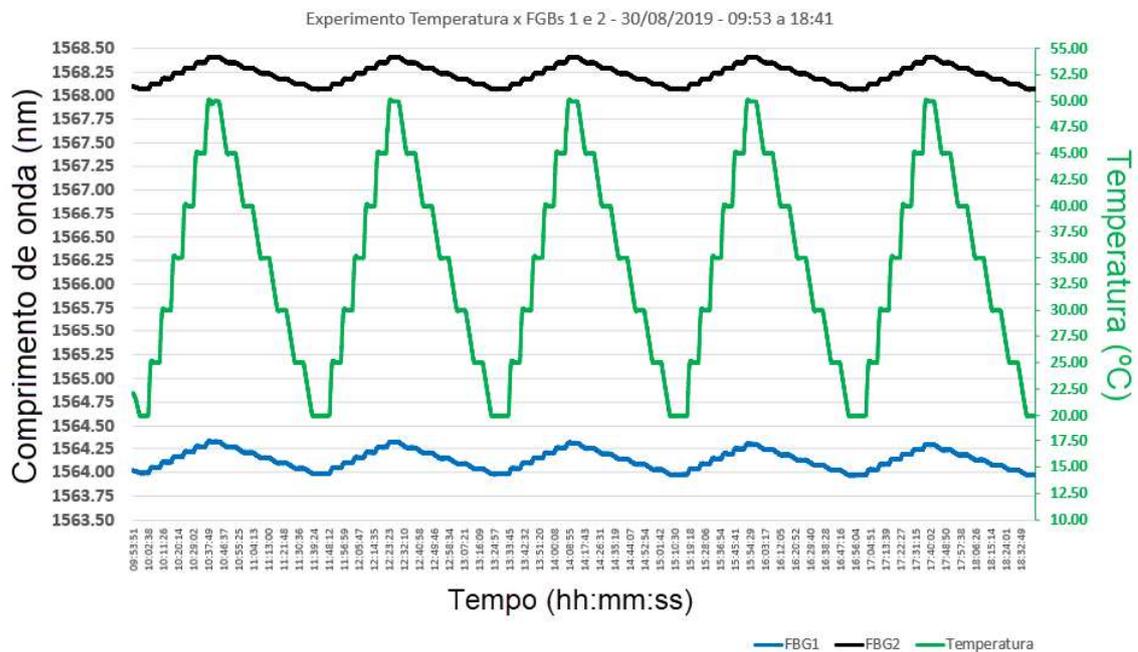


Figura 17 – Dados experimentais coletados de duas FBGs uniformes simultaneamente. No experimento, foram programados 5 ciclos de subida e descida de temperatura, variando de 20 a 50 °C, com saltos de 5°C e 5 minutos de espera. O experimento durou 8 horas e 42 minutos sem nenhuma interferência humana durante a coleta dos dados.

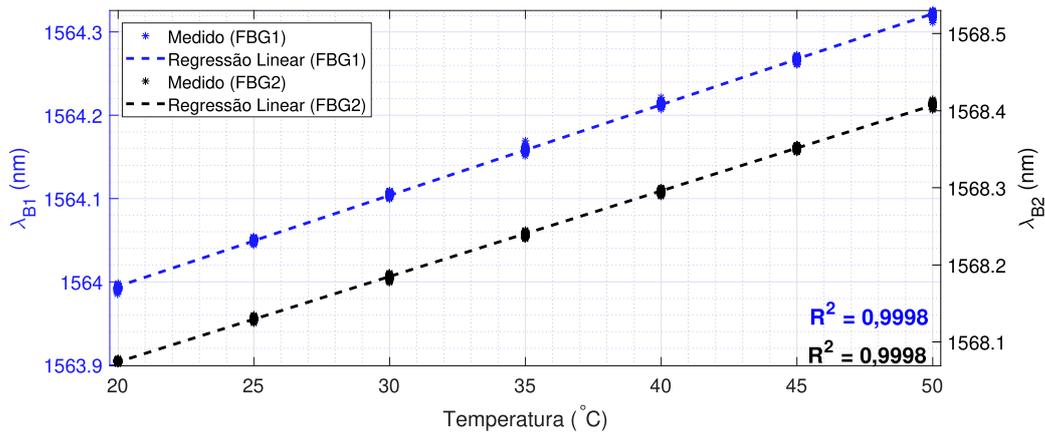


Figura 18 – Curvas de caracterização das duas FBGs usadas para validar a metodologia de caracterização desenvolvido.

temperatura coletados em amostras de 30 ml de água e de óleo mineral. Nos Capítulos 4 e 5 serão apresentados métodos experimentais e teóricos que permitem compreender com mais clareza a relação que a reta temperatura versus tempo tem com as propriedades térmicas dos líquidos (densidade, calor específico e condutividade térmica).

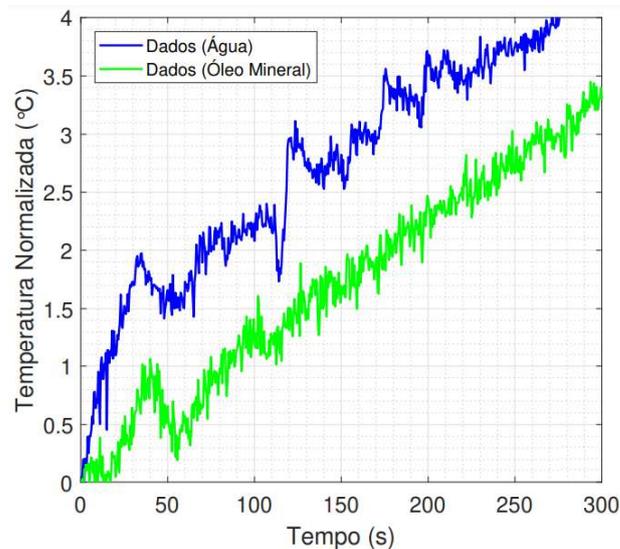


Figura 19 – Resultado dos experimentos de prova de conceito. A curva apresenta temperaturas medidas na água e no óleo mineral ao longo do tempo a partir de um sensor de temperatura baseado em redes de Bragg em fibra.

4 MEDIÇÃO DA DENSIDADE

4.1 Introdução

A fim de desenvolver um sistema independente de medição de condutividade térmica, este capítulo propõe um sensor óptico de densidade em líquidos baseado em diafragmas. Os dados de densidades são obtidos indiretamente, a partir da pressão do líquido aplicada ao diafragma. Os resultados incluem uma caracterização capaz de calibrar a sensibilidade cruzada da temperatura existente no sensor, além de estimativas de densidade em amostras de água, diesel e petróleo bruto.

4.2 Princípio de Funcionamento

4.2.1 Materiais e métodos

Como visto na Seção 2.2, a condutividade térmica, em regime transiente, se relaciona diretamente com a densidade e o calor específico do material. Dessa forma, na construção de um sistema independente de medição de condutividade térmica e calor específico (incluindo suas muitas variantes), a estimativa da densidade dos fluidos precisa ser realizada antes da análise dos demais parâmetros térmicos (INCROPERA et al., 2007). Para a tarefa, é proposto um sensor óptico baseado em diafragmas capaz de aferir pressão e densidade em líquidos, conforme apresentado na Seção 2.4.2.2. Em relação aos sensores diafragmas, o parâmetro que influencia diretamente o movimento dos diafragmas é a pressão hidrostática existente no líquido. Dessa forma, após a mitigação da sensibilidade cruzada da temperatura no sensor, é possível relacionar (linearmente) essa pressão aplicada ao sensor com a deformação sofrida pela FBG.

O esquemático do sensor de densidade proposto é apresentado na Figura 20. Para avaliar a pressão hidrostática, uma das FBGs (inscritas a partir do métodos citado na Seção 3.3.1) é embutida entre dois diafragmas micro usinados, feitos de borracha nitrílica. A escolha deste material se dá devido à estabilidade química da borracha nitrílica, que permite a aplicação da borracha nitrílica em ambientes corrosivos ou agressivos (LEAL-JUNIOR et al., 2018), além de possuir maior resistência à temperatura do que a borracha de silicone, empregada por exemplo em (DÍAZ et al., 2018). Além disso, a borracha nitrílica possui alta flexibilidade (módulo de Young de cerca de 3.5 MPa) e é resistente ao petróleo bruto, uma vez que a proposta deste trabalho é criar um sistema seguro e resistente a diferentes óleos inflamáveis e corrosivos.

A imagem ampliada do sensor, apresentado na Figura 20, mostra os componentes

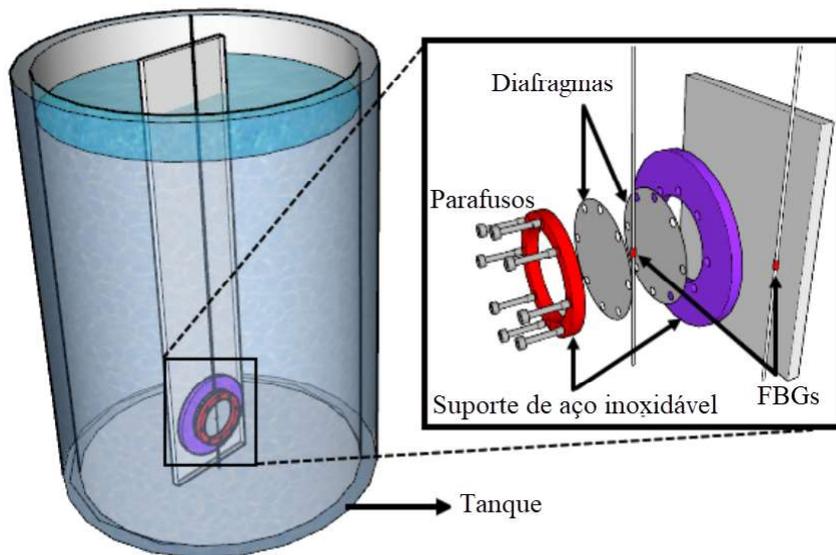


Figura 20 – Sistema óptico de medição de densidade (baseado em um sensor de diafragma) aplicado no fundo de um tanque. A imagem ampliada destaca aspectos construtivos do sensor, em que duas FBGs são utilizadas: uma embutida no diafragma, e outra próxima do sensor (utilizada na calibração da curva de caracterização).

utilizados na construção do sensor diafragma. Para montar o sensor, são utilizadas duas FBGs, sendo a primeira delas incorporada entre as duas membranas do diafragma. Para isto, a FBG é colocada dentro de um tubo de politetrafluoretileno (PTFE) e colada em ambas as extremidades com adesivo epóxi para evitar o movimento relativo da fibra dentro do tubo. Esse adesivo também é aplicado aos diafragmas e tubo PTFE para garantir o posicionamento fbg no centro do diafragma. Em seguida, o diafragma com a FBG embutida é conectado a uma estrutura de aço inoxidável por meio de uma conexão de parafusos como mostrado na Figura 20. A fixação dos componentes à parede de aço cria uma câmara de ar, que possibilita a deflexão do diafragma para medidas de pressão hidrostática entre 0 e 12 kPa.

Para realizar as medições de densidades, o sensor diafragma é posicionado na parte inferior do tanque, como mostrado na Figura 20. O líquido dentro do tanque aplica uma pressão hidrostática (no diafragma) proporcional à gravidade, nível e densidade do fluido. A tensão mecânica sofrida pelo diafragma, devido à pressão hidrostática aplicada, é transmitida para a FBG, que resulta em um deslocamento no comprimento de onda de Bragg. Portanto, considerando um único fluido no tanque, se o nível líquido e a gravidade forem conhecidos, as Equações 2.21 e 2.22 podem ser utilizadas para estimar a densidade do fluido a partir das mudanças de comprimento de onda de Bragg. Uma vez que a variação de temperatura no sensor provoca deslocamentos em λ_B e mudanças na sensibilidade do diafragma (K_P) (conforme discutido na Seção 2.4.2.2), uma segunda FBG é utilizada

no sistema, a fim de compensar possíveis erros de medição consequentes da mudança de temperatura do líquido durante os experimentos. Conforme mostra a Figura 20, a segunda FBG é posicionada próxima às membranas do diafragma.

4.3 Resultados e Discussões

4.3.1 Caracterização da pressão e temperatura

Como a pressão hidrostática está geralmente na faixa de alguns kPa, a caracterização da pressão foi realizada posicionando-se pesos calibrados no centro do diafragma, resultando em pressões de 0 a 12 kPa, com intervalos de 2 kPa, conforme apresentado na Figura 21 (a). Os pesos calibrados cobrem a área do diafragma, a fim de fornecerem distribuições uniformes de pressão sobre o elemento de detecção, o que resulta em uma pressão constante na região FBG. Neste caso, a sensibilidade à pressão (K_P) é definida pela inclinação da regressão linear, calculada a partir da variação de comprimento de onda de Bragg versus a pressão aplicada no diafragma. A caracterização foi realizada em condições de temperatura constantes (ambiente) de cerca de 25 °C. Além disso, a Figura 21 (b) mostra o resultado da caracterização de temperatura feita no sensor, a fim de verificar sua sensibilidade em uma faixa de 20 °C a 40 °C.

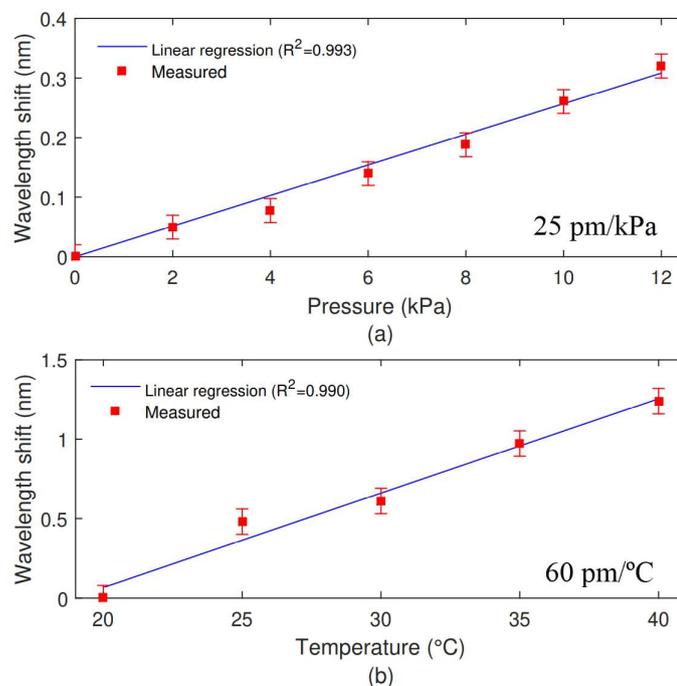


Figura 21 – Curvas de caracterização de (a) pressão e (b) temperatura da FBG incorporada ao diafragma.

Os resultados mostram uma sensibilidade à pressão de 0,025 nm/kPa, onde tal sensibilidade está relacionada às propriedades da fibra óptica e do material diafragma,

bem como às dimensões do diafragma (espessura e diâmetro) (WANG et al., 2010b). Neste caso, a espessura e o diâmetro do diafragma são de 1,8 mm e 30 mm, respectivamente. Os resultados da Figura 21 (a) também mostram uma alta linearidade do sensor proposto, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,993. Para a análise da sensibilidade à temperatura, a FBG embutida no diafragma também apresentou uma resposta linear (com $R^2 = 0,990$), e uma sensibilidade à temperatura em torno de 0,06 nm/°C (maior do que a sensibilidade da FBG fora do diafragma), conforme apresentado na Figura 21 (b). Este significativo aumento na sensibilidade da FBG embutida pode ser justificado pela expansão térmica da material do diafragma (borracha nitrílica), que, somada ao alongamento natural da FBG quando aquecida, causa um deslocamento ainda maior no comprimento de onda da FBG embutida.

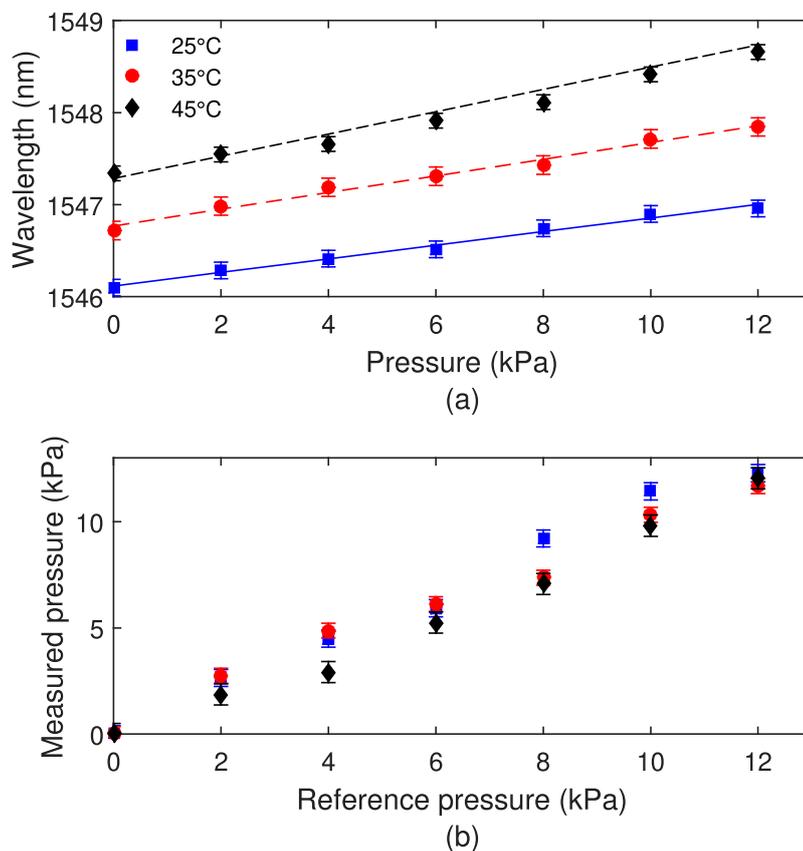


Figura 22 – (a) estimativas de pressão realizadas com o sensor diafragma em diferentes condições de temperatura (sem compensação de temperatura). (b) Estimativas de pressão medidas pelo do sensor proposto com compensação de temperatura (utilizando um FBG adicional como referência de temperatura).

Além disso, a Figura 22 (a) traz resultados da caracterização da pressão em temperaturas tipicamente encontradas em tanques de óleo bruto (25 °C, 35 °C e 45 °C), para avaliar o impacto da variação de temperatura na resposta do sensor. Neste caso, a compensação tem o objetivo de corrigir erros provenientes da alteração do módulo

de elasticidade (módulo de Young) dos diafragmas, à medida que a temperatura da borracha nitrílica é alterada (LEAL-JUNIOR et al., 2018). Essa compensação é possível por meio da segunda FBG do sistema, posicionada próximo ao sensor diafragma para medição de temperatura. Por meio deste método de compensação, foi possível aplicar um fator de correção na sensibilidade e no deslocamento da curva característica do sensor, mitigando assim os erros de medição causados pela variação de temperatura do líquido. Uma comparação entre os valores medidos e aplicados (referência) é mostrado na Figura 22 (b).

Conforme discutido na seção 2.4.2.2, uma vez que o aumento na temperatura do diafragma causa tanto o deslocamento de λ_B , quanto a diminuição do módulo de elasticidade do diafragma, ciclos adicionais de caracterização da pressão foram realizados sob diferentes temperaturas, a fim de que tais efeitos possam ser compensados. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 23 (a), possibilitaram a calibração do deslocamento e da inclinação da curva de caracterização da pressão, para uma faixa de temperatura de 25 a 45 °C. Corrigidos a inclinação e o deslocamento das curvas de calibração, é possível medidas de pressão insensível à temperatura. Na Figura 23 (b) são apresentados valores de pressão estimados e de referência com diferença inferior a 4%.

4.3.2 Estimativas de densidade

Feitas a caracterização e calibração do sensor, a primeira coleta de dados foi realizada posicionando-o no fundo de um tanque contendo as amostras de líquido escolhidas (conforme mostrado na Figura 20). Os experimentos foram realizados utilizando-se água, diesel e petróleo bruto para a medição de densidades em diferentes fluidos. Além disso, os níveis em cada líquido foram alterados (de 0 cm a 40 cm, com intervalos de 10 cm), a fim de demonstrar a capacidade de se estimar densidades sob diferentes condições. A Figura 23 apresenta deslocamentos de comprimento de onda obtidos em função de cada um dos níveis escolhidos, para amostras de água e diesel.

Apesar da alta linearidade obtida em ambas as curvas (R^2 acima de 0,99), o gráfico da Figura 23 mostra inclinações diferentes para a água e o diesel, o que, de acordo com a Equação 2.21, implica diferentes valores de pressão entre água e óleo. Vale ressaltar que as inclinações obtidas no petróleo bruto e no diesel são semelhantes (por possuírem densidades nominais próximas), de modo que não fica clara uma comparação entre petróleo bruto e diesel. Assim, analisando a Figura 23 e as Equações 2.21 e 2.22, pode-se concluir então que a densidade da água é maior que a do diesel.

Por fim, a densidade de cada fluido é analisada no nível de 40 cm usando o método descrito na Seção 4.2.1. As densidades de petróleo bruto e diesel utilizados já são caracterizadas pelo fabricante e distribuidor antes da aplicação por meio dos métodos de normas locais (método NBR-7148), em que as amostras líquidas são posicionadas em um

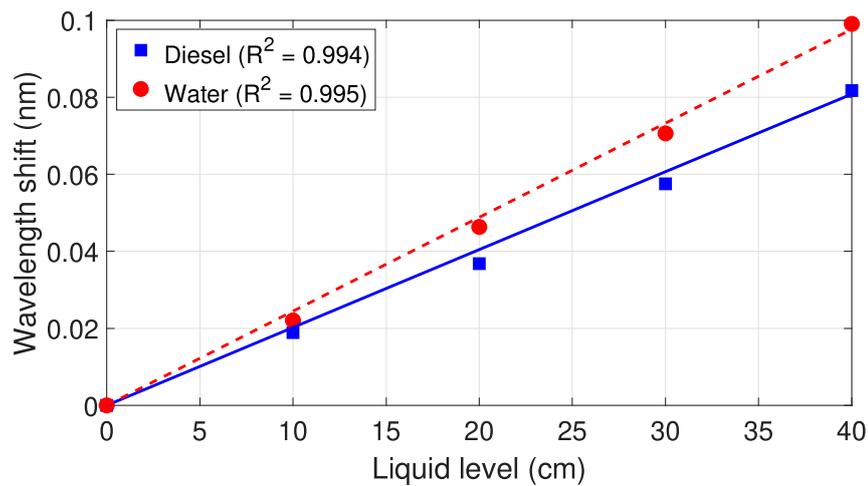


Figura 23 – Mudança de comprimento de onda em função do nível dos líquidos (água e diesel), medida a partir do sensor diafragma proposto.

medidor que estima suas densidades. As amostras de água também são caracterizadas antes da aplicação, onde as amostras são posicionadas dentro de um recipiente com um transdutor de pressão piezoelétrica na parte inferior. As medições hidrostáticas são realizadas com um volume constante de água e a densidade é estimada a partir dos resultados de pressão.

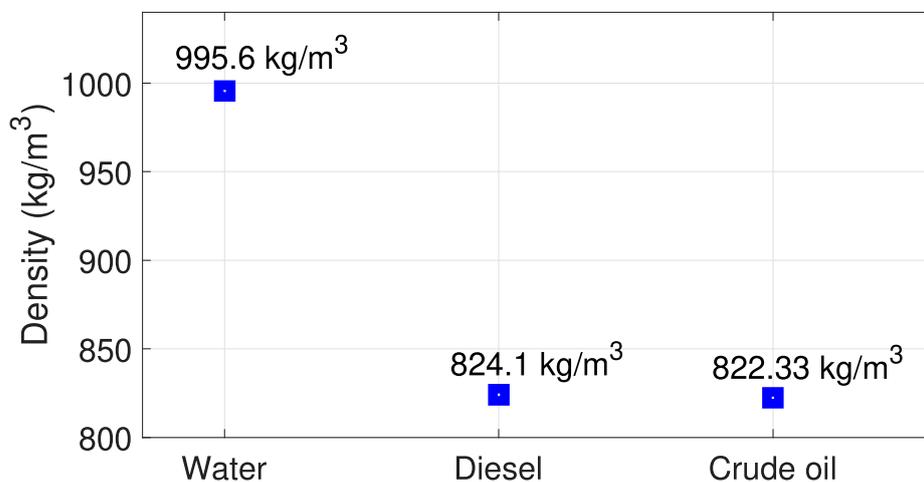


Figura 24 – Valores estimados de densidade de água, diesel e petróleo bruto, medidos pelo o sensor diafragma proposto.

A Figura 24 mostra a estimativa de densidade para água, diesel e petróleo bruto, onde é possível observar uma nítida diferenças de água e óleos. A densidade medida na água é de $995,6 \pm 39,8 \text{ kg/m}^3$ (com valor nominal de $997,0 \text{ kg/m}^3$ para $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Já o diesel e o petróleo bruto apresentam densidades semelhantes, sendo $824,1 \pm 41,2 \text{ kg/m}^3$ e $822,3 \pm 37,0 \text{ kg/m}^3$, respectivamente. Uma vez que a densidade em óleos variam de $790,0 \text{ kg/m}^3$ a $880,0 \text{ kg/m}^3$, os valores encontrados já seriam suficientes para uma distinção entre água

e óleo, por exemplo, em uma interface água-óleo. Assim, o sistema de diafragma proposto é uma opção viável para estimativa de densidade em fluidos, bem como classificação de fluidos com base no perfil de densidade.

5 MEDIÇÃO DE CALOR ESPECÍFICO E CONDUTIVIDADE TÉRMICA

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta as estimativas de calor específico e da condutividade térmica de diferentes líquidos. Os experimentos, realizados em três diferentes estruturas (tanque, Béquer e proveta), não só valida o método desenvolvido, mas também mostra sua reprodutibilidade, que permite realizar estimativas a partir de diferentes estruturas. Além disso, são levantadas discussões acerca da flexibilidade do método, que permite usá-lo como um sistema de detecção de líquidos.

5.2 Princípio de Funcionamento

5.2.1 Materiais e Métodos

5.2.1.1 Experimento I: Análise no Tanque de acrílico

Para validar o método proposto, foram realizados quatro experimentos a partir de três diferentes estruturas. O primeiro deles (Figura 25 (a)) teve como propósito conhecer a resposta do sistema utilizando-se de um aquecedor resistivo de 1 kW, inserido diretamente no líquido. O tanque, feito de acrílico com 1 cm de espessura, possui dimensões de 24 x 24 x 12,5 cm (largura, altura e profundidade, respectivamente), portanto, o volume de água considerado no experimento foi de 7,2 l.

5.2.1.2 Experimento II: Análise no Béquer de vidro

O segundo experimento tem por objetivo validar o método em um ambiente mais suscetível a perdas, fazendo uso de um Béquer de vidro sem qualquer tipo de isolamento térmico para realizar as estimativas. O Béquer, de dimensões 2,1 e 6,5 cm (raio e altura, respectivamente), é posicionado em cima de uma fonte de calor Peltier (TEC1-12706, Hebei IT), configurada para uma potência de 12 W por um controlador de temperatura TED 200C (Thorlabs) - Figura 25 (b). As amostras de líquido utilizadas nas estimativas foram água e óleo mineral.

5.2.1.3 Experimento III: Análise na Proveta de vidro

Já o terceiro experimento é realizado em uma proveta de vidro de dimensões 2,1 e 19,5 cm (raio e altura, respectivamente), conforme mostra a Figura 25 (c). O objetivo desse

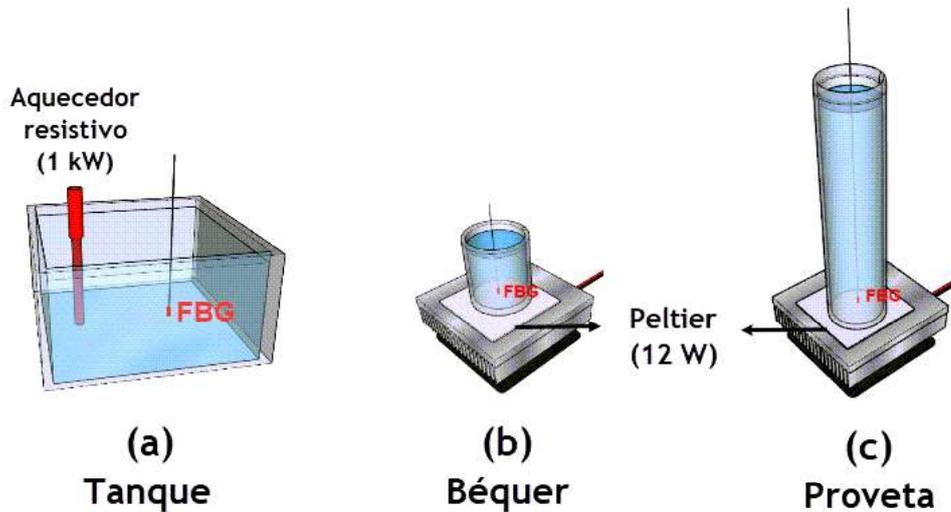


Figura 25 – Esquemático das estruturas utilizadas para a avaliação do método proposto, sendo tais estruturas baseadas em: (a) tanque de acrílico, (b) Béquer de vidro e (c) proveta de vidro.

experimento é realizar um teste de bancada que permita aprimoramentos (como medições quasi-distribuídas) e adição de novos sensores (tais como os de densidades e nível) a partir de uma mesma estrutura. Além disso, como o volume de líquido na proveta é 9,88 vezes maior do que no Béquer, as perdas de calor e a convecção natural do líquido tendem a gerar menos incertezas nas estimativas. Com exceção do recipiente (proveta), os materiais utilizados na construção do sistema foram os mesmos empregados no experimento do Béquer. Já as amostras de líquidos avaliadas foram água, óleo mineral e óleo de silicone (Kryo 51).

5.2.1.4 Experimento IV: Análise da potência térmica

Por fim, o último experimento apresentado tem dois principais objetivos, são eles: integrar os dois sistemas apresentados (medindo densidade, calor específico e condutividade térmica a partir de um único sistema) e avaliar o comportamento do fluxo de calor no *setup*. Dessa forma, os materiais utilizados neste experimento são os mesmos usados no experimento do Béquer, adicionado do sensor diafragma para medições de densidade e uma fonte DC modelo 2231A-30-3 (KEITHLEY, USA). A função da fonte DC é controlar a corrente de alimentação do peltier, que, neste caso, varia de 0,25 a 1 A, com intervalos de 0,25 A.

5.2.2 Capacidade de calor específico

Rearranjando a equação fundamental da calorimetria (Eq. 2.1), o calor específico de cada líquido (em cal/g°C) pode ser obtido por meio da equação:

$$Cp = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}, \quad (5.1)$$

onde Q (em cal) pode ser calculado por:

$$Q = q_x \cdot \Delta t, \quad (5.2)$$

sendo Δt (em s) o tempo de amostragem e q_x a potência da fonte de calor (em cal/s). Uma vez que a potência de aquecimento dos equipamentos é dada em Watts, a conversão de W para cal/s pode ser feita considerando-se 1 W equivalente a 0,2388 cal/s. Além disso, a massa m (em g) apresentada na Equação 5.1 pode ser obtida por:

$$m = \rho \cdot V, \quad (5.3)$$

onde ρ é a densidade do líquido (em g/cm^3) e V é o volume de líquido dentro do recipiente (em cm^3). Por fim, ΔT , apresentado na Equação 5.1, refere-se à variação de temperatura (em °C) medida pelo sensor de temperatura durante os testes.

5.2.3 Condutividade térmica

A estimativa da condutividade térmica em líquidos, ainda que um pouco mais complexa do que a de Cp , pode ser obtida por meio de outros parâmetros térmicos relacionados a ela. Por exemplo, as relações de efusividade térmica e difusividade térmica, apresentadas na seção 2.2.6, relacionam k com Cp e ρ . Já a Lei de Fourier (discutida na seção 2.2.3) relaciona k com o fluxo de calor q'' (em cal/s), que por sua vez depende de Δt e ΔT (veja na Equação 5.2).

Conhecendo-se as propriedades térmicas das quais k é dependente, uma base de dados contendo parâmetros de diversos fluidos pode mostrar a variabilidade da condutividade térmica. Além disso, por meio de regressões lineares e polinomiais, pode ser obtida a equação da condutividade térmica em função dos demais parâmetros.

Considerando os dados de ρ , Cp e k apresentados no Quadro 1 e aplicada a regressões lineares e polinomiais de primeira e segunda ordem, pode-se concluir que uma equação polinomial de primeira ordem (obtida por meio de uma regressão polinomial) apresenta a menor variabilidade com relação aos valores de k . Assim, a equação que representa um modelo polinomial para calcular a condutividade em líquido será:

$$k = c \cdot (\beta_0 + \beta_1 \cdot \rho + \beta_2 \cdot Cp) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta T}, \quad (5.4)$$

onde c é o coeficiente de calibração, β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes da equação polinomial, ρ é a densidade do líquido, Cp é o calor específico (estimado por meio da Equação 5.1), Δt é o tempo de medição e ΔT é a variação da temperatura. Os coeficientes da regressão polinomial encontrados são: $\beta_0 = 0,7556$; $\beta_1 = 0,0008386$ e $\beta_2 = 0,8788$.

Tabela 1 – Propriedades térmicas dos líquidos utilizados na regressão polinomial.

Líquido	$\rho(kg/m^3)$	$Cp(cal/g^{\circ}C)$	$k(W/mK)$
Água	997,0	0,998	0,613
Óleo Mineral	867,0	0,454	0,133
Glicerina	1259,9	0,508	0,286
Acetona	784,5	0,308	0,180
Etanol	783,4	0,613	0,167
Metanol	784,5	0,607	0,204
Óleo de Máquina	884,1	0,456	0,145
Petróleo	800,0	0,509	0,159
Etilenoglicol	1114,4	0,508	0,252
Refrigerante-134a	1199,7	0,342	0,081
Refrigerante-22	1183,4	0,302	0,083
Ácido Nítrico	1560,0	0,411	0,260

Para calibrar o sistema, basta usar um líquido com propriedades conhecidas e aplicá-las na equação 5.4 rearranjada, descrita como:

$$c = \frac{k}{(\beta_0 + \beta_1 \cdot \rho + \beta_2 \cdot Cp) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta T}}. \quad (5.5)$$

A calibração dos três sistemas apresentados neste trabalho foi feita utilizando água, que, segundo (INCROPERA et al., 2007), apresenta condutividade térmica (a 25 °C) de 0,613 W/mK, $\rho = 0,997g/m^3$ e $Cp = 0,9986 cal/g^{\circ}C$. ΔT e Δt foram obtidos através das medições de temperatura realizadas com o sensor FBG. As constantes de calibração encontradas foram:

$$c_{Tanque} = 0,0102; \quad (5.6)$$

$$c_{Béquer} = 0,00434; \quad (5.7)$$

$$c_{Proveta} = 0,00434. \quad (5.8)$$

5.3 Resultados e Discussões

Antes de realizar os experimentos, a caracterização da FBG foi realizada de acordo com o método apresentado no Capítulo 3, e a relação gráfica de λ_{Bragg} versus temperatura pode ser vista na Figura 26, que apresenta um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9999$ e sensibilidade de 11,5 pm/°C. Tanto na gravação e caracterização quanto nos experimentos, o espectro da FBG foi monitorado por um interrogador de FBG SM125 (Micron optics).

5.3.1 Experimento I: Análise no Tanque de acrílico

Conforme apresentado na seção 5.2.1, o primeiro experimento foi realizado em um tanque de acrílico, ilustrado na Figura 25 (a). O objetivo do experimento é avaliar

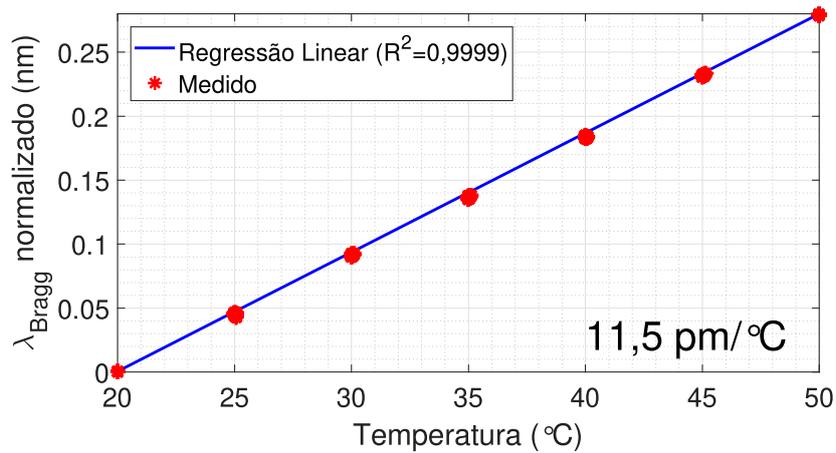


Figura 26 – Curva de caracterização do sensor de temperatura baseado em FBG.

a repetibilidade do método em um tanque com 7,2 l de água e um aquecedor resistivo (inserido diretamente no líquido) de 1 kW. O experimento inicia-se ligando e desligando o aquecedor imerso na água a cada 5 minutos e coletando a temperatura do líquido com a FBG. Uma vez que o sistema é baseado em uma técnica transiente, foram selecionadas as três amostras transientes de temperatura, conforme destaca a Figura 27.

Ainda na Figura 27, que mostra a variação da temperatura da água em função do tempo, é possível notar uma pequena variação na terceira amostra coletada (que implica num coeficiente de linearidade de $R_{A3}^2 = 0,9793$, contra $R_{A1}^2 = 0,9891$ e $R_{A2}^2 = 0,9942$ da primeira e segunda amostra, respectivamente). Tal variação se dá devido às perdas de calor existentes no sistema. Uma possível solução para este problema é a adição de isolamentos térmicos, para reduzir as interações do sistema com o ambiente externo.

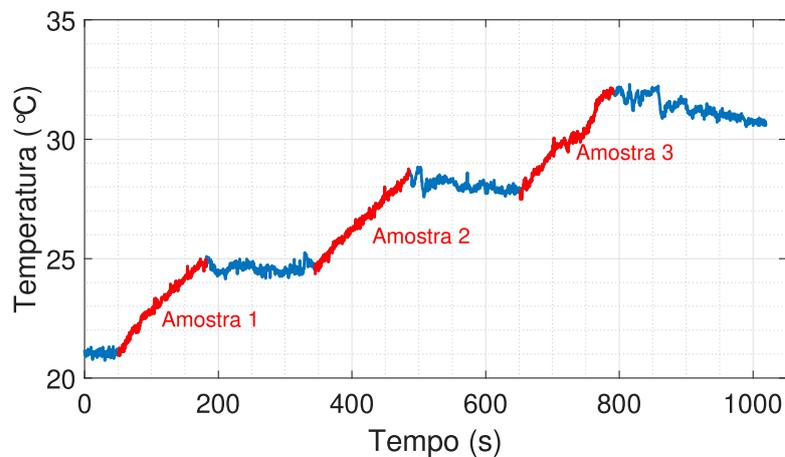


Figura 27 – Curva da temperatura medida no experimento do tanque de acrílico.

Substituindo os dados do já conhecidos do sistema nas Equações 5.1-5.3, é possível estimar os valores de C_p da água para cada um dos três ciclos de medições. Estes valores

(apresentados na Figura 28), mostram que, como esperado, as estimativas das duas primeiras amostras possuem maior acurácia do que a da terceira. Além disso, o valor nominal de C_p da água (no Quadro 1) é de $0,997 \text{ g/m}^3$, o que indicaria um erro de precisão nas estimativas dos três ciclos.

Essa diferença entre o valor estimado e o valor nominal de C_p tem relação com a fonte de calor resistiva utilizada, que aparenta entregar mais de 1 kW para o líquido durante as medições. Para corrigir esta imprecisão do sistema, pode-se compensar o valor de q_x na Equação 5.2, adicionando a este valor uma calibração de potência térmica. Uma vez que o objetivo principal deste trabalho é calcular a condutividade térmica em líquidos de maneira segura, a imprecisão de C_p não impactará o resultado final de k , pois a constante de calibração (apresentada na Equação 5.5) já compensa tais imprecisões.

Feita a estimativa de C_p e a calibração do sistema, é possível então estimar a condutividade térmica por meio da equação 5.4 e a densidade (previamente obtida). Os valores de k estimados em cada ciclo podem ser vistos na Figura 28, que mostra uma incerteza de $0,0664 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ entre os valores obtidos. Essa diferença, assim como na estimativa de C_p , decorre da perda de calor ocorrida durante a coleta de dados da terceira amostra.

Do experimento, pode-se concluir que a constante de calibração consegue compensar erros de imprecisão ocorridos em C_p , contudo, não compensa erros provenientes de perdas de calor durante a coleta dos dados. Este fato evidencia a importância de um sistema bem isolado, que consiga manter as condições de contorno estáveis durante todo o experimento. Apesar disso, as estimativas obtidas apresentam valores coerentes de calor específico e condutividade térmica da água, indicando uma repetibilidade dentro do esperado. Para avaliar melhor a reprodutibilidade do método e a influência das perdas, a seção seguinte apresenta resultados obtidos em um Béquier sem qualquer tipo de isolamento térmico.

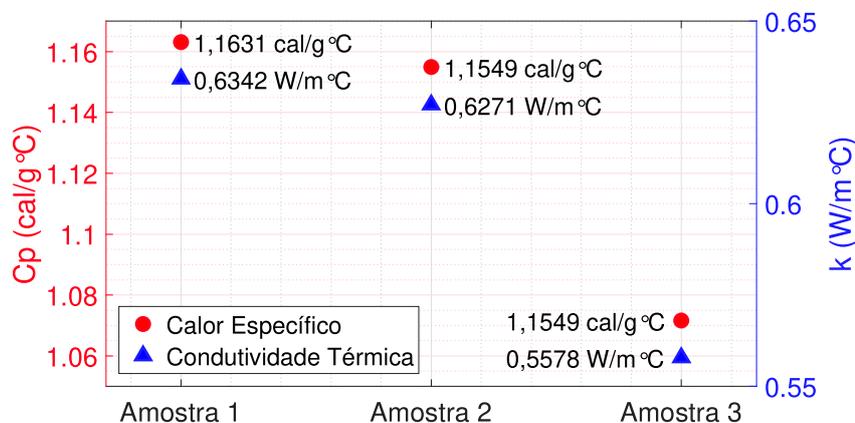


Figura 28 – Calor específico e condutividade térmica da água, estimados nos três ciclos do experimento do tanque

5.3.2 Experimento II: Análise no Béquero de vidro

Assim, o experimento do Béquero tem o objetivo de estimar o calor específico e a condutividade térmica em um pior cenário (sem qualquer tipo de isolante térmico). Para isso, foram colocados 30ml de líquido dentro do Béquero e coletados os dados de três ciclos de aquecimento com amostras de água e óleo mineral, conforme detalhado na seção 5.2.1. Conforme apresentado na Figura 29, as estimativas na água resultaram em valores de $C_p = 0,9956 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ (com valor nominal de $0,9986 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$) e $k = 0,5967 \text{ W/mK}$ (com valor nominal de $0,613 \text{ W/mK}$). Já a amostra de óleo mineral apresentou estimativas de $C_p = 0,5206 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ (com valor nominal de $0,4543$) e $k = 0,1946 \text{ W/mK}$ (com valor nominal de $0,133 \text{ W/mK}$).

Os resultados mostram que, mesmo sem um sistema complexo de isolamento térmico, é possível obter estimativas de calor específico e condutividade térmica com sistema proposto. A diferença maior, encontrada nos valores estimados para o óleo mineral, pode ser explicada pelas (já esperadas) perdas de calor existentes no *setup*. Além disso, a elasticidade do óleo mineral pode ter causado um desvio no valor da condutividade térmica do óleo ao longo de sua vida útil (i.e., cada vez que o óleo mineral é aquecido, suas propriedades térmicas são levemente alteradas).

Para que tal problema seja avaliado, pode-se utilizar um sensor de referência para medir C_p e k da amostra utilizada. Entretanto, para um sistema sem isolamento térmico e com erros provenientes das correntes de convecção, os resultados obtidos estão dentro do esperado (com condutividade térmica do óleo entre $0,1$ e $0,2 \text{ W/mK}$). A fim de reduzir as incertezas (provenientes das perdas de calor e das correntes de convecção) e possibilitar a integração de outros sensores numa mesma estrutura, foi realizado um terceiro experimento em que o Béquero é substituído por uma proveta de vidro.

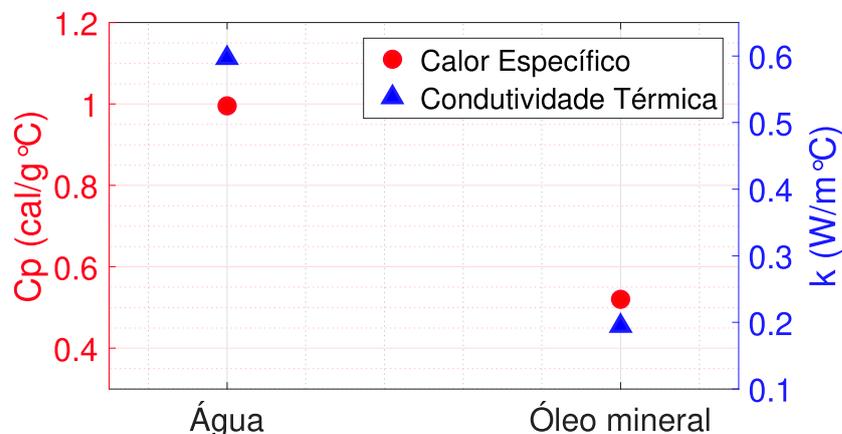


Figura 29 – Calor específico e condutividade térmica da água e do óleo mineral, estimados no experimento do Béquero

5.3.3 Experimento III: Análise no Proveta de vidro

Por possuir um volume de líquido 9,88 vezes maior que o do Béquero ($296,5 \text{ cm}^3$ contra 30 cm^3), o experimento da proveta proporciona maior isolamento entre o sensor de temperatura e os contornos do recipiente. Com isso, as perdas por convecção no topo e a convecção natural do líquido impactam de forma menos significativa na estimativa de C_p e k . Para comparar esse melhora na estimativa, a Figura 30 traz os resultados de C_p e k , estimados nos experimentos do Béquero e da proveta.

Analisando a Figura 30, os valores estimados na água não sofreram variações significativas, quando comparados ao experimento do Béquero. Já no caso do óleo mineral, houve uma aproximação dos valores de C_p e k estimados ($C_p = 0,4547 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e $k = 0,1618 \text{ W/mK}$, respectivamente) com seus valores nominais do óleo mineral ($0,4543 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e $0,133 \text{ W/mK}$, respectivamente). Por fim, uma amostra de óleo mineral (Kryo 51) apresentou valores estimados de $C_p = 0,3865 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ (com valores nominais de $0,3893 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$) e condutividade térmica de $0,1446 \text{ W/mK}$. Vale ressaltar que os experimentos apresentados até este ponto foram realizados antes da pandemia do covid-19. Por conta de restrições no uso dos laboratórios, consequentes da pandemia, não foi possível a realização de novos testes, como por exemplo medições de calor específico e condutividade térmica do Kryo 51 no béquer.

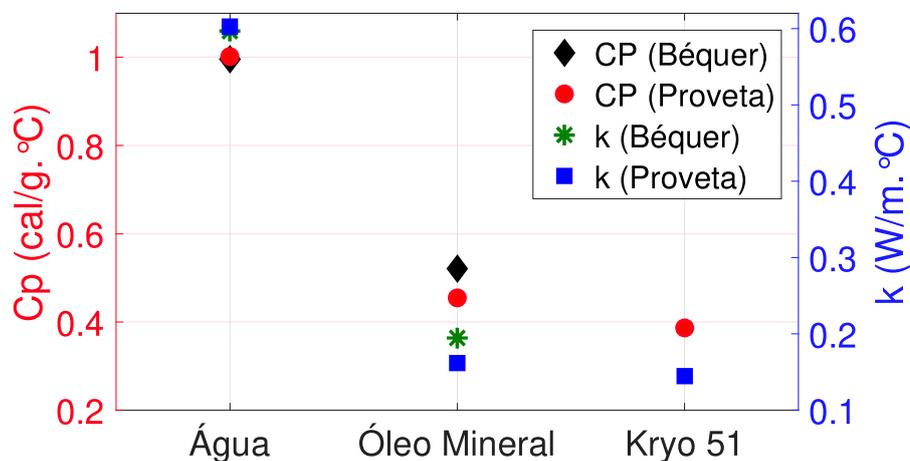


Figura 30 – Calor específico e condutividade térmica da água, do óleo mineral e do Kryo 51, estimados nos experimentos da proveta e do Béquero.

5.3.4 Experimento IV: Análise da potência térmica

Conforme discutido na Seção 2.3, controlar o fluxo de calor em sistemas térmicos é uma tarefa complexa, em especial em métodos transientes de medição. Para avaliar a distribuição do calor no sistema proposto, um último experimento é realizado, com o intuito de entender melhor a resposta do sistema quando submetido a diferentes condições de

geração de calor. Para tanto, uma amostra de 100 ml de água foi avaliada, sendo estimada, a princípio, sua densidade, seguida do calor específico e da condutividade térmica para diferentes situações de potência térmica.

A densidade da água foi estimada por meio do sensor de diafragma. A Figura 31 (a) mostra a variação do comprimento de onda medido pelo sensor no momento em que a pressão referente à amostra é aplicada a ele. Substituindo esta variação do comprimento de onda (0,0136 nm) e a sensibilidade do diafragma (0,025 nm/kPa) na Equação 2.21, uma estimativa de pressão de 0,544 kPa pode ser obtida. Aplicando este valor, a altura da coluna do líquido (5,5 cm) e a aceleração da gravidade (9.80665 m/s^2) à Equação 2.22, foi então estimada uma densidade de $1008,6 \text{ kg/m}^3$ para a amostra de água utilizada.

Já para a compreensão das curvas apresentadas na Figura 31 (b), é preciso inicialmente entender a distribuição do calor que sai do peltier até chegar ao líquido, levando-se em conta o regime de operação e as perdas do sistema. Conforme discutido na Seção 2.3, as medições em métodos transientes são realizadas partindo da transição de um estado inicial até um segundo ponto de equilíbrio térmico, por meio de uma inserção de calor no sistema. Neste contexto, apesar da não necessidade de um elevado tempo de estabilização (como acontece nos métodos estacionários), um controle preciso da potência térmica é requisito para uma boa performance do sistema. Uma solução para isso seria o uso de constantes de calibração no sistema, que compensariam as perdas de calor caso as condições de contorno da calibração e dos experimentos sejam semelhantes. Tal abordagem permite uma significativa simplificação do sistema, pois saber exatamente o valor da potência inserida na amostra pode se tornar uma tarefa complexa.

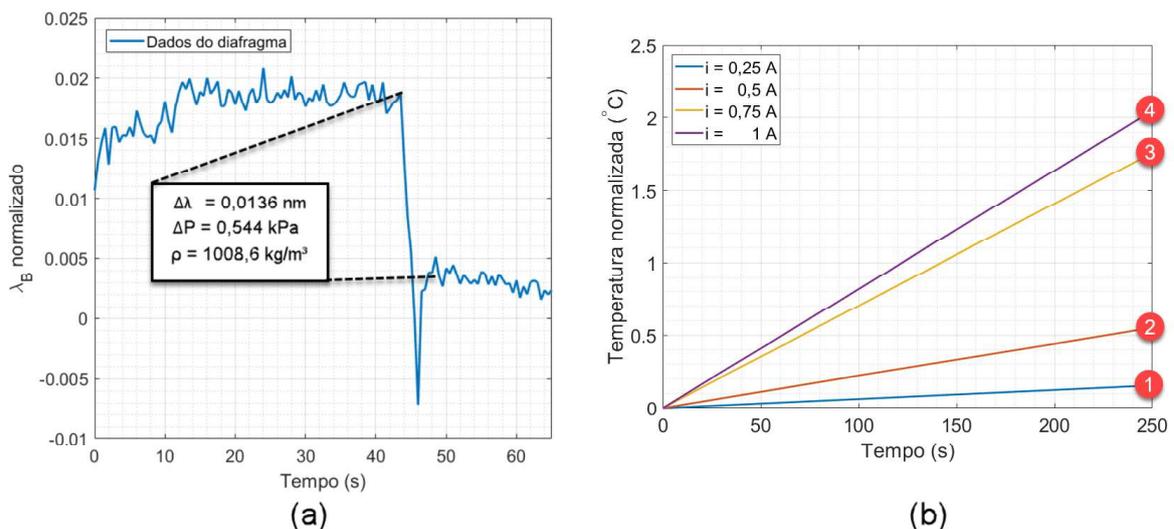


Figura 31 – (a) deslocamento no comprimento de onda da FBG causado pela pressão da água aplicada ao sensor diafragma. (b) curvas de regressão linear da temperatura medida no Béquier para correntes de 0,25; 0,5; 0,75 e 1 A.

De forma breve, as perdas do *setup* podem ser resumidas basicamente a três: no

peltier, no Béquier e no líquido. Como o peltier não está em completo contato com o Béquier, a parte descoberta do peltier perde calor por convecção para o ar. Da mesma forma, o Béquier de vidro, em contato com o peltier, é aquecido com parte do calor gerado. Este calor, absorvido pelo vidro, é transmitido tanto para o líquido, quanto para o ar (por condução e convecção, respectivamente). Por fim, o líquido aquecido perde calor para o topo do recipiente, que, no caso deste experimento, foi coberto por uma espuma isolante térmica.

Assim, quando o peltier é ligado (com o sistema partindo de um estado inicial), todas essas interações térmicas começam acontecer simultaneamente no sistema. Em um determinado momento após ligar o peltier, a distribuição de calor no sistema entra em equilíbrio e o líquido então passa a receber uma parcela constante de calor (considerando que a temperatura do ar seja sempre constante). Dessa análise, pode-se concluir que, para uma resposta precisa e rápida do sistema, a potência térmica gerada pelo peltier deve ser suficientemente grande para que o equilíbrio citado anteriormente seja atingido o mais rápido possível. Além disso, deve-se garantir que, durante todo o experimento, o calor que entra no líquido seja maior do que o calor que sair dele.

Para avaliar tal comportamento, a Figura 31 (b) mostra a inclinação da curva de temperatura versus tempo, para correntes de 0,25; 0,5; 0,75 e 1 A. O aquecimento da água (em cada configuração de corrente) foi realizada durante 10 minutos para que houvesse tempo suficiente para o sistema entrar em equilíbrio. A temperatura de corrente livre (externa) foi de aproximadamente 22 °C. Considerando que a potência gerada no peltier é diretamente proporcional a sua corrente de alimentação (Titov et al., 1997), caso as 4 correntes aplicadas ao sistema fossem suficientemente grandes para preencher as condições supracitadas, as inclinações das curvas apresentadas na Figura 31 (b) deveriam ser proporcionais às respectivas correntes de peltier. Entretanto, as inclinações obtidas (por não serem igualmente espaçadas) indicam que as potências geradas para as curvas 1 e 2 não são suficientemente grandes para que o sistema atinja um equilíbrio na distribuição do fluxo de calor.

Utilizando a inclinação da curva 3 para calibrar o sistema, uma comparação entre os valores estimados de C_p e k pode ser vista na Tabela 2. Assim, uma corrente mínima de 0,75 é necessária para fornecer potência suficiente para o líquido e garantir uma melhor precisão ao sistema proposto. Vale ressaltar que, apesar da curva 3 ter sido utilizada como calibração do sistema, os resultados apresentados nesta seção indicam que quanto maior a corrente (e, portanto, a potência gerada) mais rápido e preciso será o comportamento do seu sistema. Em contrapartida, o peltier utilizado deve ser alimentado com no máximo 1,25 A, considerando as configurações utilizadas.

Além das estimativas de C_p e k apresentados, o método proposto pode ser adaptado para um sistema de identificação de líquidos. Por exemplo, sabendo-se que os valores

Tabela 2 – Estimativas de C_p e k encontrados no estudo da potência potência térmica do sistema.

Curva	i (A)	C_p (cal/g°C)	k (W/mK)
1	0,25	3,7969	17,5164
2	0,5	2,1209	3,1318
3	0,75	0,9986	0,6130
4	1.0	1,1444	0,5682

típicos de k da água ficam em torno de 0,613 W/mK e que os de óleos ficam entre 0,1 e 0,2 W/mK, é possível utilizar um método comparativo para diferenciar o que é água e o que é óleo na Figura 30. Para a distinção entre diferentes óleos (que possuem valores de k próximos) pode-se combinar as estimativas de C_p e k para dar maior assertividade ao método comparativo.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma metodologia óptica de medição de calor específico e condutividade térmica em líquidos. Para validar o método, foram construídos três sistemas, nomeados: tanque, Béquier e proveta. Os três sistemas utilizaram um sensor de temperatura baseado em FBG (de sensibilidade 11,5 pm/°C) para coletar a temperatura e, por meio das equações térmicas apresentadas, foi possível realizar as estimativas. Uma vez que os estudos mostraram uma dependência entre a condutividade térmica e a densidade, um sensor óptico baseado diafragma (com sensibilidade 0,025 nm/kPa) é proposto, permitindo medições seguras em líquidos como o água, diesel e petróleo bruto. Para estimar o calor específico, foi utilizada a equação fundamental da calorimetria, enquanto a equação da condutividade térmica foi obtida experimentalmente, após uma regressão polinomial que correlacionava: densidade, calor específico, condutividade térmica, variação da temperatura e do tempo de amostragem.

Para simplificar o processo de caracterização de sensores de temperatura, foi desenvolvido um sistema de caracterização. Para tanto, foi elaborado um código que automatiza a coleta de dados de temperatura e comprimento de ondas das FBGs. Para validar o sistema, foram caracterizadas simultaneamente duas FBGs (centradas em 1564 nm e 1568, respectivamente). A sensibilidade das FBGs foram de 10,9 pm/°C e 11,1 pm/°C, e o coeficientes de correlação de ambas foi $R^2 = 0,9998$.

Com uma das FBGs caracterizadas, foi apresentada uma prova de conceito que relacionava a temperatura medida com parâmetros térmicos do líquido. O experimento foi realizado utilizando-se água e óleo mineral, e, mantendo as demais condições constantes, a inclinação das temperaturas medidas na água foi maior que a do óleo mineral. Para melhor compreender a relação desta inclinação com as propriedades térmicas, foram então realizados os experimentos de validação.

Os estudos de condutividade térmica mostraram que para sua estimativa era necessário conhecer a densidade do líquido avaliado. Para isto, foi proposto um sensor óptico baseado em diafragmas, feitos de borracha nitrílica, que permite medições em líquidos inflamáveis e corrosivos, como é o caso do petróleo bruto. O sensor é composto por duas FBGs, que permitem, além da medição de pressão e densidade, a calibração de erros provocados por mudança na temperatura do sensor no momento da medição. O sensor (com sensibilidade 0,025 nm/kPa) foi aplicado para cálculo de densidade da água ($995,6 \pm 39,8 \text{ kg/m}^3$), diesel ($824,1 \pm 41,2 \text{ kg/m}^3$) e petróleo bruto ($822,3 \pm 37,0 \text{ kg/m}^3$).

O primeiro experimento foi realizado em um tanque de acrílico. Neste caso, foi avaliado a repetibilidade do *setup* montado, sendo realizadas três medições de calor

específico e condutividade térmica na água. Os resultados mostraram uma incerteza de $0,0664 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, que pode ter sido proveniente de perdas de calor do sistema. Além disso, o experimento apresentou uma imprecisão de $0,128 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ na estimativa de calor específico, que pode ser compensada por uma constante de calibração na equação do calor específico. Por outro lado, as incertezas encontradas nas estimativas de condutividade térmica não são compensáveis, o que realça a importância de um bom isolamento térmico no sistema.

Para avaliar a resposta do método em um sistema sem isolamento térmico, foi realizado o experimento do Béquier. O experimento foi executado utilizando-se água e óleo mineral, e os resultados mostraram uma imprecisão maior na estimativa da condutividade térmica do óleo mineral. Apesar disso, as estimativas $k = 0,1946 \text{ W/mK}$ (com valor nominal de $0,133 \text{ W/mK}$) estão dentro do esperado, uma vez que a condutividade térmica de óleos gira em torno de $0,1$ a $0,2 \text{ W/mK}$.

O experimento da proveta foi feito com água, óleo mineral e óleo de silicone (kryo 51). No caso da proveta, por possuir uma coluna maior de líquido, as incertezas causadas pela convecção natural do líquido e pelas perdas de calor são menos relevantes. Dessa forma, os resultados da proveta apresentaram $C_p = 0,3865 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ (com valores nominais de $0,3893 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$) e $k = 0,1618 \text{ W/mK}$. Tais resultados permitem não só a estimativa de C_p e k , mas também a utilização do método para desenvolver um sistema de identificação de líquidos por meio de valores previamente tabelados de C_p e k .

O último experimento teve o intuito de avaliar a distribuição de potência térmica no sistema. Para isto, foi montado uma estrutura com o Béquier, variando-se a corrente do peltier de $0,25$ a 1 A , com intervalos de $0,25 \text{ A}$. Os resultados mostraram que correntes maiores (e, portanto, fluxo de calor maior) resultam em uma estabilização mais rápida da distribuição de calor no sistema, aumentando a precisão e diminuindo o tempo de resposta do sistema.

Deste modo, os resultados apresentados neste trabalho contribuem para o aprimoramento no processo de monitoramento térmico em líquidos, permitindo estimar densidade, calor específico e condutividade térmica em líquidos inflamáveis. O fato de os sensores apresentados serem puramente ópticos traz vantagens como resistência à corrosão e à interferência eletromagnética, além de poderem operar em ambientes agressivos e inflamáveis, comumente encontrados em operações de refinamento de petróleo bruto e resfriamento de equipamentos industriais. Além disso, o sistema de caracterização apresentado no Capítulo 3 permite uma redução do tempo necessário para caracterizar FBGs, especialmente em sondas com várias FBGs multiplexadas.

Os trabalhos futuros incluem a compensação das perdas de temperatura nos *setups*, seja com a elaboração de um isolamento térmico mais eficiente, seja com a adição de sensores de referência. Para diminuir o tempo de estabilização da potência térmica, o peltier utilizado pode ser substituído por uma fonte de calor mais potente. Além disso,

os estudos apresentados neste trabalho indicam a possibilidade de construir um sensor de condutividade térmica portátil, baseada no método fio quente em fibra óptica, que possa ser aplicado em qualquer condição, desconsiderando-se o fluxo de calor existente no líquido. Por fim, a multiplexação de FBGs permitirá medições quasi-distribuídas e a detecção de nível numa interface água-óleo.

Referências

- Agrawal, G. P. Optical fibers. In: _____. *Fiber-Optic Communication Systems*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 24–78. Citado na página 45.
- AKPOMUVIE; ORHIOGHENE; BENEDICT. Tragedy of commons: Analysis of oil spillage, gas flaring and sustainable development of the niger delta of nigeria. *Journal of Sustainable Development*, v. 4, 04 2011. Citado na página 27.
- AL-AJLAN, S. A. Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied Thermal Engineering*, v. 26, n. 17, p. 2184 – 2191, 2006. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431106001256>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 44.
- ANTUNES, P. F. da C. *Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas*. Tese (Doutorado), Aveiro-PT, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 47.
- ASHRAF, A. *Thermal Conductivity Measurement by Hot Disk Analyser*. 2014. Citado na página 44.
- ASTM. Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hotplate apparatus. *ASTM International*, n. ASTM C177-13, 2013. Citado na página 41.
- BEIMS, R. F. et al. Hydrothermal liquefaction of biomass to fuels and value-added chemicals: Products applications and challenges to develop large-scale operations. *Biomass and Bioenergy*, v. 135, p. 105510, 2020. ISSN 0961-9534. Citado na página 28.
- BEJAN, A. *Convection Heat Transfer, Fourth Edition*. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9780470900376. Citado na página 37.
- BERGE, A.; ADL-ZARRABI, B.; HAGENTOFT, C.-E. Determination of specific heat capacity by transient plane source. *Frontiers of Architectural Research*, v. 2, n. 4, p. 476 – 482, 2013. Citado na página 39.
- CARLOMAGNO, G. M.; DISCETTI, S.; ASTARITA, T. Experimental assessment of a new heat flux sensor for measuring convective heat transfer coefficients. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Taylor Francis, v. 8, n. 1, p. 37–49, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.3166/qirt.8.37-49>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 37 e 38.
- CEZAIIRLIYAN, A.; MAGLIC, K.; PELETSKY, V. *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods: Volume 2 Recommended Measurement Techniques and Practices*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 44.
- DÍAZ, C. A. R. *Optical Fiber Sensing for Sub-Millimeter Intrinsically-Safe Liquid Level Monitoring*. Tese (Doutorado), Vitória-ES, 2018. Citado na página 45.
- DÍAZ, C. A. R. et al. Liquid level measurement based on fbg-embedded diaphragms with temperature compensation. *IEEE Sensors Journal*, v. 18, n. 1, p. 193–200, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 29, 45, 48, 49 e 59.

ELKHOLY, A.; SADEK, H.; KEMPERS, R. An improved transient plane source technique and methodology for measuring the thermal properties of anisotropic materials. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 135, p. 362 – 374, 2019. ISSN 1290-0729. Citado na página 44.

EMANUEL, M. Effusivity sensor package (esp) system for process monitoring and control. In: . [S.l.: s.n.], 2006. Citado na página 39.

ERDOGAN, T. Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, v. 15, n. 8, p. 1277–1294, 1997. Citado na página 46.

FAHIM, M. A.; ALSAHHAF, T. A.; ELKILANI, A. Chapter 12 - clean fuels. In: FAHIM, M. A.; ALSAHHAF, T. A.; ELKILANI, A. (Ed.). *Fundamentals of Petroleum Refining*. Amsterdam: Elsevier, 2010. p. 303–324. ISBN 978-0-444-52785-1. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527851000127>>. Citado na página 29.

FUJIWARA, E.; WU, Y. T.; SUZUKI, C. K. Vibration-based specklegram fiber sensor for measurement of properties of liquids. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 50, n. 12, p. 1726–1730, 2012. ISSN 0143-8166. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014381661200214X>>. Citado na página 46.

GHASSEMI, M.; SHAHIDIAN, A. *Nano and Bio Heat Transfer and Fluid Flow*. [S.l.: s.n.], 2017. 1-145 p. Citado na página 35.

HARRIS, A. et al. Measuring the thermal conductivity of heat transfer fluids via the modified transient plane source (mtps). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 116, p. 1309–1314, 06 2014. Citado na página 44.

HE, Y. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. theoretical considerations. *Thermochimica Acta*, v. 436, n. 1, p. 122 – 129, 2005. ISSN 0040-6031. Citado na página 44.

HE, Y. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 2. characterization of thermal greases. *Thermochimica Acta*, v. 436, n. 1, p. 130 – 134, 2005. ISSN 0040-6031. Citado na página 44.

HEIKENFELD, J. et al. Wearable sensors: modalities, challenges, and prospects. *Lab Chip*, The Royal Society of Chemistry, v. 18, p. 217–248, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1039/C7LC00914C>>. Citado na página 27.

HILL, K. O. et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by uv exposure through a phase mask. *Applied Physics Letters*, American Institute of Physics, v. 62, n. 10, p. 1035–1037, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

Hill, K. O.; Meltz, G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. *Journal of Lightwave Technology*, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 48.

HOWELL, J.; SIEGEL, R.; MENGÜÇ, M. P. *Thermal Radiation Heat Transfer*. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN ISBN-10: 1439805334. Citado na página 38.

- INCROPERA, F. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. [S.l.]: Wiley, 2007. ISBN 9780471761150. Citado 9 vezes nas páginas 15, 33, 34, 36, 38, 39, 40, 59 e 70.
- Kliche, K. et al. Sensor for gas analysis based on thermal conductivity, specific heat capacity and thermal diffusivity. In: *2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1189–1192. Citado na página 38.
- KOSKY, P. et al. Chapter 12 - mechanical engineering. In: KOSKY, P. et al. (Ed.). *Exploring Engineering (Third Edition)*. Third edition. Boston: Academic Press, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 15, 34, 35 e 37.
- LAZARO, R. C. Código de caracterização de sensores de temperatura baseados em fbgs. 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/10ltNxma2JUlxWg96_EWqbYE2f8QzLrvm/view?usp=sharing>. Citado na página 55.
- LEAL-JUNIOR, A. et al. Material features based compensation technique for the temperature effects in a polymer diaphragm-based fbg pressure sensor. *Opt. Express*, OSA, v. 26, n. 16, p. 20590–20602, Aug 2018. Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-26-16-20590>>. Citado 4 vezes nas páginas 46, 49, 59 e 63.
- LEAL-JUNIOR, A.; FRIZERA, A.; MARQUES, C. A fiber bragg gratings pair embedded in a polyurethane diaphragm: Towards a temperature-insensitive pressure sensor. *Optics Laser Technology*, v. 131, p. 106440, 2020. ISSN 0030-3992. Citado 3 vezes nas páginas 28, 39 e 48.
- LEAL-JUNIOR, A. et al. Multi-interface level in oil tanks and applications of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, v. 40, p. 82–92, 01 2018. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 46.
- LEAL-JUNIOR, A. G. *Polymer optical fiber sensor for healthcare devices: from material analysis to practical applications*. Tese (Doutorado), Vitória-ES, 2018. Citado na página 45.
- LEAL-JUNIOR, A. G. et al. Compensation method for temperature cross-sensitivity in transverse force applications with fbg sensors in pofs. *J. Lightwave Technol.*, OSA, v. 36, n. 17, p. 3660–3665, Sep 2018. Disponível em: <<http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-36-17-3660>>. Citado na página 49.
- LEAL-JÚNIOR, A. G. et al. Simultaneous measurement of axial strain, bending and torsion with a single fiber bragg grating in cytop fiber. *Journal of Lightwave Technology*, v. 37, n. 3, p. 971–980, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 29, 45 e 47.
- LI, H. et al. Retrofit application of traditional petroleum chemical technologies to coal chemical industry for sustainable energy-efficiency production. *Energy*, v. 218, p. 119493, 2021. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220326001>>. Citado na página 29.
- LIENHARD, J. A heat transfer textbook. *J Heat Transfer*, v. 108, 01 2013. Citado na página 38.

- MALDONADO, O. Pulse method for simultaneous measurement of electric thermopower and heat conductivity at low temperatures. *Cryogenics*, v. 32, n. 10, p. 908 – 912, 1992. ISSN 0011-2275. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001122759290358H>>. Citado na página 42.
- MARQUES, R. et al. Corrosion resistant fbg-based quasi-distributed sensor for crude oil tank dynamic temperature profile monitoring. *Sensors*, v. 15, p. 30693–30703, 12 2015. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 33.
- MARTIN, F. D.; COLPITTS, R. M. 5 - reservoir engineering. In: LYONS, W. C. (Ed.). *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*. Houston: Gulf Professional Publishing, 1996. p. 1 – 362. ISBN 978-0-88415-643-7. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780884156437500091>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 38.
- MIGNANI, A. G.; BALDINI, F. Biomedical sensors using optical fibres. *Reports on Progress in Physics*, IOP Publishing, v. 59, n. 1, p. 1–28, jan 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0034-4885/59/1/001>>. Citado na página 45.
- MILLER, R. J. 7 - petroleum economics. In: LYONS, W. C. (Ed.). *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*. Houston: Gulf Professional Publishing, 1996. p. 985 – 1033. ISBN 978-0-88415-643-7. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978088415643750011X>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 33.
- MIN, R. et al. Inscription of bragg gratings in undoped pmma mpof with nd:yag laser at 266nm wavelength. *Opt. Express*, OSA, v. 27, n. 26, p. 38039–38048, Dec 2019. Citado na página 52.
- MISHRA, V. et al. Fiber grating sensors in medicine: Current and emerging applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 167, n. 2, p. 279 – 290, 2011. ISSN 0924-4247. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092442471100118X>>. Citado na página 47.
- MYLONA, S. et al. High-pressure thermal conductivity measurements of a (methane + propane) mixture with a transient hot-wire apparatus. *Journal of Chemical Engineering Data*, v. 65, 01 2020. Citado na página 43.
- Neeharika, V.; Pattnaik, P. K. Optical mems pressure sensors incorporating dual waveguide bragg gratings on diaphragms. *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 3, p. 681–687, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 48.
- OULD-AMER, Y. et al. Forced convection cooling enhancement by use of porous materials. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 19, n. 3, p. 251 – 258, 1998. ISSN 0142-727X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142727X98000046>>. Citado na página 37.
- PAUL, G. et al. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 7, p. 1913 – 1924, 2010. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110000729>>. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 40.

- PEVEC, S.; DONLAGIC, D. Multiparameter fiber-optic sensor for simultaneous measurement of thermal conductivity, pressure, refractive index, and temperature. *IEEE Photonics Journal*, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2017. Citado na página 29.
- PRABHUGOUD, M.; PETERS, K. Modified transfer matrix formulation for bragg grating strain sensors. *Journal of Lightwave Technology*, v. 22, n. 10, p. 2302–2309, 2004. Citado na página 51.
- SALAZAR, A. n. On thermal diffusivity. *European Journal of Physics*, IOP Publishing, v. 24, n. 4, p. 351–358, may 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0143-0807/24/4/353>>. Citado na página 39.
- SANCHEZ, M. R. A. *Desenvolvimento de Sensores Baseados em Grades de Bragg para Instrumentação em Exoesqueleto de Membro Inferior*. Tese (Doutorado), Vitória-ES, maio 2020. Citado na página 45.
- SCHÜTZE, A.; HELWIG, N.; SCHNEIDER, T. Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable industry 4.0. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, v. 7, p. 359–371, 2018. Citado na página 27.
- SILVA, G. et al. Measurement thermal conductivity of water using a all-fiber sensor based on a metallic coated hybrid lpg-fbg structure. In: . [S.l.: s.n.], 2018. p. WF38. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 46.
- SONG, Y.; GROß, U.; HAHNE, E. A new method for thermal diffusivity and thermal conductivity evaluation from transient hot-strip measurements. *Fluid Phase Equilibria*, v. 88, p. 291 – 302, 1993. ISSN 0378-3812. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037838129387119L>>. Citado na página 39.
- THOMAS, J. et al. Femtosecond pulse written fiber gratings: A new avenue to integrated fiber technology. *Laser Photon. Rev.*, v. 6, p. 709–723, 11 2012. Citado na página 46.
- Titov, O. Y. et al. New physical point of view on the peltier effect. In: *XVI ICT '97. Proceedings ICT'97. 16th International Conference on Thermoelectrics (Cat. No.97TH8291)*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 661–663. Citado na página 76.
- TONG, R. jie et al. Large measurement range and high sensitivity temperature sensor with fbg cascaded mach-zehnder interferometer. *Optics Laser Technology*, v. 125, p. 106034, 2020. ISSN 0030-3992. Citado na página 29.
- TURGUT, A.; TAVMAN, I.; TAVMAN, S. Measurement of thermal conductivity of edible oils using transient hot wire method. *International Journal of Food Properties*, Taylor & Francis, v. 12, n. 4, p. 741–747, Jul 2009. ISSN 1094-2912. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 43.
- UDOH, S.; NJUGUMA, J.; PRABHU, R. Modelling and simulation of fiber bragg grating characterization for oil and gas sensing applications. In: *ICONS 2014*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 45.
- VERBOVEN, P. et al. Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven. *Journal of Food Engineering*, v. 43, n. 2, p. 61 – 73, 2000. ISSN 0260-8774. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877499001338>>. Citado na página 38.

WANG, Q. et al. Diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber pressure sensor. In: ZHANG, Y. et al. (Ed.). *5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment*. [S.l.]: SPIE, 2010. v. 7656, p. 1169 – 1176. Citado na página 28.

WANG, Q. et al. Diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber pressure sensor. In: ZHANG, Y. et al. (Ed.). *5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment*. [S.l.]: SPIE, 2010. v. 7656, p. 1169 – 1176. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 62.

WARZOHA, R. J.; FLEISCHER, A. S. Determining the thermal conductivity of liquids using the transient hot disk method. part ii: Establishing an accurate and repeatable experimental methodology. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 71, p. 790 – 807, 2014. ISSN 0017-9310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931013009228>>. Citado na página 44.

ZHANG, X. et al. An overview of a novel concept in biomass pyrolysis: microwave irradiation. *Sustainable Energy Fuels*, The Royal Society of Chemistry, v. 1, p. 1664–1699, 2017. Citado na página 29.

ZHAO, D. et al. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *Journal of Electronic Packaging*, ASME International, v. 138, n. 4, Oct 2016. ISSN 1528-9044. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.4034605>>. Citado 8 vezes nas páginas 15, 35, 38, 40, 41, 42, 43 e 44.

ÇENGEL, Y. *Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2012. ISBN 9788563308511. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.