

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PAULO HENRIQUE RUIZ MAZZO

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA MONITORAMENTO DE
ESCOAMENTO BIFÁSICO UTILIZANDO TRANSDUTOR A FIBRA ÓPTICA**

CURITIBA

2022

PAULO HENRIQUE RUIZ MAZZO

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA MONITORAMENTO DE
ESCOAMENTO BIFÁSICO UTILIZANDO TRANSDUTOR A FIBRA ÓPTICA**

**Software development for monitoring two-phase flow using fiber optic
transducers**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Jean Calos Cardozo da Silva
Coorientador(a): Me. André Biffe Di Renzo

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

PAULO HENRIQUE RUIZ MAZZO

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA MONITORAMENTO DE
ESCOAMENTO BIFÁSICO UTILIZANDO TRANSDUTOR A FIBRA ÓPTICA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Jean Calos Cardozo da Silva
Coorientador: Me. André Biffe Di Renzo

Data de aprovação: 29 de novembro

Jean Carlos Cardozo da Silva
Doutor em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

André Biffe Di Renzo
Mestre em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Instituto Federal do Paraná

Uilian José Dreyer
Doutor em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmãos, que sempre me apoiaram e me deram o suporte necessário para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva, e meu coorientador M.e André Biffe Di Renzo pelo suporte, direcionamento e esclarecimento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Marco Jose da Silva e ao Dr. Eduardo Nunes dos Santos pelos auxílios no estudo e compreensão de escoamento bifásicos.

Agradeço à minha namorada, Rafaela Pinheiro Barreto, pelo companheirismo e auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos meus amigos do curso da UTFPR pelas confraternizações e momentos de descontração, deixando esta trajetória mais prazerosa.

Por fim, agradeço às agências de fomento CAPES, CNPq, PRH-ANP, FINEP, Fundação Araucária, SETI, ao Laboratório Multiusuário de Fotônica (Multi-Foton), ao LabESO, ao NUEM e ao CPGEI.

“Nunca te orgulhes de haver vencido a um adversário, ao que venceste hoje poderá derrotar-te amanhã. A única vitória que perdura é a que se conquista sobre a própria ignorância.”

- Jigoro Kano

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um *software* em linguagem de programação Python para atuar em conjunto com uma sonda óptica e elétrica para monitorar escoamento bifásico. Por meio do *software*, é possível identificar a sensibilidade da sonda. Além disso, o *software* é capaz de realizar a autocalibração das sondas, simular novas sondas a partir dos modelos matemáticos desenvolvidos, realizar a aquisição dos dados e exibir um gráfico em tempo real. Com a integração do programa desenvolvido com o interrogador, tem-se um sistema fácil de ser utilizado e que oferece a possibilidade de intervenção não programada, caso necessário, tornando-se mais vantajoso para o operador monitorar o escoamento.

Palavras-chave: redes de Bragg em fibra óptica; sensores a fibra óptica; Python; autocalibração.

ABSTRACT

This work presents the development of a software in Python programming language to act in conjunction with an optical and electrical probe to monitor two-phase flow. Through the software, it is possible to identify the sensitivity of the probe. In addition, the software can auto-calibrate the probes, simulate new probes from the mathematical models developed, perform the data acquisition and display a real-time graph. Combining the developed program with the interrogator, we have a system that is easy to use and offers the possibility of unscheduled intervention, if necessary, making it more advantageous for the operator to monitor the flow.

Keywords: Fiber Bragg gratings; optical fiber sensors; Python; auto-calibration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Representação de um reservatório em diferentes escalas | 15 |
| Figura 2 - Padrões de escoamento vertical ascendente | 16 |
| Figura 3 - Padrões de escoamento vertical descendente | 17 |
| Figura 4 - Padrões de escoamento horizontal | 17 |
| Figura 5 - Máscara de fase com feixe UV incidente e difrações de ordens 0 e ± 1 | 18 |
| Figura 6 - Rede de Bragg e seus espectros associados | 19 |
| Figura 7 - a) sonda óptica-elétrica com FOs encapsuladas e flanges de acrílico; b) posicionamento dos eletrodos na placa de suporte e posição dos eletrodos em relação à tubulação em corte longitudinal | 21 |
| Figura 8 - Fibra óptica e seu encapsulamento em corte..... | 22 |
| Figura 9 - Arranjo experimental para calibração estática | 25 |
| Figura 10 - Rotina de cálculo para modelos matemáticos de calibração | 25 |
| Figura 11 - Arranjo experimental para calibração dinâmica..... | 26 |
| Figura 12 - Planilha U de comprimento de onda inserida pelo usuário..... | 27 |
| Figura 13 - Planilha S calculada pelo programa | 28 |
| Figura 14 - Arranjo experimental para validação do gráfico em tempo real | 30 |
| Figura 15 - Visão destruída da sonda de 2 polegadas | 31 |
| Figura 16 - Flange de aço com o capilar metálico fixado | 32 |
| Figura 17 - Montagem da sonda com um dos capilares | 33 |
| Figura 18 - Conjunto das interfaces para cada função do programa desenvolvido | 34 |
| Figura 19 - Comparação dos resultados de calibração estática | 35 |
| Figura 20 - Comparação dos resultados de calibração estática em comprimento de onda | 36 |
| Figura 21 - Comparação dos resultados de calibração dinâmica | 37 |
| Figura 22 - Comparação dos resultados de calibração dinâmica em comprimento de onda | 37 |
| Figura 23 - Simulação de materiais para encapsulamento da FO | 39 |
| Figura 24 - Interface de autocalibração da sonda | 40 |
| Figura 25 - Interface de autocalibração com resultados | 41 |
| Figura 26 - Autocalibração da sonda de 2 polegadas | 42 |
| Figura 27 - Interface inicial do programa de aquisição de dados | 42 |
| Figura 28 - Recipientes com água em diferentes temperaturas..... | 43 |
| Figura 29 - a) momento de transição da água em temperatura ambiente para água fria; b) momento de transição da água em temperatura ambiente para água quente | 44 |
| Figura 30 - Estrutura da coluna de bolhas com a válvula..... | 45 |
| Figura 31 - a) passagem de bolhas pela sonda indicadas com setas vermelhas; b) momento da passagem de uma bolha pela sonda..... | 45 |
| Figura 32 - Gráfico em tempo real da sonda de 2 polegadas | 46 |
| Figura 33 - Gráfico em tempo real com a FO nua..... | 47 |
| | |
| Quadro 1 - Comparação de algumas técnicas de medição de escoamento. | 13 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Equações de deformação estática e dinâmica | 22 |
| Tabela 2 - Parâmetros da sonda e do fluido | 34 |
| Tabela 3 - Parâmetros de simulação | 38 |
| Tabela 4 - Comparação das temperaturas medidas e temperaturas de referência | 44 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|--|
| FBG | <i>Fiber Bragg Grating</i> – Rede de Bragg em Fibra Óptica |
| FO | Fibra Óptica |
| UV | Ultravioleta |
| FWHM | <i>Full-width at half maximum</i> |
| IDE | <i>Integrated Development Environment</i> |
| GTR | Gráfico em Tempo Real |
| SMF | <i>Single Mode Fiber</i> – Fibra Monomodo |
| PIV | <i>Particle Image Velocimetry</i> – velocimetria de imagem de partículas |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------------|---|
| U_o | Velocidade de escoamento do óleo; |
| U_w | Velocidade de escoamento da água; |
| Λ | Periodicidade da rede de Bragg; |
| Λ_{pm} | Periodicidade da máscara de fase; |
| λ_B | Comprimento de onda de Bragg; |
| η_{eff} | Índice de refração modal; |
| $\Delta\lambda_B$ | Desvio do comprimento de onda de Bragg; |
| p_e | Constante fotoelástica efetiva; |
| ε | Tensão mecânica; |
| α_Λ | Coefficiente de expansão térmica; |
| α_η | Coefficiente termo-ótico; |
| ΔT | Variação de temperatura; |
| KrF | Fluoreto de Criptônio; |
| Ge | Germânio; |
| ε_{sh} | Deformação específica do cilindro; |
| a | Máxima distância até a linha neutra (raio externo); |
| F | Força; |
| L | Comprimento da viga; |
| x | Distância de gravação da FBG em relação à um dos engastes |
| E | Módulo de elasticidade; |
| R | Raio externo da seção transversal da viga; |
| r_i | Raio interno da seção transversal da viga; |
| $\Delta\lambda_{Bsh}$ | Desvio do comprimento de onda de Bragg; |
| ε_{dht} | Deformação específica do cilindro sob regime de escoamento; |
| ρ | Densidade do fluido; |
| D | Diâmetro do cilindro; |
| R_T | Raio da tubulação; |
| α' | Coefficiente de viscosidade; |
| ϑ | Viscosidade cinemática do fluido; |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | Técnicas de monitoramento do escoamento..... | 13 |
| 1.2 | Escolha do método de monitoramento | 14 |
| 1.3 | Objetivos | 14 |
| 1.3.1 | Objetivos específicos..... | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 | Visão geral de reservatórios de petróleo | 15 |
| 2.2 | Padrões de escoamento | 16 |
| 2.3 | Visão geral sobre redes de Bragg em fibra óptica | 17 |
| 2.4 | Sonda utilizada | 20 |
| 2.4.1 | Modelos matemáticos da sonda | 22 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 23 |
| 3.1 | Linguagem de programação e Editor de texto..... | 23 |
| 3.2 | Reprodução do modelo matemático de calibração estática | 24 |
| 3.3 | Reprodução do modelo matemático de calibração dinâmica | 26 |
| 3.4 | Autocalibração da sonda | 26 |
| 3.5 | Sistema de aquisição de dados | 29 |
| 3.6 | Sistema de monitoramento de escoamento | 29 |
| 3.7 | Construção de nova sonda | 30 |
| 4 | RESULTADOS..... | 34 |
| 4.1 | Reprodução das calibrações..... | 35 |
| 4.2 | Resultados da autocalibração..... | 39 |
| 4.3 | Resultados do sistema de aquisição..... | 42 |
| 4.4 | Gráfico em tempo real..... | 45 |
| 4.4.1 | Monitoramento da passagem de bolhas com sonda de 2 polegadas..... | 46 |
| 5 | CONCLUSÕES | 48 |
| | REFERÊNCIAS..... | 49 |

1 INTRODUÇÃO

Coletar medidas do mundo físico e compará-las com padrões estabelecidos é uma atividade essencial no método científico para melhorar a compreensão de novas tecnologias. Para isso, sensores são utilizados como elementos primários em equipamentos que monitoram a variável em estudo (WEBSTER e EREN, 2014).

O acelerado avanço da eletrônica e da indústria de semicondutores possibilita a construção de sensores mais precisos e que geram grandes volumes de dados, o que torna o processamento das informações um processo moroso para ser realizado manualmente. Para tanto, a ideia da indústria 4.0 propõe uma solução, onde processos de monitoramento sejam controlados por rotinas computacionais integrados à uma rede, como a internet (PREUVENEERS e ILIE-ZUDOR, 2017).

A indústria tem interesse em monitorar escoamento de misturas bifásicas e multifásicas. Usinas hidrelétricas se interessam por sistemas de monitoramento de escoamento nos radiadores dos geradores. Como exemplo disso, pode-se citar o problema causado pelo mexilhão-dourado em algumas usinas hidrelétricas nacionais, onde a espécie invasora se incrusta nas superfícies submersas das tubulações, podendo causar entupimento da tubulação e superaquecimento das turbinas. A Usina de Itaipu chega a gastar cerca de US\$ 1 milhão por dia de limpeza (FIGUEIREDO, 2019).

O ramo de petróleo e gás natural, tanto durante o processo de *upstream* (exploração e produção) quanto *midstream* (transporte e armazenamento), necessita monitorar o fluxo da produção que é transportada nos oleodutos, buscando possíveis vazamentos, obstruções e oscilações no escoamento do petróleo e seus subprodutos. De acordo com Pham *et al.* (2017) no Golfo do México foram reportados mais de 50 casos de bloqueio de oleodutos pelo depósito de parafina nas paredes internas da tubulação, totalizando um prejuízo de aproximadamente US\$25 milhões e atraso de 40 dias para os reparos. Em um caso mais extremo, no Mar do Norte, uma plataforma *offshore* foi severamente danificada pelo acúmulo de parafina a ponto de ter sido abandonada, com custo de US\$100 milhões.

1.1 Técnicas de monitoramento do escoamento

Existem várias técnicas para se monitorar escoamento bifásico e multifásico. Em Vendruscolo (2016) foi desenvolvido um tomógrafo óptico na porção do infravermelho próximo (de 780 nm até 2500 nm) e outro no infravermelho médio (de 2500 nm até 50.000 nm). Vendruscolo (2015) apresentou um sensor de baixo custo utilizando um laser comercial de diodo verde. Apesar de não serem técnicas intrusivas, ambas precisam de tubulação transparente ou ao menos um acesso óptico na tubulação.

Deng (2011) desenvolveu um tomógrafo que combina capacitância elétrica e resistência elétrica, mas apesar de ser capaz de atuar em fluidos condutores e não condutores o dispositivo não é adequado para atuar em tubulações com propriedades condutivas ou magnéticas, inviabilizando sua aplicação em ambientes industriais, já que as tubulações são em sua maioria metálicas.

Outros métodos de monitoramento têm suas vantagens e desvantagens, inviabilizando sua aplicação em uma determinada situação ao passo que pode torná-lo o mais adequado em outra situação. O Quadro 1 apresenta um resumo de algumas maneiras de se monitorar o escoamento.

Quadro 1 - Comparação de algumas técnicas de medição de escoamento.

| Técnica | Comentários |
|--------------------------------------|---|
| Sondas | Intrusivas |
| Medição da seção transversal | Sem imagem |
| Tomografia (raios X e gama) | Não intrusiva, mas utilizam radiação ionizante, envolvendo questões de segurança, movimentação de partes mecânicas, complexas e custo alto. |
| Tomografia de nêutrons | Aparelhos volumosos e complexos |
| Tomografia por ressonância magnética | Inadequada para paredes condutoras elétrica ou materiais magnéticos e o fluido deve ser rico em água ou hidrocarboneto (DOS SANTOS, 2011) |
| Tomografia por emissão de pósitrons | Necessidade de radioisótopos e inviável para investigação de escoamentos com mudanças rápidas (DOS SANTOS, 2011). |
| Tomografia ótica | Somente para frações de vazão baixas e paredes e fluidos transparentes |
| Tomografia por ultrassom | Adequada apenas para baixas frações de vazio |
| Tomografia de impedância elétrica | Problemas com <i>soft-field</i> (dependência da trajetória do campo em relação ao meio) |
| PIV e câmera de alta velocidade | Somente para frações de vazão baixas e paredes e fluidos transparentes |
| Sensor <i>wire-mesh</i> | Baixo custo, intrusiva, fluidos condutores |

Fonte: Adaptado de Winter (2019)

1.2 Escolha do método de monitoramento

Foi escolhida uma sonda óptica-elétrica desenvolvida em Winter (2019) como método de monitoramento de escoamento neste trabalho. O monitoramento óptico é baseado em redes de Bragg em fibra óptica (FBGs – *Fiber Bragg Gratings*) encapsuladas por capilares de aço, que por sua vez constituem a parcela elétrica da sonda (WINTER, 2019).

A opção por esta sonda se deve à uma junção de fatores. Por ser composta em parte por fibra óptica (FO), o dispositivo traz consigo características desejáveis como: pequenas dimensões, é imune a interferência de campos eletromagnéticos, transporta o sinal codificado em forma de comprimento de onda, é inerte à vários agentes químicos (DE OLIVEIRA, 2012), possui bom tempo de resposta, alta impedância elétrica (SILVA, DOS SANTOS, *et al.*, 2015) e pode ser multiplexada, oferecendo a possibilidade da gravação de centenas de FBGs em um único cabo óptico (HBM). Além disso, a sonda oferece redundância dos dados capturados porque combina duas técnicas de monitoramento (WINTER, 2019).

No entanto, o dispositivo carece de um método de calibração com boa precisão. Além disso, a sonda gera um grande volume de dados, fazendo com que o processamento dos dados seja demorado e passível de erros, já que é feito de forma manual. Estes fatores dificultam sua aplicação na indústria.

1.3 Objetivos

Desenvolver um software para monitorar e autocalibrar as FBGs de uma sonda utilizada no monitoramento de escoamento multifásico.

1.3.1 Objetivos específicos

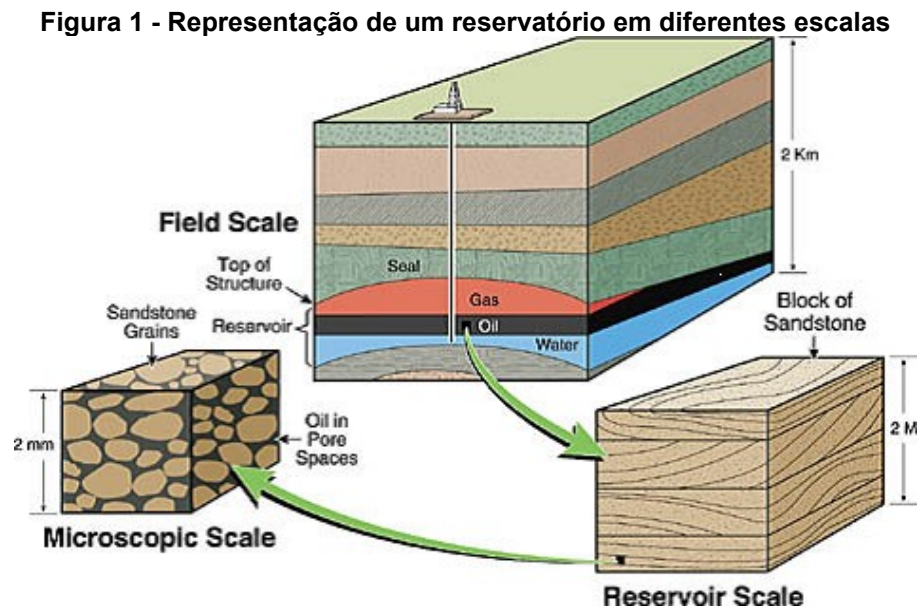
- Desenvolver um programa de computador capaz de realizar a autocalibração da sonda;
- Simular novas sondas com outros parâmetros construtivos;
- Monitorar o escoamento em tempo real;
- Fazer o tratamento de dados capturados durante o escoamento;
- Construir uma interface amigável ao usuário;
- Integrar o software com a sonda a fim de criar um sistema de monitoramento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos importantes sobre reservatórios de petróleo e padrões de escoamento, o modelo matemático da sonda e seus parâmetros construtivos, assim como a arquitetura dos programas desenvolvidos.

2.1 Visão geral de reservatórios de petróleo

Para a formação de reservatórios de petróleo são necessárias três características básicas: rocha geradora rica em hidrocarbonetos; rocha reservatório com poros conectados entre si para armazenar hidrocarbonetos; rocha capeadora para selar os hidrocarbonetos, ou uma estrutura semelhante, para evitar a migração do óleo (MIYOSHI, 2010). Na Figura 1 é apresentada a estrutura geral de um reservatório.



Fonte: Zitha, Felder, et al.

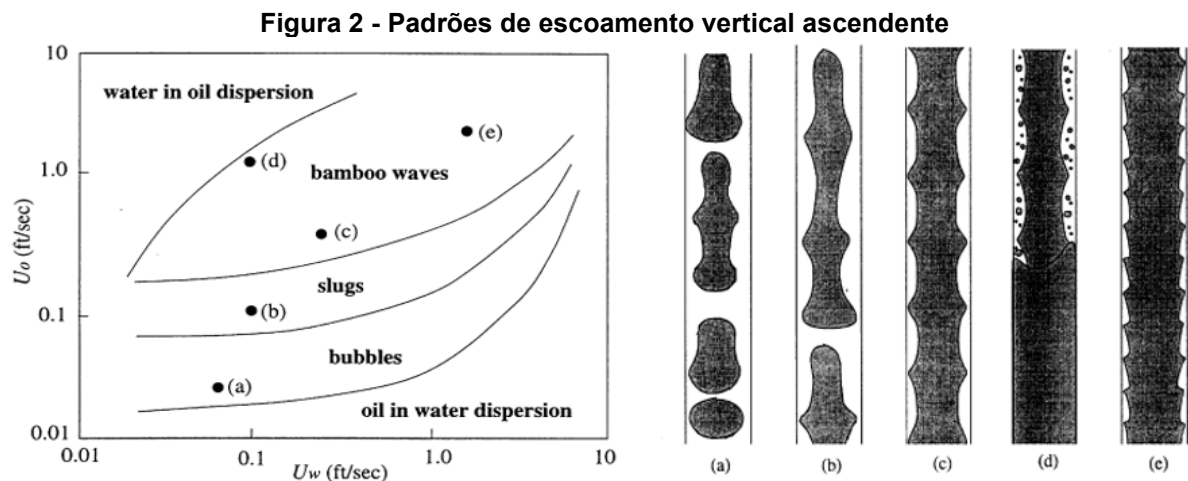
Reservatórios contêm também água além do óleo ou gás. Gás pode ser encontrado dissolvido nas fases líquidas ou em uma fase separada, assim como o petróleo (FANCHI e CHRISTIANSEN, 2017). Além disso, a composição dos hidrocarbonetos presentes no reservatório pode variar. A composição dos fluidos presentes na rocha geradora depende: dos organismos que estavam presentes durante o processo de sedimentação; do processo de maturação térmica e histórico de temperatura; do aprisionamento dos hidrocarbonetos, variando de acordo com a estrutura geológica das rochas e o fluxo de fluidos dentro dessa estrutura. Devido a

estas variáveis, pode-se obter diferentes tipos de óleo dentro de um mesmo reservatório (FANCHI e CHRISTIANSEN, 2017).

2.2 Padrões de escoamento

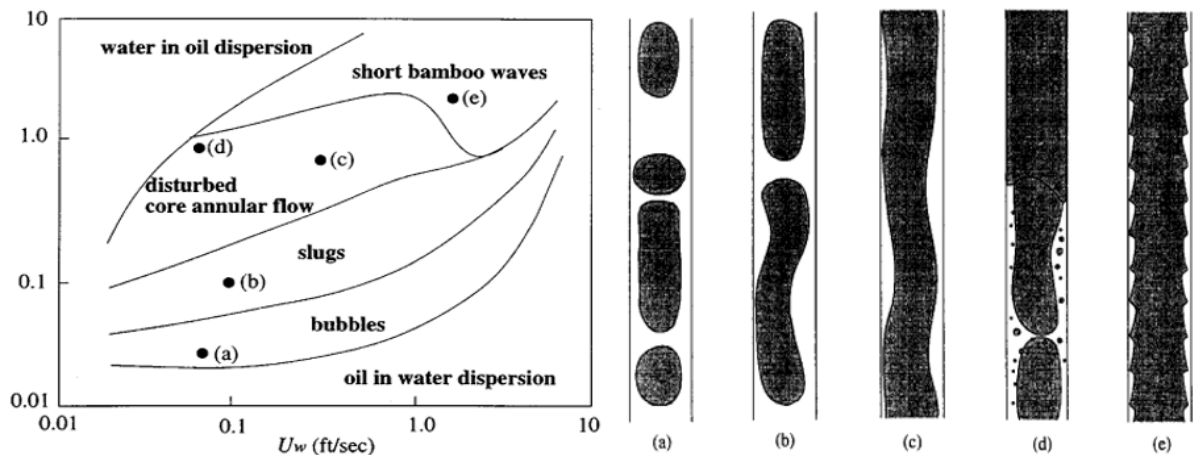
O escoamento de fluidos dentro de uma tubulação é subdividido com relação a quantidade de fases presentes, podendo ser monofásico, bifásico ou multifásico, sendo o escoamento bifásico o mais recorrente (WINTER, 2019). O escoamento bifásico pode ser do tipo: líquido-líquido, líquido-gás, sólido-gás ou sólido-líquido.

Joseph *et al.* (1997) caracterizou os tipos de escoamento bifásico, em ascendente e descendente, para uma tubulação vertical de óleo e água, representados pelas figuras 2 e 3 respectivamente. Na Figura 2 tem-se o comportamento quando o tipo escoamento se dá em: (a) bolhas de óleo em água; (b) intermitente; (c), (d) e (e) ondas tipo bambu. Para a Figura 3 tem-se: (a) bolhas de óleo em água; (b) intermitente; (c) e (d) anular ondulado; (e) ondas tipo bambu curtas. Para os gráficos de ambas as figuras, U_o representa a velocidade de escoamento do óleo em pés/s, e U_w representa a velocidade de escoamento da água em pés/s.



Fonte: Adaptado de Joseph *et al.* (1997)

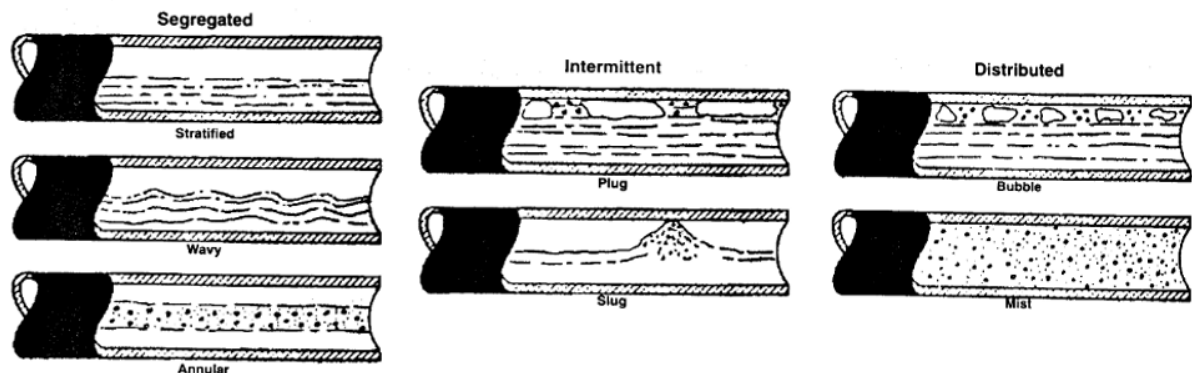
Figura 3 - Padrões de escoamento vertical descendente



Fonte: Adaptado de Joseph *et al.* (1997)

Brill e Mukherjee (1999) representam o escoamento bifásico horizontal líquido-líquido como mostrado na Figura 4, separando em 3 grandes grupos. Dentro do grupo de escoamento segregado tem-se: estratificado, agitado e anular. O grupo de escoamento intermitente foi dividido em pistonado e golfada. O grupo de escoamento distribuído foi dividido em bolhas e névoa.

Figura 4 - Padrões de escoamento horizontal



Fonte: Adaptado de Brill e Mukherjee (1999)

O principal tipo de escoamento que será abordado neste trabalho é o escoamento líquido-gás vertical.

2.3 Visão geral sobre redes de Bragg em fibra óptica

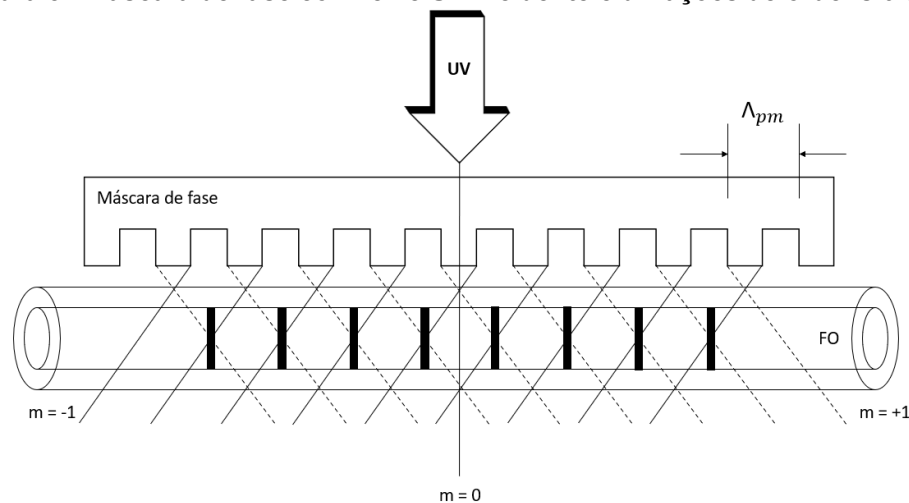
Fibras ópticas apresentam uma propriedade chamada “fotossensibilidade” pela qual, por meio da incidência de luz com comprimento de onda e intensidade

específicas, é possível alterar o índice de refração do núcleo da FO (DA SILVA, 2005). Tipicamente são utilizados dois métodos para a gravação de FBGs. Tipicamente são utilizados dois métodos para a gravação de FBGs.

O método interferométrico requer que dois feixes de radiação ultravioleta (UV), com boa coerência espacial e temporal incidam no núcleo da FO, criando um padrão de pontos de interferência (MELTZ, MOREY e GLENN, 1989). Esses pontos de interferência causam uma mudança permanente no índice de refração do núcleo da FO (OTHONOS e KALLI, 1999).

O segundo método em muito se assemelha ao método interferométrico, mas este necessita de apenas um feixe de radiação UV. Isso é possível porque o método utiliza uma máscara de fases, responsável por gerar o padrão de interferência conforme mostra a Figura 5. Atualmente a técnica com máscara de fase é a mais utilizada (HILL, MALO, *et al.*, 1993) devido a sua simplicidade, reprodutibilidade e reduzida coerência do laser utilizado (DA SILVA, 2005).

Figura 5 - Máscara de fase com feixe UV incidente e difrações de ordens 0 e ± 1

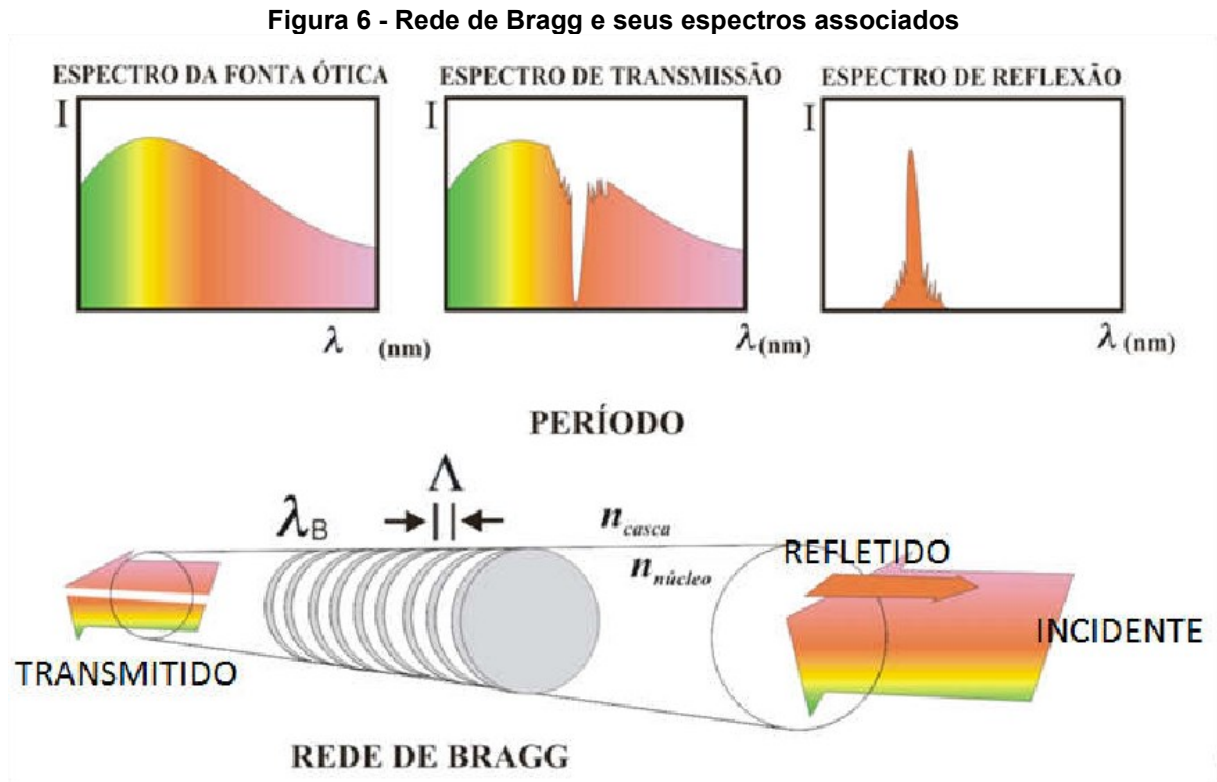


Fonte: Adaptado de Kashyap (1999)

A máscara de fase, composta de sílica, possui uma face plana e uma face oposta que possui depressões periódicas (período igual a Λ_{pm}) (KASHYAP, 1999) a fim de difratar o feixe de radiação UV em feixes de ordem -1 e +1. As franjas são gravadas na FO nos pontos de interferência dos feixes de ordem -1 e +1 e possuem um período de Λ (OTHONOS, KALLI, *et al.*, 2006) dado pela Equação 1:

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (1)$$

Em termos práticos, uma FBG tem o comportamento semelhante a um filtro eletrônico rejeita banda, transmitindo a maior parte do espectro pela FO e refletindo uma pequena faixa de comprimento de onda. Isto ocorre, devido ao espalhamento sucessivo e coerente das variações do índice de refração do núcleo da FO (WINTER, 2019), conforme mostra a Figura 6.



Fonte: Bastos (2016)

O modo de acoplamento mais forte (pico do sinal refletido) irá ocorrer próximo ao comprimento de onda de ressonância de Bragg (λ_B) de acordo com a Equação 2, onde η_{eff} é o índice de refração modal (HILL e MELTZ, 1997).

$$\lambda_B = 2 \times \eta_{eff} \Lambda \quad (2)$$

Deformações mecânicas na FO, na região onde a FBG foi gravada, irão alterar o comprimento de onda refletido. O estresse mecânico causa uma alteração momentânea na periodicidade das franjas, alterando λ_B . Já que este é função de Λ , o fenômeno recebe o nome de efeito fotoelástico.

A mesma análise pode ser feita em casos de variação de temperatura na FBG. Uma elevação na temperatura causará dilatação térmica na fibra, aumentando o período Λ , sendo denominado efeito termo-ótico (WINTER, 2019).

Othonos e Kalli (1999) determinaram o desvio do comprimento de onda de Bragg unindo os dois efeitos explicados anteriormente através da Equação 3:

$$\Delta\lambda_B = \underbrace{\lambda_B(1 - p_e)\varepsilon}_I + \underbrace{\lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_\eta)\Delta T}_II \quad (3)$$

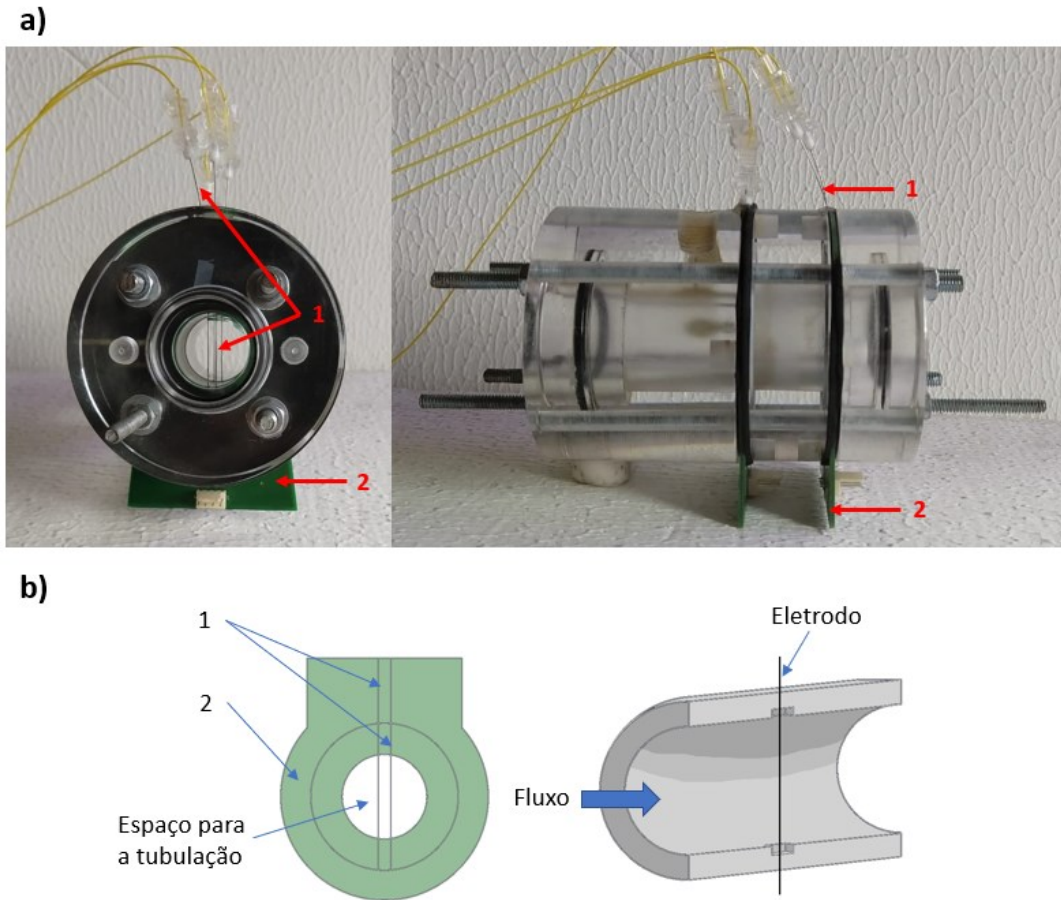
sendo $\Delta\lambda_B$ a variação no comprimento de onda de Bragg.

O primeiro termo da Equação 3, indica a variação causada por estresse mecânico, onde p_e representa a constante fotoelástica efetiva e ε a tensão mecânica. Já o segundo termo indica a mudança no comprimento de onda causada pela variação de temperatura, sendo α_Λ o coeficiente de expansão térmica, α_η o coeficiente termo-ótico e ΔT a variação de temperatura.

2.4 Sonda utilizada

A sonda utilizada neste trabalho é fruto do trabalho desenvolvido por Winter (2019). A Figura 7 (a) mostra a sonda com os flanges de acrílico e as placas de suporte das agulhas de aço contendo as FOs, fixados entre si com quatro barras de rosca, porcas e arruelas.

Figura 7 - a) sonda óptica-elétrica com FOs encapsuladas e flanges de acrílico; b) posicionamento dos eletrodos na placa de suporte e posição dos eletrodos em relação à tubulação em corte longitudinal

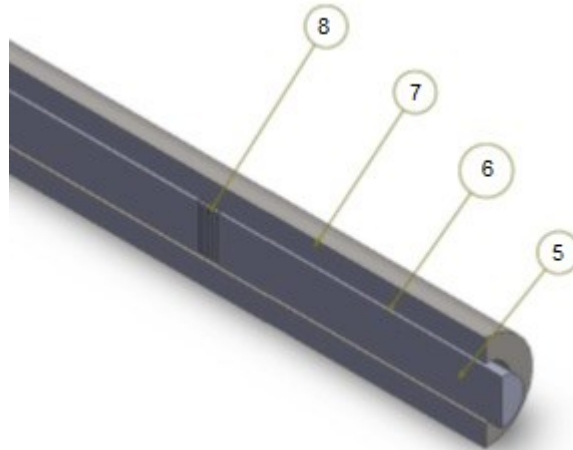


Fonte: Elaborado pelo autor

Cada placa de suporte (2) sustenta dois eletrodos (1) contendo as FBGs em seu interior e os conectores para ligação com o circuito eletrônico. As placas de suporte são placas de circuito impresso de fibra de vidro com 2 mm de espessura, possuindo trilhas, conectores e sulcos para posicionar os eletrodos, que são soldados à placa. Flanges de acrílico sustentam as placas para que seja possível posicionar a sonda de forma transversal à tubulação, onde é monitorado o escoamento.

A Figura 8 apresenta uma visão em corte da fibra (5) posicionada dentro do seu encapsulamento de aço (7), o espaço entre eles (6) que foi preenchido com resina epóxi 331 e agente de cura 043, e a FBG (8).

Figura 8 - Fibra óptica e seu encapsulamento em corte



Fonte: Winter (2019)

2.4.1 Modelos matemáticos da sonda

O modelo mecânico mais adequado para a criação dos modelos matemáticos é o de uma viga biengastada. O módulo de elasticidade do conjunto cilindro de aço + FO + resina epóxi, não é conhecido, então para contornar o problema optou-se por considerar os casos extremos de um cilindro oco sem fibra e um cilindro maciço. No entanto, neste trabalho utilizou-se apenas o modelo do cilindro oco. A Tabela 1 resume as equações dos modelos matemáticos utilizados no trabalho.

Tabela 1 – Equações de deformação estática e dinâmica

| | Estático | Dinâmico |
|--------------------------------|---|--|
| Deformação específica | $\varepsilon_{sh} = \frac{aF(L - 4x)}{2E\pi(R^4 - r_i^4)}$ | $\varepsilon_{dht} = \frac{a(L - 4x)}{2E\pi(R^4 - r_i^4)} \left(\frac{1}{18} \rho D R_T V_{avg}^2 + a' \vartheta \right)$ |
| Varição no comprimento de onda | $\Delta\lambda_{Bsh} = \lambda_B (1 - p_e) \frac{aF(L - 4x)}{2E\pi(R^4 - r_i^4)}$ | $\Delta\lambda_B = (1 - p_e) \lambda_B \frac{8a(L - 4x) \rho D R_T V_{avg}^2}{15E\pi(R^4 - r_i^4)}$ |

Fonte: Winter (2019)

Nas equações representadas na Tabela 1, a é a máxima distância até a linha neutra (raio externo), F é a força aplicada, L é o comprimento da viga, x é a distância de gravação da FBG em relação à um dos engastes, E representa o módulo de elasticidade do material, R o raio externo da seção transversal da viga e r_i o raio interno da seção transversal da viga, ρ a densidade do fluido, D o diâmetro do cilindro, R_T o raio da tubulação, V_{avg} a vazão média, a' o coeficiente de viscosidade e ϑ a viscosidade cinemática do fluido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados durante a pesquisa como a linguagem de programação utilizada e o compilador, arquitetura do programa, equipamentos utilizados e a planta de testes.

3.1 Linguagem de programação e Editor de texto

A linguagem escolhida para o desenvolvimento do software foi o Python. O Python foi criado com o objetivo de ser uma linguagem popular entre programadores e com uma grande variedade de bibliotecas e módulos, nativos à linguagem ou não (ROSSUM, apud ZELLE, 2016). Sua versão mais atual é o Python 3, utilizada nesta pesquisa.

Optou-se por esta linguagem por ser uma linguagem de alto nível, *open source* (de código aberto), tem uma grande comunidade e popularidade crescente, uma grande variedade de bibliotecas não nativas voltadas para matemática e ciência de dados, além de ter uma sintaxe de fácil compreensão, se assemelhando à língua inglesa. As bibliotecas não nativas utilizadas foram: NumPy, Pandas, OpenPyXL e Matplotlib:

- NumPy tem como grande contribuição para um programa o fornecimento de um novo tipo de dado, o arranjo (OLIPHANT, 2007). Arranjos são estruturas de dados multidimensionais que através do NumPy, podem conter variáveis arbitrárias em cada elemento, podendo ser acessadas por indexação (MALDANER, 2019).
- O Pandas é uma biblioteca indicada para a análise de dados. Isso se deve ao fato de que a biblioteca possibilita criar e manipular planilhas através dos dados do tipo *series* ou *DataFrame* (CHEN, 2018). Dados do tipo *series* podem ser entendidos como planilhas unidimensionais (apenas uma linha ou uma coluna) e dados do tipo *DataFrame* são planilhas bidimensionais (podem também ser criados concatenando *series*).
- A biblioteca OpenPyXL foi criada com o simples objetivo de importar/criar arquivos Excel 2010 xlsx/xlsm/xltx/xltn de forma direta utilizando programas em Python (GAZONI e CLARK, 2022).
- Apesar de existirem outras, Matplotlib é a biblioteca mais robusta para a visualização de dados, podendo criar gráficos estáticos, animados,

interativos e em 3D (THE MATPLOTLIB DEVELOPMENT TEAM, 2021). Ela é uma biblioteca *open source*, e apresenta uma sintaxe mais elaborada quando comparada com outros módulos de visualização de dados por oferecer amplo controle sobre o formato de visualização, mas não impõe grande dificuldade na implementação no código.

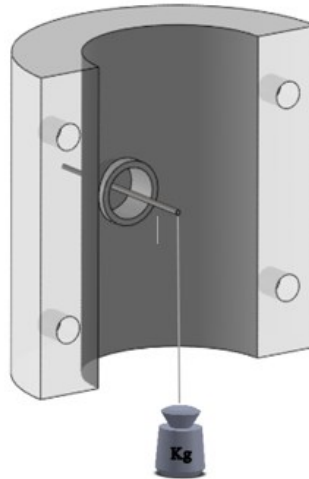
A IDE (ambiente de desenvolvimento integrado, do inglês *Integrated Development Environment*) escolhida para o desenvolvimento dos códigos foi o PyCharm Community Edition 2020.3.3. Esta foi a IDE escolhida por ser específica para o desenvolvimento de códigos Python, possui integração com ferramentas de controle de versionamento de códigos, é de fácil uso, sugere ao programador possibilidades de completação de código além auxiliar o programador a escrever um código mais legível e organizado.

3.2 Reprodução do modelo matemático de calibração estática

O desenvolvimento do software iniciou com a implementação dos modelos matemáticos da sonda. A reprodução da calibração estática se baseou nas equações da Tabela 1 da coluna “Estático”. Posteriormente foi utilizada esta metodologia para a construção do sistema de autocalibração.

Foi criado código Python com uma variável do tipo *list* com 10 itens, correspondentes à força F . Utilizando uma estrutura de repetição, os 10 itens foram substituídos na equação de deformação estática da Tabela 1 para se obter os valores de deformação em microstrain ($\mu\epsilon$). Este processo simula a condição de tracionamento do eletrodo em seu ponto médio com 10 massas conhecidas, iniciando com 5 g, incrementando 5 g por vez, e finalizando com uma massa de 50 g, mostrado na Figura 9. Para a aceleração da gravidade foi utilizado o valor de $9,7866 \text{ m/s}^2$, que é a aceleração da gravidade em Curitiba-PR (LOPES, 2008).

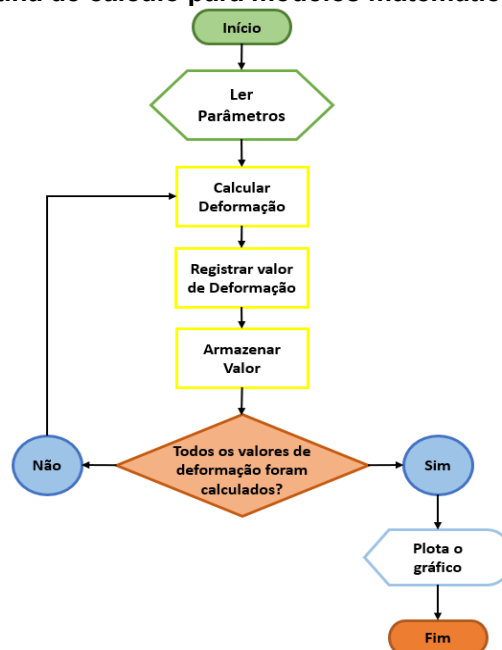
Figura 9 - Arranjo experimental para calibração estática



Fonte: Ribeiro (2018)

A rotina de cálculo estabelecida é mostrada no fluxograma da Figura 10. O programa inicia com a leitura dos parâmetros construtivos da sonda. Após isso, os valores de deformação são calculados de acordo com o peso que atua sobre o capilar. Cada valor de deformação é calculado, registrado na tela do computador, e armazenado em uma *list*. Após o cálculo de todos os valores de deformação, o programa plota o gráfico correspondente.

Figura 10 - Rotina de cálculo para modelos matemáticos de calibração



Fonte: Adaptado de Mazzo et al (2021)

3.3 Reprodução do modelo matemático de calibração dinâmica

A reprodução da calibração dinâmica por meio de um código Python é muito semelhante à calibração estática. Ela utiliza a mesma rotina descrita na Figura 10. Foram utilizadas de base as equações de escoamento da Tabela 1. Novamente foi criada uma variável do tipo *list* com 6 itens correspondentes à V_{avg} , iniciando em 1,82 m³/h, incrementando 0,91 m³/h, e finalizando com 6,37 m³/h. Os valores da *list* foram substituídos nas equações de escoamento da Tabela 1, utilizando uma estrutura de repetição, para se obter os valores de deformação em microstrain ($\mu\epsilon$), simulando as condições do experimento de calibração dinâmica realizado por Winter (2019). A Figura 11 mostra arranjo experimental utilizado para a calibração dinâmica.



Fonte: Ribeiro (2018)

3.4 Autocalibração da sonda

Determinar a posição de gravação da FBG na fibra de forma manual pode ser um processo demorado e não muito preciso. Em seu trabalho, Winter (2019) conectou a FO ao interrogador óptico e percorreu o comprimento da fibra com a ponta quente de uma estação de solda. Como a FBG é sensível à variação de temperatura, uma oscilação no comprimento de onda de Bragg indica a provável localização da rede da fibra.

No entanto, redes de Bragg tem tamanho físico aproximado de 3 mm, ao passo que a ponta de uma estação de solda varia entre 1 mm e 2 mm, aproximadamente. Isso faz com que haja um grande erro associado ao determinar a posição de gravação da rede, uma vez que a ferramenta usada não é adequada.

Então, com o objetivo de determinar a posição de gravação da FBG na fibra, foi desenvolvido um programa de autocalibração baseado no processo de calibração estática. O método utilizado para a autocalibração é a comparação, elemento a elemento, entre duas planilhas U e S.

A Planilha U é constituída de comprimentos de onda de Bragg registrados pelo usuário ao se tracionar o eletrodo durante o processo de calibração estática. Cada linha contém os comprimentos de onda referentes à um eletrodo, e para cada eletrodo são registrados três comprimentos de onda, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Planilha U de comprimento de onda inserida pelo usuário

$$\begin{array}{c}
 \lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \\
 \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\
 \text{FBG 1} \rightarrow \left[\begin{array}{ccc} U_{1,1} & U_{1,2} & U_{1,3} \\
 \text{FBG 2} \rightarrow \left[\begin{array}{ccc} U_{2,1} & U_{2,2} & U_{2,3} \\
 \text{FBG 3} \rightarrow \left[\begin{array}{ccc} U_{3,1} & U_{3,2} & U_{3,3} \\
 \text{FBG 4} \rightarrow \left[\begin{array}{ccc} U_{4,1} & U_{4,2} & U_{4,3} \\
 \text{FBG 5} \rightarrow \left[\begin{array}{ccc} U_{5,1} & U_{5,2} & U_{5,3}
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}$$

Fonte: Elaborado pelo autor

A Planilha S é calculada pelo programa, utilizando a equação de formação de calibração estática. A quantidade de linhas é proporcional ao comprimento do segmento do eletrodo interno à tubulação. Foi criada uma *list* para as possíveis posições da rede na porção da fibra que está dentro do capilar. O número de colunas é igual ao número de itens na *list* da calibração estática, resultando na planilha da Figura 13. Portanto, cada elemento da Planilha S é calculado com a equação de deformação para calibração estática, sendo que o índice da linha representa a posição de gravação da FBG, e o índice da coluna representa a força utilizada para o cálculo de deformação.

Figura 13 - Planilha S calculada pelo programa

| | | | | | |
|---------|-------------|-------------|-------------|-----|----------------|
| | λ_1 | λ_2 | λ_3 | ... | λ_{10} |
| | ↓ | ↓ | ↓ | | ↓ |
| FBG 1 → | $S_{1,1}$ | $S_{1,2}$ | $S_{1,3}$ | ... | $S_{1,10}$ |
| FBG 2 → | $S_{2,1}$ | $S_{2,2}$ | $S_{2,3}$ | ... | $S_{2,10}$ |
| FBG 3 → | $S_{3,1}$ | $S_{3,2}$ | $S_{3,3}$ | ... | $S_{3,10}$ |
| | \vdots | \vdots | \vdots | | \vdots |
| FBG m → | $S_{m,1}$ | $S_{m,2}$ | $S_{m,3}$ | ... | $S_{m,10}$ |

Fonte: Elaborado pelo autor

O índice das linhas da Planilha S é igual à posição de gravação da FBG para aqueles comprimentos de onda presentes na linha de acordo com a expressão:

$$np.arrange\left(0, \frac{L}{2} + 0.00005, 0.00005\right).$$

A função $np.arrange()$ pertence à biblioteca NumPy. Ela cria um vetor de valores igualmente distanciados, iniciando em 0 m, com passo de 0,00005 m e valor final de $\frac{L}{2} + 0,00005$ m. Para esta sonda, uma diferença de 0,1 mm na posição de gravação da FBG causa um desvio aproximado de 10 pm no comprimento de onda de Bragg, quando o capilar está sob estresse da massa de 50 g. O valor final da *list* é a soma da metade do segmento do eletrodo ($\frac{L}{2}$) interno à tubulação somado com o valor de passo. Isso ocorre porque a função $np.arrange()$ não inclui o valor final como elemento da *list*.

Quando a comparação elemento a elemento encontra os 3 elementos da mesma linha da Planilha U em uma única linha da Planilha S, o programa retorna o índice desta linha da Planilha S, que corresponde à posição de gravação da FBG.

3.5 Sistema de aquisição de dados

A aquisição e armazenamento de dados são funções de grande importância para um sistema de monitoramento. É a partir dos dados capturados que são feitas análises dos eventos que ocorreram durante um determinado período.

Para realizar a comunicação do interrogador com programas Python, foi utilizada a biblioteca criada por Pete Bachant (2015), desenvolvida em Python especificamente para trabalhar com sensores FBG e interrogadores Micron Optics®, disponibilizada no repositório GitHub sob licença MIT. O objetivo desta biblioteca é estabelecer uma conexão direta do interrogador óptico com programas Python. A partir dela é possível manipular os dados fornecidos pelo interrogador a medida em que são enviados.

Visto isso, foi criado um programa que realiza a aquisição dos dados enviados pelo interrogador óptico. Os dados são exportados para um arquivo .CSV e salvos, sendo a taxa de aquisição dos dados igual a taxa de envio de dados do interrogador.

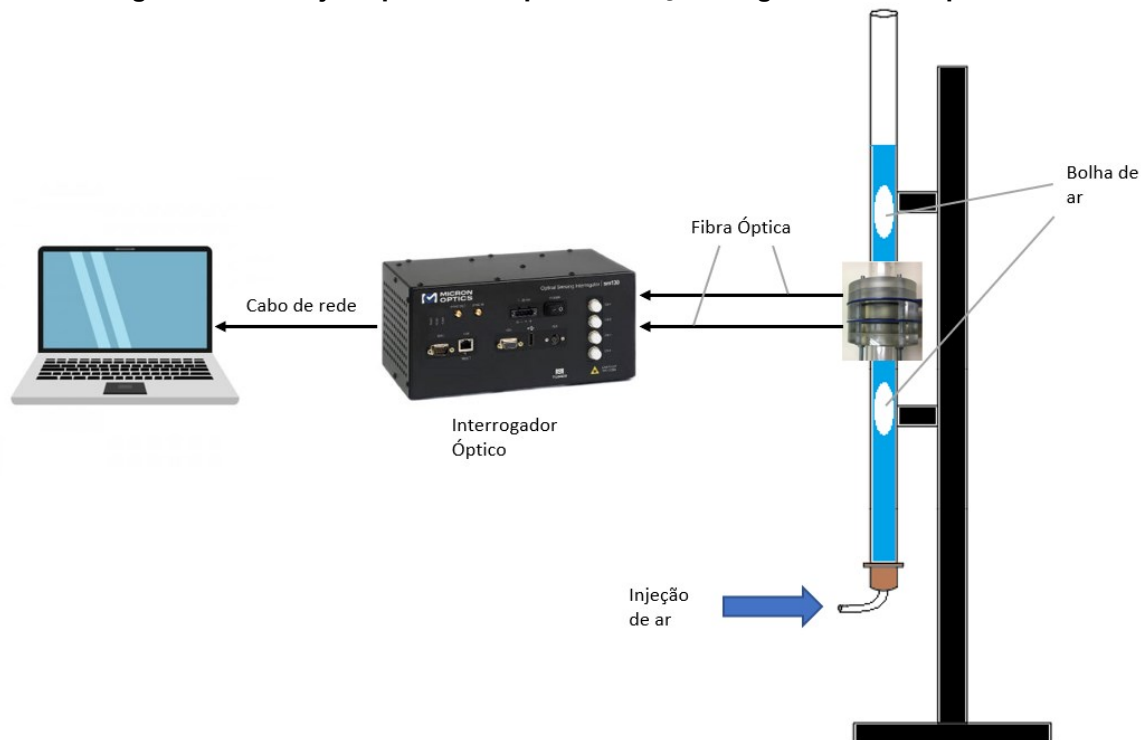
3.6 Sistema de monitoramento de escoamento

Durante o monitoramento de um escoamento em uma tubulação, é interessante ter um retorno visual do que ocorre principalmente se a tubulação não for transparente, como é na maioria dos casos. Então, um gráfico que é atualizado em tempo real pode fornecer uma ideia da situação do escoamento dentro da tubulação e possibilita uma intervenção não programada.

Com os dados do interrogador sendo constantemente salvos em formato .CSV, é possível importar estes dados à medida em que são salvos, e construir um gráfico que também será constantemente atualizado através da função "*FuncAnimation*" do módulo *Animation* da biblioteca Matplotlib.

O experimento montado para validar o funcionamento do Gráfico em Tempo Real (GTR) é mostrado na Figura 14. A sonda foi posicionada no meio de uma tubulação vertical de acrílico de 1" com a extremidade superior aberta para o ambiente. A extremidade inferior possui uma válvula conectada à uma mangueira de 0,25" para a injeção de bolhas ar na tubulação de acrílico.

Figura 14 - Arranjo experimental para validação do gráfico em tempo real



Fonte: Elaborado pelo autor

A sonda é sensibilizada com a passagem das bolhas, já que o ar é um fluido menos denso e menos viscoso que a água. Com isso, ocorre um desvio no comprimento de onda de Bragg, que é transmitido para o interrogador. A conexão entre o interrogador e o computador é feita através de um cabo de rede. O programa desenvolvido neste trabalho adquire os dados do interrogador, com uma taxa de aquisição de 1000 Hz e constrói um gráfico tempo X comprimento de onda de Bragg, onde o usuário pode verificar a situação do escoamento.

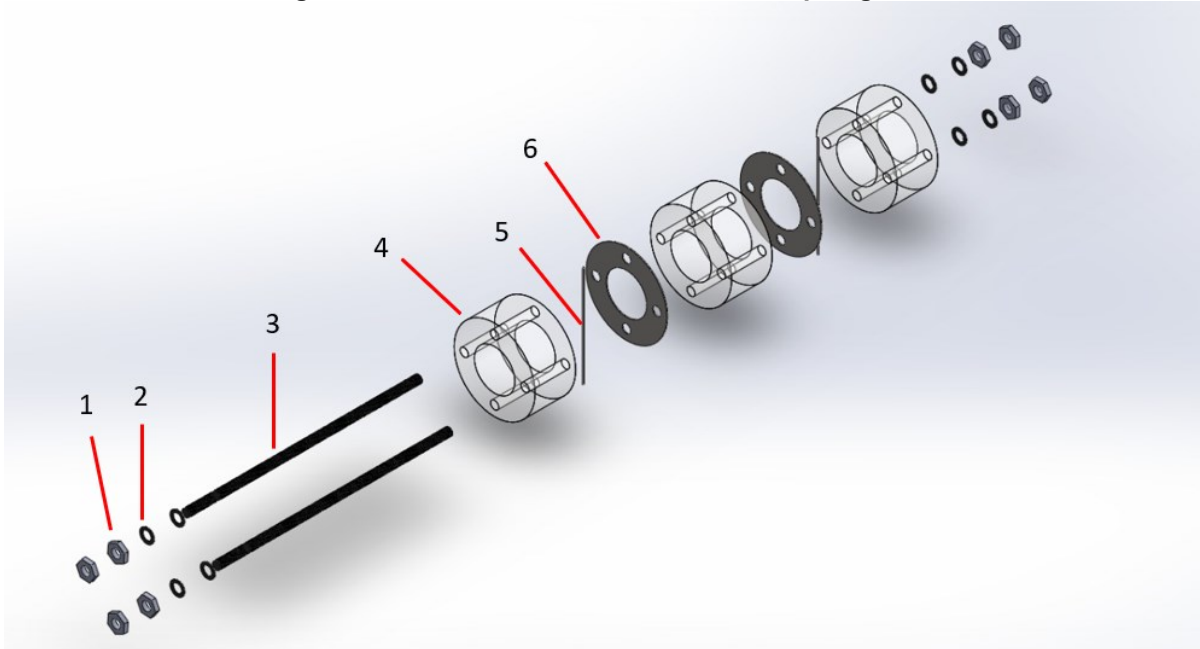
3.7 Construção de nova sonda

Para validação dos programas desenvolvidos, foi construída uma nova sonda com parâmetros construtivos diferentes da sonda desenvolvida por Winter (2019), mas seguindo a mesma metodologia.

A Figura 15 ilustra os componentes da sonda de 2 polegadas. Os eletrodos (5) são posicionados de forma a sobrepor o diâmetro interno de flanges de aço 1020 (6), sendo apenas um eletrodo por flange. O suporte e espaçamento dos flanges de aço é feito com flanges de acrílico (4), intercalando um flange de acrílico com um

flange de aço. A fixação entre os flanges se dá com 4 barras de rosca (3), porcas (1) e arruelas (2), dispostas nos quadrantes dos flanges.

Figura 15 - Visão destruída da sonda de 2 polegadas



Fonte: Elaborado pelo autor

A fixação das FOs dentro dos eletrodos foi feita com resina epóxi 331 e agente endurecedor 043. Por fim, foi feito um vinco no flange de aço para alocar o eletrodo, e sua fixação com adesivo estrutural Nexus A e endurecedor Nexus B. A FO foi inserida no capilar metálico de forma que a distância entre o ponto de gravação da FBG e o ponto de engaste é de aproximadamente 4 mm. A Figura 16 ilustra a montagem de um dos flanges.

Figura 16 - Flange de aço com o capilar metálico fixado



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram utilizadas duas FOs, fabricante Fribracem, do tipo *single mode fiber* (SMF) dopadas com hidrogênio (H_2), na construção da sonda de duas polegadas, sendo que o procedimento de gravação de suas respectivas FBGs foi diferente para cada fibra. Para ambas as fibras foram utilizados um laser excímero, modelo Xantos XS 193 nm, configurado para uma frequência de 250 Hz e potência de 1,5 mJ.

Uma das FBGs foi gravada de acordo com os procedimentos padrões de gravação, conforme a Figura 5, removendo aproximadamente 10 mm da camada de acrilato e a máscara de fase encostada na FO. A outra FBG foi gravada numa fibra onde a camada de acrilato que foi removida foi de aproximadamente 5 mm, além disso ela foi posicionada a uma distância de 4 mm da máscara de fase.

Foi removido apenas 5 mm da camada de acrilato para a gravação da segunda FBG para determinar com maior facilidade o a distância entre o ponto de gravação e o ponto de engaste do capilar no flange de aço.

Esse distanciamento da máscara de fase na gravação da segunda FO tem o objetivo de evitar que o acrilato entre em contato com a máscara de fase durante o procedimento de gravação. Na Figura 17 pode-se ver a montagem da sonda com um dos capilares posicionado.

Figura 17 - Montagem da sonda com um dos capilares



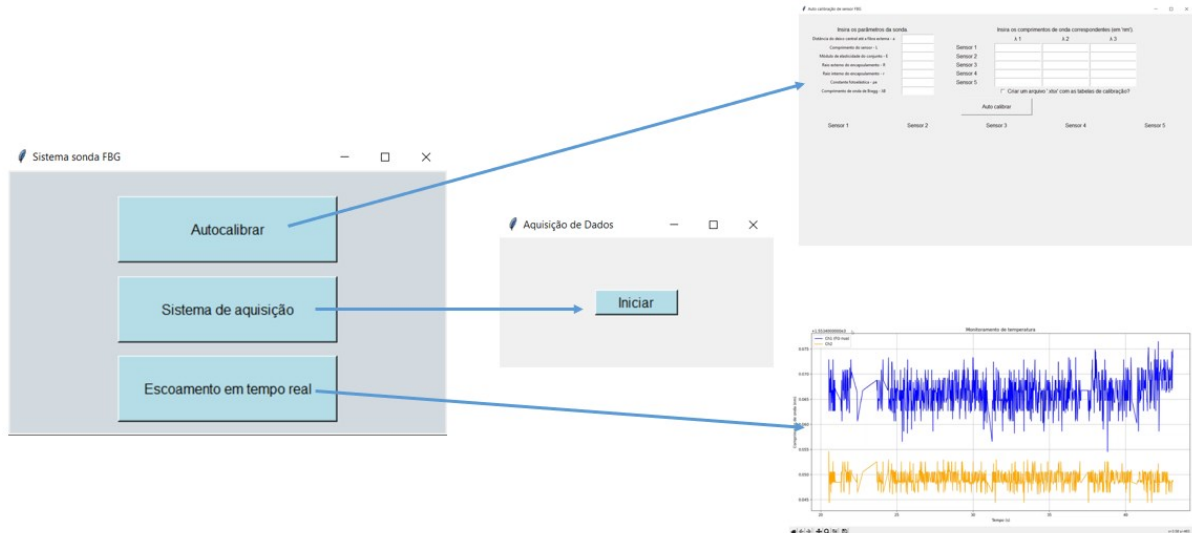
Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, foi fixada uma FO nua em um terceiro flange de aço, que posteriormente foi submetido ao experimento da coluna de bolhas, em separado das outras sondas. Esta terceira sonda foi construída a fim de comparar resultados entre a FO encapsulada em aço e uma FO nua, sem proteção e resistência mecânica adicional.

4 RESULTADOS

Este capítulo trata sobre os resultados obtidos para cada aplicação do *software*. A Figura 18 ilustra o conjunto das interfaces desenvolvidas no trabalho e o caminho que o usuário percorre para utilizar cada função do sistema desenvolvido.

Figura 18 - Conjunto das interfaces para cada função do programa desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo autor

Os parâmetros construtivos da sonda e características do fluido utilizado nos programas de reprodução das calibrações estática e dinâmica e autocalibração estão listados na Tabela 2. Todos os valores foram obtidos de Winter (2019).

Tabela 2 - Parâmetros da sonda e do fluido

| Parâmetro | Símbolo | Valor | Unidade |
|-------------------------------------|-------------|----------|-----------------|
| Máxima distância até a linha neutra | a | 225 | μm |
| Comprimento da viga | L | 25,4 | cm |
| Módulo de elasticidade | E | 206 | Gpa |
| Raio externo do eletrodo | R | 225 | μm |
| Raio interno do eletrodo | r | 136,53 | μm |
| Distância de gravação da FBG | x | 5,4 | mm |
| Comprimento de onda de Bragg | λ_B | 1541,192 | nm |
| Constante fotoelástica efetiva | p_e | 0,22 | - |
| Densidade do fluido | ρ | 1000 | kg/m^3 |

(continua)

Tabela 3 - Parâmetros da sonda e do fluido

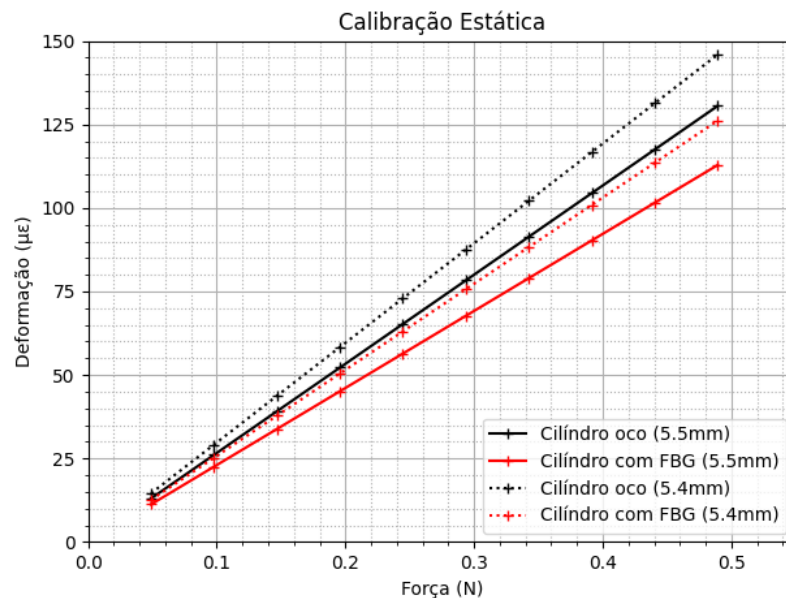
| Parâmetro | Símbolo | Valor | Unidade | (conclusão) |
|-----------------------------|-------------|------------------------|-------------------|-------------|
| Raio da tubulação | R_T | 12,7 | mm | |
| Diâmetro do eletrodo | D | 450 | μm | |
| Coefficiente de viscosidade | α' | $1,002 \times 10^{-3}$ | Ns/m ² | |
| Viscosidade cinemática | ϑ | $1,004 \times 10^{-6}$ | m ² /s | |

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Reprodução das calibrações

A Figura 19 mostra os resultados da reprodução do modelo matemático de calibração estática. As linhas pontilhadas representam os resultados onde a FBG foi gravada a 5,4 mm do engaste, que é a distância utilizada em Winter (2019). As linhas cheias consideram que a distância de gravação da FBG em relação ao engaste é de 5,5 mm, que são mais coerentes com os resultados apresentados em Winter (2019).

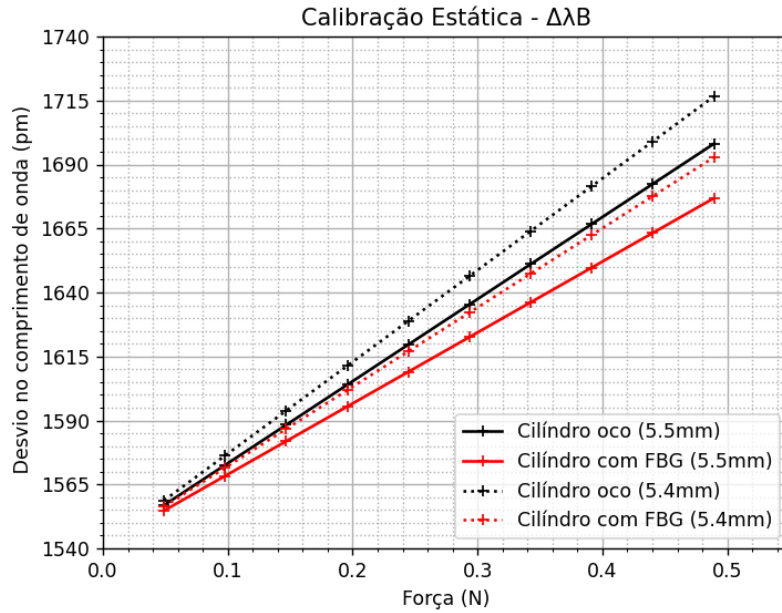
Figura 19 - Comparação dos resultados de calibração estática



Fonte: Adaptado de Mazzo *et al* (2021)

Utilizando a equação para encontrar o desvio no comprimento de onda da Tabela 1, pode-se converter a deformação específica em desvio no comprimento de onda, resultando no gráfico da Figura 20.

Figura 20 – Comparação dos resultados de calibração estática em comprimento de onda

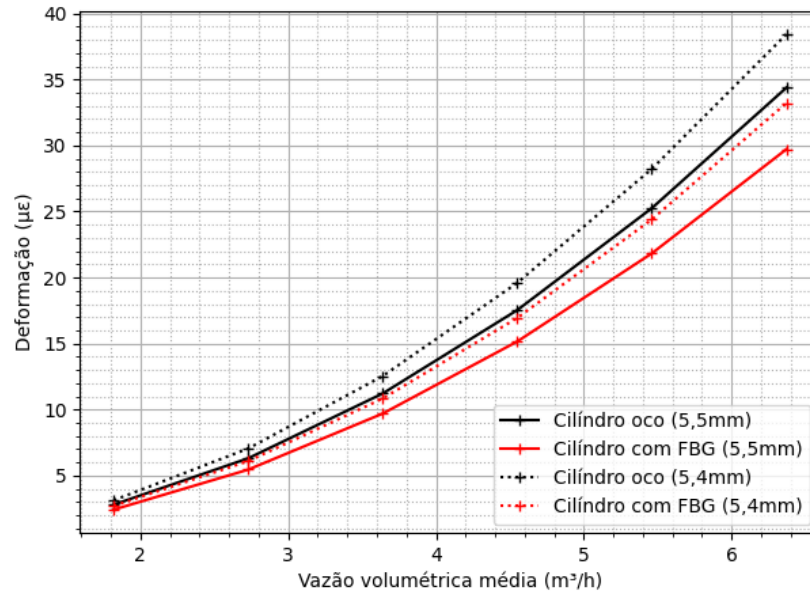


Fonte: Adaptado de Mazzo *et al* (2021)

Ao analisar os gráficos, pode-se perceber que uma diferença de 0,1 mm na posição de gravação da FBG causa uma grande variação no comprimento de onda refletido pela rede. Este resultado mostra que, devido à sua alta sensibilidade, a sonda requer um método de calibração preciso.

Os mesmos resultados são constatados para a reprodução do modelo matemático de calibração dinâmica. A Figura 21 mostra que a diferença entre as posições de gravação (linhas pontilhadas para a distância de 5,4 mm e linhas sólidas para a distância de 5,5 mm) é significativa.

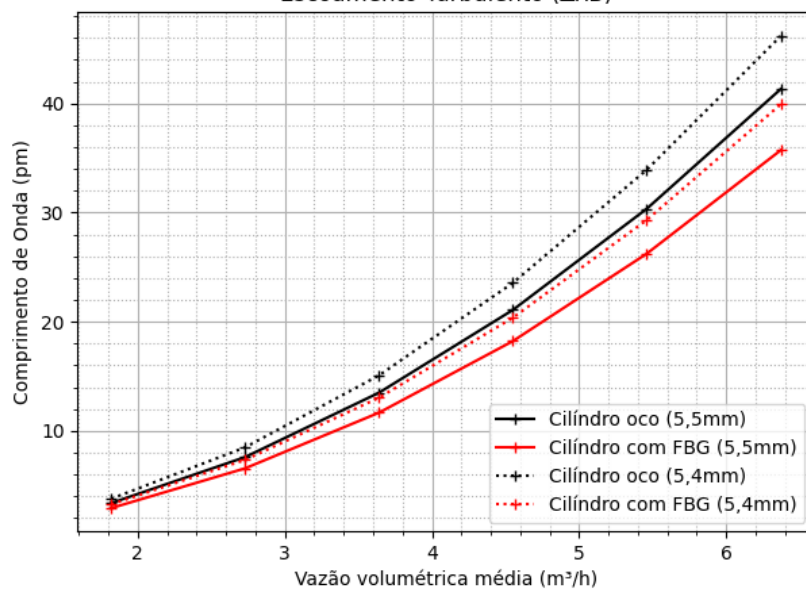
Figura 21 – Comparação dos resultados de calibração dinâmica
Calibração Dinâmica
Escoamento Turbulento



Fonte: Adaptado de Mazzo *et al* (2021)

Utilizando a equação de desvio de comprimento de onda para calibração estática da Tabela 1, é possível converter a deformação específica em desvio no comprimento de onda, resultando no gráfico da Figura 22.

Figura 22 – Comparação dos resultados de calibração dinâmica em comprimento de onda
Calibração Dinâmica
Escoamento Turbulento ($\Delta\lambda B$)



Fonte: Adaptado de Mazzo *et al* (2021)

Apesar de as figuras 21 e 22 apresentarem resultados com magnitudes ligeiramente diferentes dos apresentados em Winter (2019), as linhas de tendências dos gráficos permanecem as mesmas, confirmando a funcionalidade do programa. Acredita-se que estas diferenças existam por particularidades construtivas da sonda, visto que ela foi construída manualmente não se pode ter controle destas particularidades. Estes fatores implicam em diferentes valores de ajuste para cada nova sonda no seu processo de calibração.

O programa de reprodução da calibração estática ainda pode desempenhar o papel de simulador. Se o programa tiver como entrada parâmetros construtivos diferentes, é possível simular a resposta que sonda em função destes parâmetros.

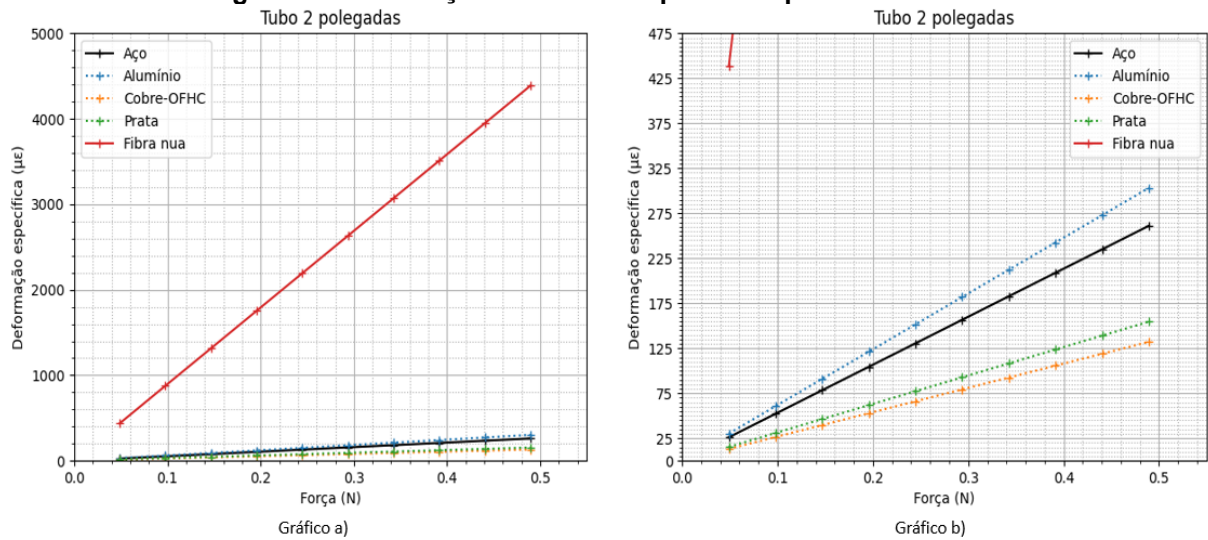
A Figura 23 (a) ilustra um resultado de simulação de diferentes materiais para o encapsulamento da FO em uma sonda para tubulação de duas polegadas, comparando com a deformação de uma FO nua. A Figura 23 (b) tem foco na deformação específica dos materiais escolhidos para análise de encapsulamento. Os materiais e seus parâmetros foram extraídos do *site* do fornecedor de materiais *GoodFellow* (2022) com exceção da FO nua, que foram consideradas as dimensões utilizadas em (WINTER, 2019) e um módulo de Elasticidade de Young de 70 Gpa. A Tabela 4 resume os parâmetros utilizados para a simulação, por material.

A variação na de formação depende principalmente do módulo de Elasticidade de Young e da espessura da parede que se considera. Apesar do aço ter um módulo de elasticidade maior que o do cobre, por exemplo, ele apresenta uma maior deformação para o ponto analisado, porque possui paredes menos espessas.

Tabela 4 - Parâmetros de simulação

| Parâmetro | Aço | Alumínio | Cobre-OFHC | Prata | FO nua |
|-----------|----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| <i>a</i> | 225 μm | 300 μm | 317,5 μm | 350 μm | 119,925 μm |
| <i>L</i> | 50,8 cm | 50,8 cm | 50,8 cm | 50,8 cm | 50,8 cm |
| <i>E</i> | 206 Gpa | 69 Gpa | 129,8 Gpa | 82,7 Gpa | 70 Gpa |
| <i>R</i> | 225 μm | 300 μm | 317,5 μm | 350 μm | 119,925 μm |
| <i>r</i> | 136,53 μm | 150 μm | 137,5 μm | 150 μm | 0,0 μm |
| <i>x</i> | 11 mm | 11 mm | 11 mm | 11 mm | 11 mm |

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 – Simulação de materiais para encapsulamento da FO

Fonte: Elaborado pelo autor

Dos materiais analisados, o tubo de alumínio apresenta características interessantes para a construção da sonda com esta configuração, por não apresentar um módulo de elasticidade tão elevado como o aço, mas com paredes ligeiramente mais espessas, conferindo uma boa sensibilidade para a sonda.

4.2 Resultados da autocalibração

A Figura 24 mostra a interface de autocalibração construída biblioteca Tkinter, nativa do Python. O usuário faz a entrada dos parâmetros construtivos da sonda na coluna da esquerda, e os valores da Planilha U à direita. O resultado é exibido na parte inferior da tela. Caso o usuário ache necessário, é possível exportar as Planilhas U e S em um arquivo no formato “.xlsx”, selecionando a opção abaixo dos campos de inserção de comprimento de onda. Isso evita que seja necessário interagir com a IDE para inserir os dados de autocalibração através terminal do compilador, pois isso pode ser difícil para quem nunca teve contato com uma linguagem de programação, IDE ou códigos de programas.

Figura 24 – Interface de autocalibração da sonda

Auto calibração de sensor FBG

Coluna da esquerda
Planilha U

Insira os parâmetros da sonda.

Distância do deixo central até a fibra externa - a

Comprimento do sensor - L

Módulo de elasticidade do conjunto - E

Raio externo do encapsulamento - R

Raio interno do encapsulamento - r

Constante fotoelástica - pe

Comprimento de onda de Bragg - λ_B

Insira os comprimentos de onda correspondentes (em 'nm').

| | $\lambda 1$ | $\lambda 2$ | $\lambda 3$ |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| Sensor 1 | | | |
| Sensor 2 | | | |
| Sensor 3 | | | |
| Sensor 4 | | | |
| Sensor 5 | | | |

Criar um arquivo '.xlsx' com as tabelas de calibração?

Auto calibrar

Sensor 1
Sensor 2
Sensor 3
Sensor 4
Sensor 5

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 25 mostra a tela de autocalibração já com resultados de calibração de três sondas teóricas. Foram inseridos 3 comprimentos de onda para cada sonda e com isso o programa foi capaz de determinar a posição de gravação da FBG para cada sonda. As posições estão destacadas em retângulos vermelhos, em metros, sendo elas 5,5 mm, 7,2 mm e 10,5 mm respectivamente.

Como para os sensores 4 e 5 foram os campos de comprimento de onda foram preenchidos com "0", o programa interpreta que não se deseja realizar a calibração destes sensores.

Figura 25 – Interface de autocalibração com resultados

Auto calibração de sensor FBG

Insira os parâmetros da sonda.

| | |
|--|----------------|
| Distância do deixo central até a fibra externa - a | 0.000225 |
| Comprimento do sensor - L | 0.0254 |
| Módulo de elasticidade do conjunto - E | 206000000000 |
| Raio externo do encapsulamento - R | 0.000225 |
| Raio interno do encapsulamento - r | 0.00013653 |
| Constante fotoelástica - pe | 0.22 |
| Comprimento de onda de Bragg - λ_B | 0.000001541192 |

Insira os comprimentos de onda correspondentes (em 'nm').

| | λ_1 | λ_2 | λ_3 |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| Sensor 1 | 1572.57833 | 1619.65783 | 1682.43049 |
| Sensor 2 | 1509.80567 | 1447.03300 | 1384.26034 |
| Sensor 3 | 1464.57243 | 851.61583 | 1004.85498 |
| Sensor 4 | 0 | 0 | 0 |
| Sensor 5 | 0 | 0 | 0 |

Criar um arquivo '.xlsx' com as tabelas de calibração?

Auto calibrar

Sensor 1

```
{Força 1 1556.885166
Força 2 1572.578332
Força 3 1588.271498
Força 4 1603.964664
Força 5 1619.657830
Força 6 1635.350995
Força 7 1651.044161
Força 8 1666.737327
Força 9 1682.430493
Força 10 1698.123659
Name: 0.0055, dtype: float64}
{Força 1 1572.57833
Força 2 1619.65783
Força 3 1682.43049
Name: Sensor 1, dtype: float64}
```

Sensor 2

```
{Força 1 1525.498834
Força 2 1509.805668
Força 3 1494.112502
Força 4 1478.419336
Força 5 1462.726170
Força 6 1447.033005
Força 7 1431.339839
Força 8 1415.646673
Força 9 1399.953507
Força 10 1384.260341
Name: 0.0072, dtype: float64}
{Força 1 1509.80567
Força 2 1447.03300
Força 3 1384.26034
Name: Sensor 2, dtype: float64}
```

Sensor 3

```
{Força 1 1464.572425
Força 2 1387.952851
Força 3 1311.333276
Força 4 1234.713701
Força 5 1158.094126
Força 6 1081.474552
Força 7 1004.854977
Força 8 928.235402
Força 9 851.615827
Força 10 774.996253
Name: 0.0105, dtype: float64}
{Força 1 1464.57243
Força 2 851.61583
Força 3 1004.85498
Name: Sensor 3, dtype: float64}
```

Fonte: Elaborado pelo autor

Para comprovar seu funcionamento, foi feita a autocalibração da sonda de duas polegadas seguindo os mesmos procedimentos da calibração estática. As agulhas foram tracionadas no seu ponto médio com massas de 5 g, 15 g e 30 g, realizando estes ciclos 10 vezes. Foi feita a média aritmética dos comprimentos de onda registrados, e as médias inseridas na Planilha U.

A Figura 26 traz o resultado da autocalibração, onde os valores destacados em retângulos vermelhos mostram a posição de gravação da FBG (em metros) em relação ao engaste. Para o sensor 1, a FBG se encontra a 4,05 mm do engaste, e para o sensor 2 essa distância é de 4,15 mm, o que condiz com a distância aproximada de 4 mm que a FBG foi posicionada durante a construção da sonda.

Figura 26 – Autocalibração da sonda de 2 polegadas

Auto calibração de sensor FBG

Insira os parâmetros da sonda.

| | |
|--|---------------|
| Distância do deixo central até a fibra externa - a | 0.000225 |
| Comprimento do sensor - L | 0.0508 |
| Módulo de elasticidade do conjunto - E | 206000000000 |
| Raio externo do encapsulamento - R | 0.000225 |
| Raio interno do encapsulamento - r | 0.00013653 |
| Constante fotoelástica - pe | 0.22 |
| Comprimento de onda de Bragg - λ_B | 0.00001553405 |

Insira os comprimentos de onda correspondentes (em 'nm').

| | $\lambda 1$ | $\lambda 2$ | $\lambda 3$ |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| Sensor 1 | 1714.3716 | 2036.3047 | 2519.2044 |
| Sensor 2 | 1712.5102 | 2030.7226 | 2508.0391 |
| Sensor 3 | 0 | 0 | 0 |
| Sensor 4 | 0 | 0 | 0 |
| Sensor 5 | 0 | 0 | 0 |

Criar um arquivo '.xlsx' com as tabelas de calibração?

Auto calibrar

Sensor 1 Sensor 2 Sensor 3 Sensor 4 Sensor 5

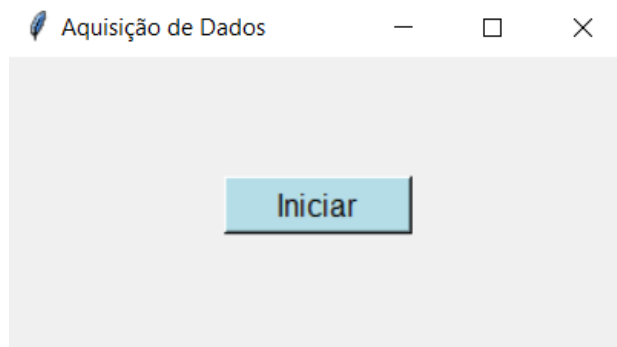
```
{Posição = 4.05 mm.} {
} {Força 1 1714.371574
Força 2 1875.338148
Força 3 2036.304722
Força 4 2197.271296
Força 5 2358.237870
Força 6 2519.204444
Força 7 2680.171018
Força 8 2841.137592
Força 9 3163.070740
Força 10 3772.736479
Name: 0.00405, dtype: float64}
} {Força 1 1714.3716
Força 2 2036.3047
Força 3 2519.2044
Name: Sensor 1, dtype: float64}

{Posição = 4.15 mm.} {
} {Força 1 1712.510689
Força 2 1871.616377
Força 3 2030.722066
Força 4 2189.827755
Força 5 2348.933444
Força 6 2508.039132
Força 7 2667.144821
Força 8 2826.250510
Força 9 3144.461887
Força 10 4735.518774
Name: 0.00415, dtype: float64}
} {Força 1 1712.5102
Força 2 2030.7226
Força 3 2508.0391
Name: Sensor 2, dtype: float64}
```

4.3 Resultados do sistema de aquisição

Para o sistema de aquisição dos dados foi criada uma interface simples para facilitar a utilização do programa por parte do usuário, também com a biblioteca Tkinter, exibida na Figura 27.

Figura 27 – Interface inicial do programa de aquisição de dados

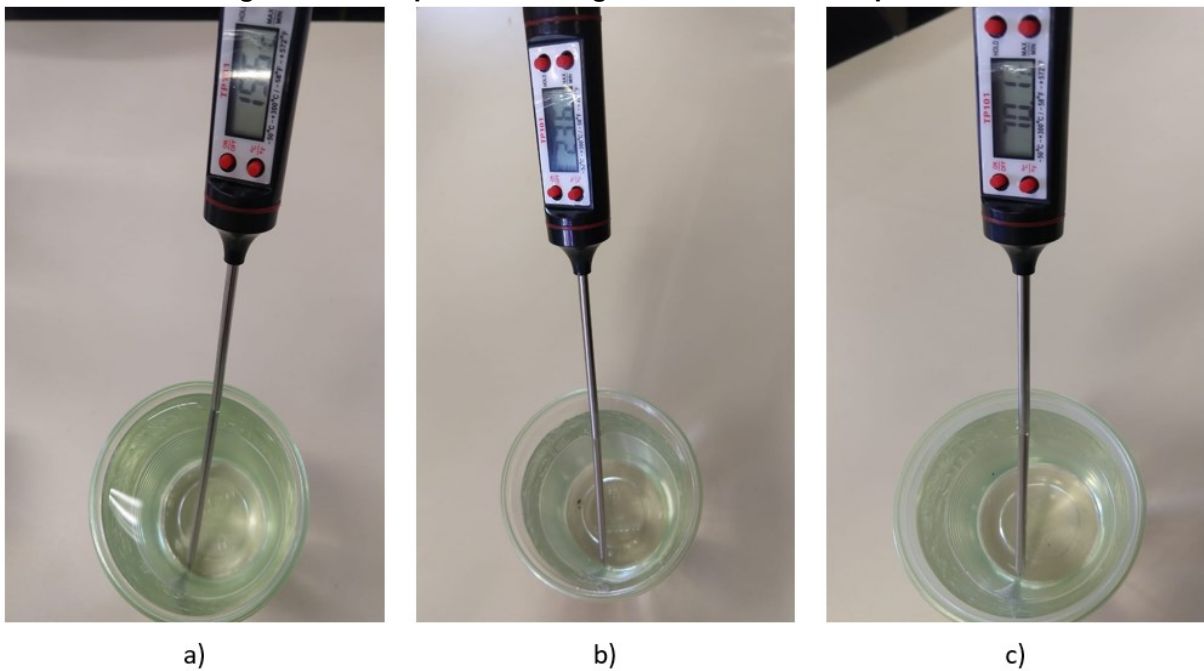


Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados são constantemente registrados em um arquivo do tipo .CSV, sendo que a primeira coluna corresponde ao instante de tempo (em segundos) em que o dado foi recebido, e as colunas subsequentes correspondem à resposta dos sensores (em nm) conectados ao interrogador óptico.

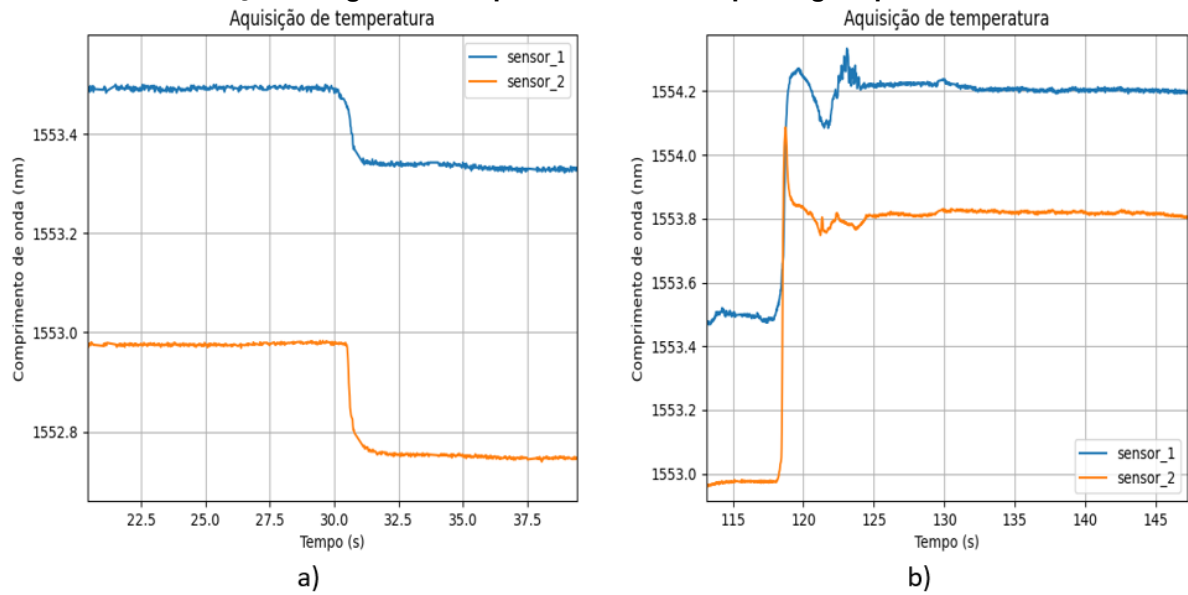
A fim de comprovar o funcionamento do programa de aquisição de dados, foi feito um experimento onde os eletrodos da sonda foram mergulhados em três recipientes com água em temperaturas diferentes, exibidos na Figura 28. Como referência para medir a temperatura da água, foi utilizado um termômetro culinário Clink, com faixa de medição de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, e precisão de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os momentos de transição de um recipiente para o outro foram registrados e podem ser vistos na Figura 29.

Figura 28 - Recipientes com água em diferentes temperaturas



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – a) momento de transição da água em temperatura ambiente para água fria; b) momento de transição da água em temperatura ambiente para água quente



Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando a parte II da Equação 3 é possível converter o dado em comprimento de onda fornecido pelo interrogador ótico para temperatura em °C. Considerando o valor do coeficiente de expansão térmica do aço (α_{Λ}) como 14×10^{-6} , e o valor do coeficiente termo-ótico α_{η} da FO como $14,2 \times 10^{-12}$. A Tabela 5 exhibe os resultados obtidos.

Tabela 5 - Comparação das temperaturas medidas e temperaturas de referência

| | Momento de transição | λ_B ambiente (nm) | λ_B medido (nm) | $\Delta\lambda_B$ (nm) | Temperatura registrada (°C) | Temperatura de ref. (°C) |
|--------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| FBG 1 | Transição 1 | 1553,493 | 1553.333 | -0,160 | 16,2 | 15,6 |
| | Transição 2 | 1553,493 | 1554.204 | 0,711 | 56,3 | 70,1 |
| FBG 2 | Transição 1 | 1552,976 | 1552,752 | -0,224 | 13,3 | 15,6 |
| | Transição 2 | 1552,976 | 1553.818 | 0,842 | 62,3 | 70,1 |

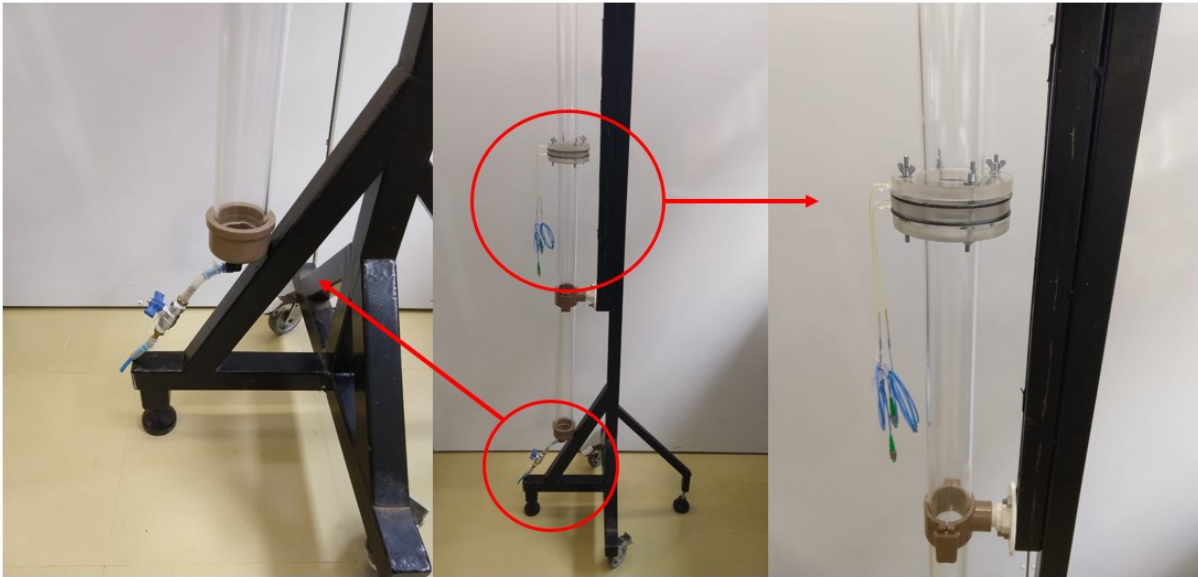
Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar na Figura 29 que a variação no comprimento de onda refletido tem o comportamento esperado, mas como não foi possível determinar os coeficientes do transdutor como um todo para o cálculo da temperatura houve uma divergência entre a temperatura medida e a temperatura de referência.

4.4 Gráfico em tempo real

Para o experimento foi construída uma coluna de bolhas vertical com tubos de acrílico. A coluna foi preenchida com água e foram inseridas bolhas na coluna de água por meio de uma válvula na parte inferior, como mostra a Figura 30. A extremidade superior é aberta ao ambiente para que o ar inserido pode ser liberado.

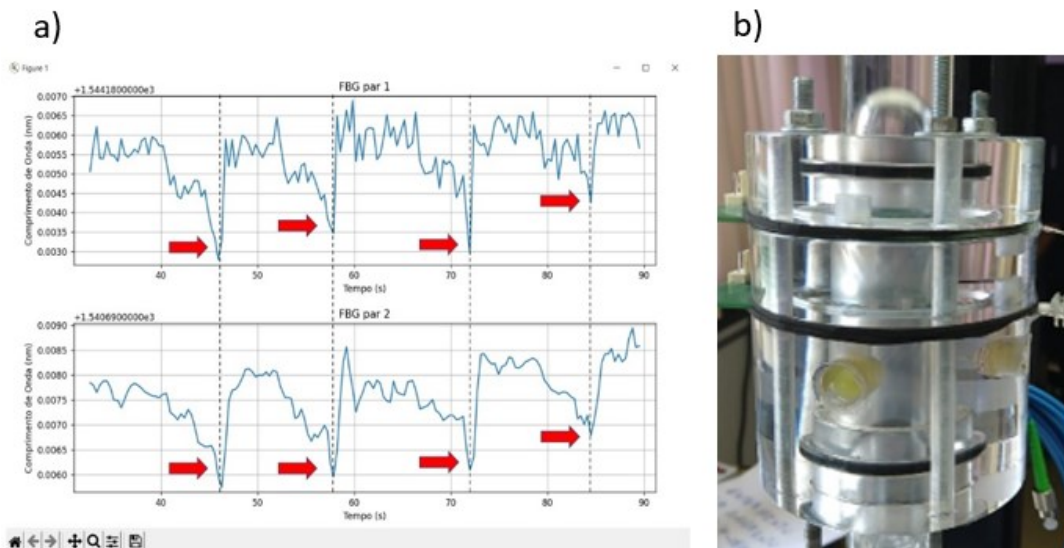
Figura 30 – Estrutura da coluna de bolhas com a válvula



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 31 mostra uma captura de tela da passagem de algumas bolhas pela sonda. Cada seta vermelha no gráfico indica a passagem de uma bolha.

Figura 31 – a) passagem de bolhas pela sonda indicadas com setas vermelhas; b) momento da passagem de uma bolha pela sonda

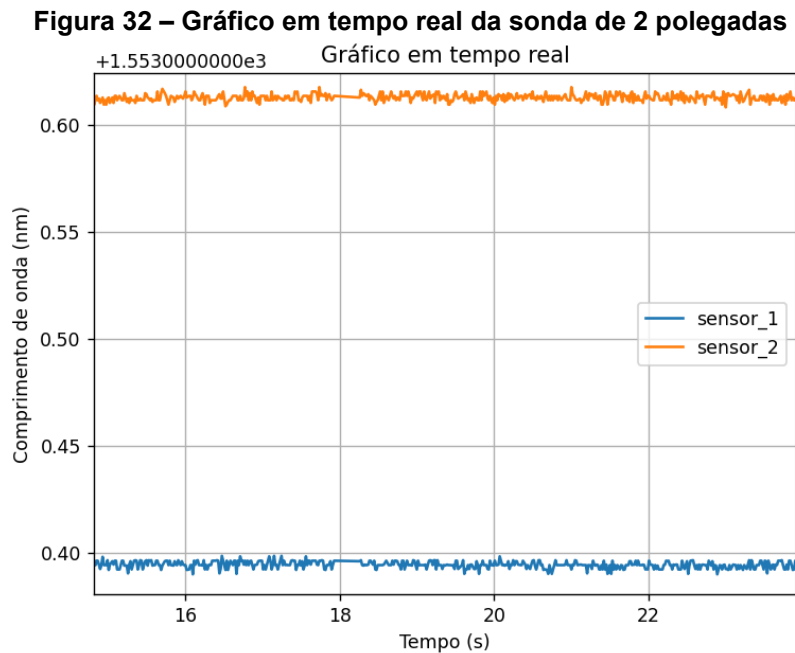


Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.1 Monitoramento da passagem de bolhas com sonda de 2 polegadas

O experimento da passagem de bolhas pelos eletrodos da sonda foi repetido para a sonda de duas polegadas, utilizando tanto os flanges de aço com os eletrodos fixos, quanto o flange de aço com a FO nua.

A Figura 32 ilustra a passagem de bolhas pela sonda com eletrodos de aço inoxidável. Observando a amplitude das oscilações, pode-se perceber que a sensibilidade da sonda diminuiu significativamente se comparada com a sonda de uma polegada por se tratar se uma sonda mais robusta, com um flange menos maleável e uma fixação entre o eletrodo e o flange também mais robusta.



Fonte: Elaborado pelo autor

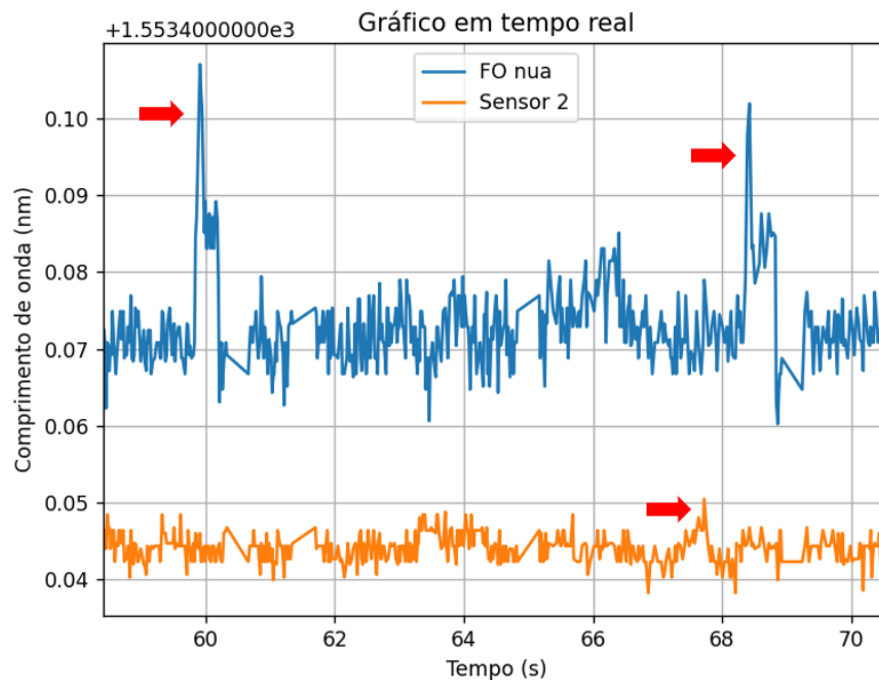
A robustez adicional foi projetada para suportar o estresse mais elevado causado por fluidos mais viscosos, como petróleo, além de o impacto de material particulado, como areia e pequenos fragmentos de rochas.

No entanto, analisando o comportamento exibido na Figura 33 pode-se ver que a sensibilidade aumenta consideravelmente, uma vez que a proteção mecânica fornecida pela agulha de aço foi removida, confirmando o comportamento esperado durante o monitoramento da passagem de bolhas pela sonda.

Outra melhoria feita, que pode ser observada quando comparadas as figuras 31 (a) e 33, é que a taxa de atualização do gráfico aumentou (uma indicação desse aumento, é o aumento concomitante do ruído). Para o gráfico da Figura 31 foi utilizado o módulo *pyplot* da biblioteca Matplotlib, que apresenta um bom desempenho para gráficos estáticos, mas tem um processamento mais lento, fazendo com que os dados não fossem registrados em sua integridade.

Para contornar este problema, foi utilizado o módulo *FuncAnimation*, mais indicado para gráficos dinâmicos e animações. Com isso, os dados enviados pelo interrogador não eram perdidos por atraso de processamento do programa de construção do gráfico em tempo real.

Figura 33 - Gráfico em tempo real com a FO nua



Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando que a densidade da água é próxima de 1 g/cm^3 e sua viscosidade cinemática próxima de $1 \text{ mm}^2/\text{s}$, o impacto que o escoamento deste fluido causa na sonda de duas polegadas construída neste trabalho seria consideravelmente menor se comparado com outros fluído, como petróleo. Apesar densidade média do petróleo ser menor que a da água, aproximadamente $0,85 \text{ g/cm}^3$, sua viscosidade cinemática se mostra consideravelmente maior que a da água, podendo variar de $2 \text{ mm}^2/\text{s}$ até $60 \text{ mm}^2/\text{s}$.

5 CONCLUSÕES

O programa de computador desenvolvido neste trabalho atingiu seus objetivos, podendo funcionar como simulador de sondas com as dimensões e materiais de encapsulamento que o usuário desejar, dependendo das condições à que a sonda será submetida.

O programa pode realizar a autocalibração de novas sondas, precisando apenas dos parâmetros construtivos e de 3 dados de comprimento de onda refletido para retornar com boa precisão a posição de gravação da FBG em relação ao engaste da agulha.

O programa de aquisição de dados, juntamente com o programa de GTR, se mostraram eficazes no monitoramento dos dados capturados do ambiente, seja de temperatura ou de estresse mecânico.

Foram criadas interfaces gráficas para o usuário a fim de facilitar a interação com o programa. Além disso a integração dos programas desenvolvidos com a sonda cria um bom sistema de monitoramento de escoamento bifásico.

Por fim, conclui-se que o encapsulamento de aço não é o mais adequado para monitorar tubulações onde percorrem fluidos pouco densos ou viscosos, mas poderia ter uma performance melhor caso o fluido a ser monitorado fosse petróleo, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- BACHANT, Pete. petebachant/MicronOpt-Python. **GitHub**, 2015. Disponível em: <https://github.com/petebachant/MicronOpt-Python>. Acesso em: 20 setembro 2021.
- BASTOS, Talita P. **REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA: ANÁLISE DE ENCAPSULAMENTOS EM RESPOSTA À VIBRAÇÃO E TEMPERATURA**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2016.
- BRILL, James P.; MUKHERJEE, Hemanta. **Multiphase Flow in Wells**. Richardson: Society of Petroleum Engineers Inc., 1999. 147 p.
- CHEN, Daniel Y. **Análise de dados com Python e Pandas**. 1ª. ed. São Paulo: Pearson-novatec, v. I, 2018.
- D. D. JOSEPH, R. B.; CHEN, K. P.; RENARDY, Y. Y. CORE-ANNULAR FLOWS. **Annual Reviews Inc.**, 1997. 65-90.
- DA SILVA, Jean Carlos C. **MONITORAÇÃO DE VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS COM O EMPREGO DE SENSORES EM FIBRA ÓPTICA**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2005.
- DE OLIVEIRA, Valmir. **Redes de Bragg para medições em altas temperaturas**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2012.
- DENG, Xiang; CHEN, Dixiang; YANG, Wuqiang. Study on electrodynamic sensor of multi-modality system for multiphase flow measurement. **Review of Scientific Instruments.**, 82, 2011.
- FANCHI, John R.; CHRISTIANSEN, Richard L. **Introduction to Petroleum Engineering**. Hoboken: Wiley, 2017.
- FIGUEIREDO, Patrícia. Proliferação de espécie invasora de mexilhão afeta hidrelétricas. **G1**, 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/desafio-natureza/noticia/2019/04/26/proliferacao-de-especie-invasora-de-mexilhao-afeta-hidreletricas.ghtml>. Acesso em: 30 novembro 2021.
- GAZONI, Eric; CLARK, Charlie. openpyxl - A Python library to read/write Excel 2010 xlsx/xlsm files. **OpenPyXL**, 2022. Disponível em: <https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable/#>. Acesso em: 04 junho 2022.
- GOODFELLOW. GoodFellow - Your global supplier for materials, 2022. Disponível em: <https://www.goodfellow.com/uk/en-gb>. Acesso em: 15 agosto 2022.
- HBM. O que é um sensor FBG (Fiber Bragg Grating)? **HBM an HBK company**. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/4596/dicas-e-informacoes-o-que-e-sensor-fbg/>. Acesso em: 02 maio 2022.

HILL, K. O. *et al.* Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask. **Applied Physics Letters**, v. 62, p. 1035-1037, 1993.

HILL, Kenneth O.; MELTZ, Gerald. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. **JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY**, v. 15, p. 1263-1276, Agosto 1997.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg Grating**. San Diego: Academic Press, 1999.

LOPES, Wilson. VARIACÃO DA ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE COM A LATITUDE E ALTITUDE. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Guarulhos-SP, 25, dez 2008. 561-568. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5165503>. Acesso em: 26 nov 2022.

MALDANER, Leonardo. **Desenvolvimento de Software Acadêmico Para Engenharia Química Utilizando Linguagem Python: Separador de Mistura Binária**. UTFPR. Francisco Beltrão. 2019.

MAZZO, Paulo H. R. *et al.* Simulation Software for an Optical FBG Sensor Applied in Flow Measurements. **International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**, Fortaleza, Brasil, 2021.

MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optical Letters**, 14, 1989. 823-825.

MIYOSHI, Simone D. C. **Modelo Kernel PCA-Genético para Ajuste de Histórico**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010. (0821477/CA).

OLIPHANT, Travis E. Python for Scientific Computing. **Computing in Science & Engineering**, v. 9, p. 10-20, jul. 2007.

OTHONOS, Andreas *et al.* Fibre Bragg Gratings. In: _____ **Wavelength Filters in Fibre Optics**. Berlin: [s.n.], 2006. p. p. 189-269.

OTHONOS, Andreas; KALLI, Kyriacos. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. Boston, London: Artech House, 1999. 433 p.

PHAM, Son T.; TRUONG, Minh H.; PHAM, Ba T. Flow Assurance in Subsea Pipeline Design for Transportation of Petroleum Products. **Open Journal of Civil Engineering**, p. 311-323, jul. 2017.

PREUVENEERS, Davy; ILIE-ZUDOR, Elisabeth. The intelligent industry of the future: A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0. **Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments**, 2017. 12.

RIBEIRO, Joel D. S. **Transdutor à fibra ótica para monitoração de vazão em tubulações industriais**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2018.

SILVA, Erlon V. *et al.* Medição de Temperatura Utilizando Sensoriamento Óptico Distribuído e Quase-Distribuído em Geradores Elétricos de Potência. **VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica CITENEL e IV Seminário de Eficiência Energética no Setor Elétrico - SEENEL**, Costa do Sauípe, 2015. 12.

SOUSA, Bruno J. D.; JÚNIOR, José Jorge L. D.; FORMIGA, Andrei D. A. **Introdução a Programação**. João Pessoa: Editora da UFPB, v. 1, 2014.

THE MATPLOTLIB DEVELOPMENT TEAM. Matplotlib: Visualization with Python. **Matplotlib**, 2021. Disponível em: <https://matplotlib.org/>. Acesso em: 04 junho 2022.

VENDRUSCOLO, Tiago P. *et al.* Two-phase flow measurement based on oblique laser scattering. **SPIE**, Jeju, Republic of Korea, 2015.

VENDRUSCOLO, Tiago P. **Técnicas Ópticas para Investigação de Escoamentos Multifásicos**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2016.

WEBSTER, John G.; EREN, Halit. **Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook**. 2^a. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

WINTER, Rosângela. **SONDA ELÉTRICA E ÓTICA PARA MEDIÇÃO DO ESCOAMENTO**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2019.

ZELLE, John M. **Python Programming: an introduction to computer science**. 3^a. ed. [S.I.]: Franklin, Beedle & Associates, Incorporated, 2016.

ZITHA, P. *et al.* Increasing Hydrocarbon Recovery Factors. **Society of Petroleum Engineers**. Disponível em: <https://www.spe.org/en/industry/increasing-hydrocarbon-recovery-factors/>. Acesso em: 05 maio 2022.