

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

JOEL DA SILVA RIBEIRO

**TRANSDUTOR A FIBRA ÓTICA PARA MONITORAÇÃO DE VAZÃO  
EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA  
2018**

JOEL DA SILVA RIBEIRO

**TRANSDUTOR A FIBRA ÓTICA PARA MONITORAÇÃO DE VAZÃO  
EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica – Área de concentração: Automação e Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Marco José da Silva

**CURITIBA  
2018**

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

R484t Ribeiro, Joel da Silva

Transdutor a fibra ótica para monitoração de vazão em tubulações industriais / Joel da Silva Ribeiro.-- 2018.  
69 f.: il.

Disponível via World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia. Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia, Curitiba, 2018.

Bibliografia: f. 56-58.

1. Sistemas de energia elétrica - Dissertações. 2. Detectores de fibra ótica. 3. Redes de Bragg. 4. Medidores de fluxo. 5. Escoamento bifásico. 6. Escoamento multifásico. 7. Transdutores. 8. Calibração. 9. Tubulação - Dinâmica dos fluidos. 10. Controle de processo. 11. Métodos de simulação. I. Silva, Jean Carlos Cardozo da, orient. II. Silva, Marco José da, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.31



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

## **TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 10**

A Dissertação de Mestrado intitulada Transdutor A Fibra Ótica Para Monitoração De Vazão Em Tubulações Industriais, defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) Joel Da Silva Ribeiro , no dia 7 de dezembro de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de concentração Automação e Sistemas de Energia, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia.

**BANCA EXAMINADORA:**

Jean Carlos Cardozo Da Silva, Dr – UTFPR

Eduardo Nunes Dos Santos, Dr – UTFPR

Marcos Vinicio Haas Rambo, Dr – UFPR

Uilian Jose Dreyer, Dr – UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 7 de dezembro de 2018.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pelo dom da vida.

Agradeço ao meu orientador Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva por sua sabedoria e confiança depositada em mim. Professor entusiasmado e confiante, desejo-lhe sucesso. Em seu nome agradecer todos os professores que contribuíram para realização deste trabalho. Ao professor Dr. Marco José da Silva, coorientador deste trabalho, pelo interesse e colaboração.

À Rosângela Winter pela parceria nas pesquisas, ensaios e desenvolvimento deste documento. Suas sugestões e incentivos foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos – LabESO pela dedicação e ajuda.

Às agências de fomento CAPES, CNPq, FINEP, SETI e Fundação Araucária pelo suporte financeiro ao laboratório. À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba e ao PPGSE por disponibilizar estrutura física e equipamentos para o desenvolvimento das atividades.

Aos pesquisadores e funcionários do Núcleo de Escoamento Multifásico – NUEM, por disponibilizar estrutura para realização dos ensaios.

Em especial a minha companheira, Érica, pelo apoio e compreensão durante esses anos. E em seu nome toda sua família.

Aos meus pais, Rose e Jair, meus irmãos, Rodrigo, Thiago e Douglas, que sempre me incentivaram e deram força nas horas difíceis.

Aos meus Avós, em especial à “Vovó” Nair por sua positividade, embora encontre dificuldades está frequentemente proferindo palavras de incentivo e motivação.

## RESUMO

RIBEIRO, Joel da S. Transdutor a Fibra Ótica para Monitoração de Vazão em Tubulações Industriais, 2018, 69 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

Monitoramento da vazão de fluidos é essencial em processos industriais. Métodos de medição de vazão volumétrica tradicionais não são viáveis em algumas aplicações, como, por exemplo, em ambientes sujeitos a explosões ou sujeitos a campos eletromagnéticos intensos. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um transdutor a fibra ótica para medição de escoamento em tubulações industriais. A força criada pelo fluido em deslocamento resulta na deformação do *cantilever* tubular, no interior do qual estão coladas quatro fibras óticas, duas como elemento sensor, utilizando redes de Bragg, e duas para garantir o correto posicionamento das redes. A vazão é obtida monitorando a diferença dos dois comprimentos de onda de cada FBG, o que corrige também o problema da sensibilidade cruzada de temperatura e de deformação dos sensores. Além disso, o uso de abraçadeiras agrega outro ponto forte ao sensor, pois permite a fácil instalação e manutenção em tubulações industriais. Foram realizados ensaios estáticos e dinâmicos a fim de calibrar e validar o transdutor. A maior sensibilidade na calibração dinâmica do Transdutor 1 é de  $14,7 \text{ pm}/\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \pm 2,9 \text{ pm}(t_{95\%} = 2,0)$  e do Transdutor 2 de  $19,2 \text{ pm}/\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \pm 4,5 \text{ pm}(t_{95\%} = 2,0)$ . Para a calibração estática, a maior sensibilidade do Transdutor 1 é de  $2,34 \text{ nm}/\text{N} \pm 31 \text{ pm}(t_{95\%} = 2,1)$  e do Transdutor 2 de  $3,2 \text{ nm}/\text{N} \pm 35 \text{ pm}(t_{95\%} = 2,1)$ . A diferença de sensibilidade entre os transdutores deve-se à rotação da sonda do Transdutor 1 durante o período de secagem da cola epóxi. O transdutor foi capaz de medir vazão na faixa de  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $6,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , além de caracterizar escoamento gás-liquido. Diversas são as vantagens de utilizar fibras óticas como sensores de vazão e o desenvolvimento de dispositivos robustos permite sua utilização em ambientes agressivos como os industriais.

**Palavras-chave:** Sensores de vazão; Processos industriais; Sensores a fibra ótica; Redes de Bragg.

## ABSTRACT

RIBEIRO, Joel da S. Optical fiber transducer for flow monitoring in industrial pipes, 2018, 69 f. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

Fluid flow monitoring is essential in industrial processes. Volumetric flow measurement methods are not feasible in some applications, such as in environments subject to explosions or subject to intense electromagnetic fields. The present work shows the development of an optical fiber transducer for flow measurement in industrial pipes. The force created by the displacing fluid results in the tubular cantilever deformation, within which are adhered four optical fibers, two as a sensor element using Fiber Bragg Grating and two to ensure the optimal geometrical positioning of FBGs. The flow rate is obtained by monitoring the two wavelengths difference of each FBG, which also corrects the cross sensitivity trouble of sensor temperature and strain. Furthermore, the use of clamps adds another strong point to the sensor as it allows easy installation and maintenance on industrial pipes. Static and dynamic tests were performed for transducer calibration and validation. The highest sensitivity in Transducer 1 dynamic calibration is  $14,7 \text{ pm}/\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \pm 2,9 \text{ pm}$  ( $t_{95\%} = 2,0$ ) and Transducer 2,  $19,2 \text{ pm}/\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \pm 4,5 \text{ pm}$  ( $t_{95\%} = 2,0$ ). For the static calibration the Transducer 1 highest sensitivity is  $2,34 \text{ nm}/\text{N} \pm 31 \text{ pm}$  ( $t_{95\%} = 2,1$ ) and Transducer 2,  $3,2 \text{ nm}/\text{N} \pm 35 \text{ pm}$  ( $t_{95\%} = 2,1$ ). The difference in sensitivity between the transducers is due to the rotation to the probe of Transducer 1 during the drying period of the epoxy adhesive. The transducer was able to measure flow rate in the range of  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$  to  $6,0 \text{ m}^3/\text{h}$ . Furthermore, the gas-liquid flow. There are several advantages of using optical fibers such as flow rate sensors and the development of robust devices allows them to be used in an aggressive industrial environments.

**Key Words:** Flow sensors; Industrial processes; Optical fiber sensors; Fiber Bragg Grating.

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

FBG	<i>Fiber Bragg grating</i> – Rede de Bragg em fibra ótica;
FO	Fibra ótica;
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i> ;
NUEM	Núcleo de escoamento multifásico;
OFS	<i>Optical Fiber Sensor</i> – Sensor de fibra ótica;
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i> – Analisador do espectro ótico;
SSMF	<i>Standard single mode fiber</i> – Fibra monomodo padrão;
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná;
VIM	Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de Metrologia;
WDM	<i>Wavelength-division multiplex</i> - multiplexação por divisão de comprimento de onda;
WMS	<i>Wire mesh sensor</i> – Sensor de rede de eletrodos/fios.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Padrões de escoamento horizontal e próximo do horizontal .....	19
Figura 2-2: Triângulo de explosão com as três partes integrantes para uma possível reação: combustível, oxidante e a fonte de ignição .....	21
Figura 2-3: Representação da rede de Bragg e seus espectros .....	23
Figura 2-4: Máscara de fase com a representação do feixe UV incidente e as ordens 0 e $\pm 1$ .....	24
Figura 2-5: Estrutura do medidor de vazão utilizando <i>cantilever</i> , no qual se demonstra o local das diferentes forças e taxas de escoamento aplicadas .....	26
Figura 2-6: Estrutura do medidor de vazão com <i>cantilever</i> , baseado no monitoramento dos comprimentos de ondas de FBGs com compensação de temperatura .....	27
Figura 2-7: Medidor de escoamento de gás, no qual o deslocamento do flutuador é convertido sob ação de força magnética, na deformação do <i>cantilever</i> .....	28
Figura 2-8: Esquema do medidor de escoamento por deflexão causada pelo efeito de impulso do fluido .....	29
Figura 2-9: Representação esquemática da disposição da grade de 8 x 8 FBG similar ao <i>wire- mesh</i> , utilizado para caracterizar escoamento multifásico .....	30
Figura 3-1: Estrutura do medidor de vazão baseado no monitoramento dos comprimentos de ondas de FBGs com compensação de temperatura .....	33
Figura 3-2: Vista lateral da sonda com detalhe da posição das fibras auxiliares e FBGs de tração e compressão próxima ao engaste .....	34
Figura 3-3: Arranjo experimental para os ensaio estáticos com o posicionamento da abraçadeira, do cantilever e a tração de uma das massas .....	42
Figura 3-4: Deflexão do tubo de aço inoxidável propiciada pela aplicação de força em sua extremidade livre .....	43
Figura 3-5: Resultado prático dos transdutores da calibração estática .....	43
Figura 3-6: Variação do comprimento de onda de Bragg das FBGs do Transdutor 1 em função da variação da temperatura propiciada pelo banho térmico .....	44
Figura 3-7: Sistema de controle da planta do NUEM com o supervisor e instrumentação ao fundo .....	46
Figura 3-8: Arranjo experimental para calibração dinâmica .....	46
Figura 3-9: Posição da sonda na tubulação .....	47
Figura 3-10: Resultado prático dos transdutores da calibração dinâmica .....	47
Figura 3-11: Diagrama de blocos mostrando as etapas para da saturação do sinal obtido no escoamento bifásico através das redes de Bragg em fibra ótica. ....	49
Figura 3-12: Exemplo da metodologia do procedimento de saturação. (a) Histograma do sinal obtido pela FBG quando $JL=2,0$ m/s e $JG=1,0$ m/s e indicando os pontos de picos, juntamente com os pontos de saturação. (b) Série temporal do sinal original e do sinal saturado. ....	50

Figura 3-13: Diagrama de blocos mostrando as etapas para o tratamento do sinal bifásico (filtragem e binarização) obtido através das redes de Bragg em fibra ótica.....	50
Figura 3-14: Exemplo da metodologia do procedimento de filtragem e binarização. Séries temporais do sinal saturado, filtrado-normalizado e binarizado obtido pela FBG quando JL=2,5 m/s e JG=2,0m/s. ....	51
Figura 3-15: Procedimento de saturação. (a) Histograma do sinal obtido pelo Transdutor 1 quando JL=1,0 m/s e JG=2,0 m/s. (b) Série temporal do sinal original e do sinal saturado. ....	52
Figura 3-16: Série temporal do sinal, filtrado e binarizado. Transdutor 1 quando JL=1,0 m/s e JG=2,0 m/s. ....	52
Figura A-0-1: Modelo escolhido para representar as sondas (viga em balanço) .....	59
Figura A-0-2: Esquema estático de carregamento da viga em balanço com a representação da força aplicada na extremidade da viga, as reações dos apoios. ....	59
Figura D-0-1: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando JL=0,3 m/s e JG=0,7 m/s. (b) Transdutor 1 quando JL=0,75 m/s e JG=0,75 m/s. ....	67
Figura D-0-2: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando JL=0,5 m/s e JG=1,5 m/s. (b) Transdutor 1 quando JL=0,5 m/s e JG=0,5 m/s.....	67
Figura D-0-3: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando JL=1,5 m/s e JG=1,5 m/s. (b) Transdutor 1 quando JL=1,5 m/s e JG=0,5 m/s.....	68
Figura D-0-4: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando JL=2,0 m/s e JG=1,0 m/s. (b) Transdutor 1 quando JL=2,0 m/s e JG=1,5 m/s.....	68
Figura D-0-5: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando JL=3,0 m/s e JG=1,0 m/s. (b) Transdutor 1 quando JL=1,0 m/s e JG=1,0 m/s.....	69
Figura D-0-6: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. Transdutor 1 quando JL=1,0 m/s e JG=2,0 m/s. ....	69

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Q_v$	Vazão volumétrica;
$Q_m$	Vazão mássica;
$\lambda_{B1}$	Comprimento de onda de Bragg FBG1;
$\lambda_{B2}$	Comprimento de onda de Bragg FBG2;
$\lambda_B$	Comprimento de onda de Bragg;
$\Lambda$	Periodicidade da rede de Bragg;
$\Delta p_m$	Período da máscara de fase;
$n_{eff}$	Índice de refração efetivo do núcleo da fibra ótica;
$\Delta \lambda_B$	Variação no comprimento de onda de Bragg;
$\Delta T$	Variação da temperatura;
$E$	Módulo de elasticidade do material ou módulo de Young;
$p_e$	Coefficiente fotoelástico;
$k$	Fator de concentrações de tensões que está relacionado ao <i>cantilever</i> ;
$F$	Força aplicada;
$M$	Momento fletor da viga;
$l$	Distância da extremidade livre até o engaste do tubo de aço;
$R_a$	Raio externo do tubo metálico;
$r$	Raio interno do tubo metálico;
$J_s$	Momento de inércia à flexão da seção transversal;
$\sigma$	Tensão axial em um ponto da seção transversal ou tensão de flexão;
$\varepsilon$	Deformação relativa por unidade de comprimento aplicada ( <i>strain</i> );
$y$	Distância da linha neutra até superfície externa do tubo metálico oco;
$\alpha$	Coefficiente de expansão térmica (CET) do material da fibra ótica;
$u(x)$	Vazão média em um local 'x' da tubulação;
$V_{avg}$	Velocidade média de escoamento;
$R$	Raio da tubulação;

$\Delta P$	Incremento da pressão;
$p$	Densidade do fluido;
$dS$	Microelemento da superfície da sonda;
$D$	Diâmetro da sonda;
$A$	Área da seção transversal da tubulação;
$S(q_k)$	Desvio padrão da amostra;
$q_i$	$i$ -ésima indicação;
$\bar{q}$ ,	Média das “ $n$ ” indicações
$n$	Número de medições repetidas efetuadas;
$u_1$	Incerteza padrão em razão da dispersão das amostras;
$S_p$	Maior incerteza;
$a$	Ordenada de origem;
$b$	Declive da reta ou coeficiente de regressão;
$S_{yx}$	Desvio padrão da reta;
$N$	Número de pares de valores ( $x$ , $y$ );
$S_y$	Desvio-padrão da grandeza dependente;
$S_x$	Desvio-padrão da grandeza independente;
$S_b = u_2$	Incerteza do declive ou coeficiente angular da equação;
$S_a = u_3$	Incerteza da ordenada na origem;
$u_4$	Incerteza determinada pela interpolação de um novo valor de $y$ a partir de $x$ ;
$u_5$	Incerteza das medidas realizadas pelo interrogador ótico;
$u_c$	Incerteza combinada;
$\gamma_i$	Graus de liberdade;
$\gamma_n$	Número de graus de liberdade da $n$ -ésima fonte de incerteza;
$\gamma_{ef}$	Número de graus de liberdade efetivos;
$u_n$	Incerteza-padrão da $n$ -ésima fonte de incerteza;
$U$	Incerteza expandida ou incerteza de medição;

$t_p$	Coeficiente da distribuição <i>t-Student</i> com nível de confiança $p$ ;
$r$	Coeficiente de correlação.
JL	Velocidade superficial do líquido;
JG	Velocidade superficial do gás;
$\nu$	Coeficiente de Poisson;
L	Comprimento do tubo metálico de aço;
EI	Rigidez à flexão;
$y(x)$	Deslocamento da viga;
$\theta(x)$	Rotação da viga;
$C_{1-3}$	Constantes de integração;

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	Motivação .....	16
1.2.	Objetivos.....	16
1.2.1.	Objetivo Geral .....	16
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	17
1.3.	Estrutura do Trabalho e Metodologia.....	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.	Conceito de Vazão .....	18
2.2.	Escoamento Multifásico .....	18
2.3.	Classificação dos medidores de vazão.....	20
2.4.	Instrumentos Industriais em Atmosferas explosivas .....	21
2.5.	Redes de Bragg em Fibras Óticas.....	22
2.5.1.	Sensibilidade das redes de Bragg à temperatura e deformação .....	25
2.6.	Métodos Óticos Aplicados ao Monitoramento de Vazão .....	25
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1.	Processo de Montagem do Transdutor.....	32
3.2.	Modelos Matemáticos da Parte Ótica da Sonda.....	34
3.2.1.	Modelo matemático relacionado à aplicação de diferentes forças.....	35
3.2.2.	Modelo matemático relacionado à aplicação de diferentes vazões ...	36
3.3.	Cálculo das Incertezas .....	38
3.4.	Calibração Estática.....	42
3.5.	Calibração Dinâmica.....	45
3.6.	Resultados obtidos em escoamento bifásico utilizando sensores baseados em redes de Bragg em fibras óticas .....	48
4.	CONCLUSÕES	53
4.1.	Trabalhos futuros.....	54
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE A – MODELO DA VIGA EM BALANÇO	59
A.1.	Esquema estático de carregamento .....	59
A.2.	Momento fletor máximo (esforço interno).....	60
	APÊNDICE B – RESULTADO DO CÁLCULO DAS INCERTEZAS	62

APÊNDICE C – PUBLICAÇÃO	65
APÊNDICE D – ABRAÇADEIRA	66
APÊNDICE E – SÉRIES TEMPORAIS DO ESCOAMENTO BIFÁSICO	67

## 1. Introdução

Monitoramento da vazão de fluidos é essencial em processos industriais. Segundo Bega *et al.* (2011), os maiores usuários de instrumentação de medição são as indústrias atuantes nas áreas petroquímica, alimentos, cerâmica, siderúrgica, celulose e papel, têxtil e geração de energia elétrica. Segundo Delmée (2003), entre as principais variáveis medidas, a vazão é a que requer os recursos tecnológicos mais diversos para o desenvolvimento de medidores. Os sensores em fibras óticas possuem a vantagem de serem pequenos, milímetros de comprimento, imunes a interferências eletromagnéticas e terem capacidade de multiplexação (ZHAO *et al.*, 2016). Como são produzidos em material não condutor de corrente elétrica são adequados para aplicações em ambientes explosivos (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2013).

As pesquisas desenvolvidas com sensores de vazão a fibra ótica utilizam diferentes métodos de detecção. Como exemplo, pode-se citar os trabalhos de ZHAO *et al.* (2016), HERZOG (1992) e LYLE e PITT (1981), nos quais o sensor é posicionado de tal forma que o escoamento produza vibrações ou curvaturas na fibra ótica, modificando o caminho ótico da luz. Assim como, as pesquisas de ZHAO *et al.* (2017) e LU e CHEN (2006) que utilizam sensores de vazão com FBGs (rede de Bragg em fibra ótica), sendo dispositivos sensíveis a variação de temperatura e deformação.

Uma das vantagens das redes de Bragg é que a informação a ser medida está contida no desvio do comprimento de onda, tornando-a independente das flutuações na intensidade da luz (DA CUNHA, 2007).

O trabalho proposto nesta dissertação segue as ideias e princípios de operação do método diferencial com *cantilever* cilíndrico oco proposto por ZHAO *et al.* (2017), no entanto, foram alterados parâmetros como comprimento do tubo metálico, diâmetro e posicionamento da tubulação. Além disso, foi desenvolvida uma carcaça do tipo abraçadeira que facilitou a execução dos ensaios estáticos, a instalação do sensor na tubulação para os ensaios dinâmicos e também garantiu a perpendicularidade da sonda com a tubulação, Figura 3-1. De maneira similar a Zhao *et al.* (2017), duas FBGs foram utilizadas para aumentar a sensibilidade e evitar que as variações de temperatura da ordem de 1°C a 5°C não influenciem na medição de deformação utilizando as redes de Bragg em função da sensibilidade cruzada. A fim de melhorar



a sustentação e estabilidade das FBGs, outras duas fibras óticas auxiliares foram inseridas no tubo de aço. Num momento posterior, as duas fibras óticas auxiliares podem ser utilizadas também como elemento sensor, a fim de medir o vetor completo de força ou vazão e não somente o seu módulo.

### 1.1. **Motivação**

Para se medir vazão de fluidos são empregadas variadas técnicas de medições. A escolha do medidor dependerá do tipo de fluido, exatidão, faixa de operação, custo, complexidade de instalação e do tempo de vida (BEGA *et al.*, 2011). Apesar dos métodos de medição atuais de vazão cobrirem um amplo espectro de aplicações, há ainda ambientes que necessitam de alternativas de sensoriamento como, por exemplo, áreas classificadas com risco de explosão ou com forte interferência de campos eletromagnéticos.

O processo da medição de grandezas físicas é fundamental, seja na pesquisa ou na linha de produção dentro de uma indústria. Embora os sensores a fibra ótica para medição de vazão possuam vantagens como tamanho reduzido, imunidade a interferência eletromagnética e capacidade de multiplexação, existem fatores importantes a serem observados, tais como: reduzir a sensibilidade cruzada da temperatura (variação na medida da deformação pela variação da temperatura e vice-versa); melhorar a resolução do transdutor; melhorar a estabilidade e a confiabilidade em situações reais de aplicação e desenvolver encapsulamento eficiente de pequenas dimensões.

### 1.2. **Objetivos**

#### 1.2.1. **Objetivo Geral**

Desenvolver um transdutor para monitoração de vazão em ambientes industriais, convertendo deformação mecânica em deslocamento espectral.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir os materiais necessários e realizar a montagem dos dispositivos sensores;
- Calibrar os sensores óticos do transdutor de vazão por meio de ensaios experimentais e realizar os testes para verificar o funcionamento do transdutor e sua viabilidade;
- Processar os dados obtidos e analisar estatisticamente os resultados da calibração.

### 1.3. Estrutura do Trabalho e Metodologia

O Capítulo 1 apresenta a Introdução, motivação e os objetivos da dissertação. O Capítulo 2 fornece uma visão geral dos assuntos relacionados com as áreas de conhecimento envolvidas na pesquisa, tais como escoamento, tipos e técnicas de medição do escoamento e redes de Bragg em fibras óticas.

A construção dos transdutores, materiais e métodos empregados são especificados no Capítulo 3, o qual também trata dos testes realizados para a coleta de dados e a verificação do funcionamento dos sensores, com a calibração dos dispositivos. A modelagem matemática da parte ótica do sensor é também abordada neste capítulo.

O Capítulo 4 apresenta a análise, as discussões e as conclusões acerca dos resultados obtidos. Neste capítulo também são expostas as propostas de trabalhos futuros.

Por fim, nos apêndices o leitor pode obter informações adicionais, tais como, desenvolvimento do equacionamento para o modelo matemático da sonda, desenhos das peças, cálculos das incertezas de medição utilizadas no desenvolvimento da pesquisa, sinais obtidos no escoamento bifásico e publicação em congresso gerada a partir deste trabalho.

## 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica e técnicas de medição de escoamento, e na sequência é apresentada a revisão dos principais trabalhos de medidores de vazão a fibra ótica.

Os termos sensores e transdutores são definidos por autores de forma diferente. Balbinot e Brusamarello (2013) citam que uma definição aceitável é a do VIM (Vocabulário Internacional de termos gerais e fundamentais de Metrologia). “O transdutor de medida é um dispositivo utilizado em medições que fornece uma grandeza de saída que tem uma correlação com a grandeza de entrada. Já o sensor é um elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida” (VIM, 2012).

### 2.1. Conceito de Vazão

A definição de vazão é dada como o volume de um fluido, seja líquido, gás ou vapor que passa pela seção transversal de uma tubulação durante um intervalo de tempo. Conforme Delmée (2003), a quantidade do fluido pode ser medida em volume, sendo vazão volumétrica ( $Q_v$ ) expressa em  $m^3/h$ , ou em massa sendo vazão mássica ( $Q_m$ ) expressa em  $kg/h$ .

### 2.2. Escoamento Multifásico

Nesta Seção é apresentada uma breve introdução de escoamentos multifásicos, principalmente escoamento bifásico.

Escoamentos multifásicos consistem na passagem simultânea em um sistema de um escoamento composto de duas ou mais fases (FALCONE *et al.*, 2009). As fases presentes no escoamento multifásico são compostas por sólidos (partículas relativamente pequenas), líquidos ou gases. Os escoamentos multifásicos mais comuns são escoamentos de duas fases (ou bifásicos).

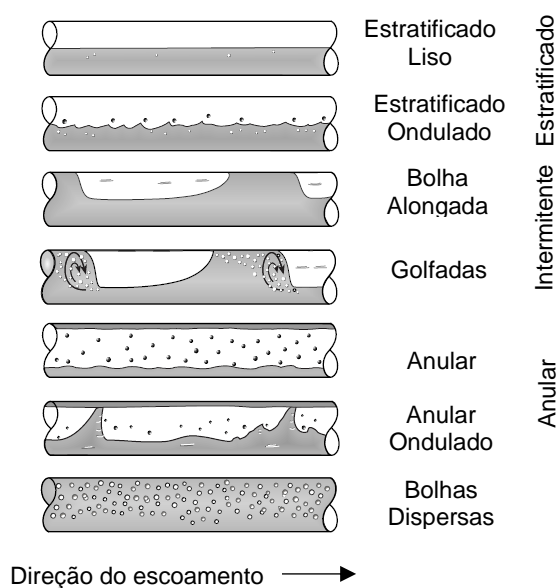
Escoamentos bifásicos são encontrados em diversos setores da indústria como, por exemplo, em operações de exploração e produção de petróleo e gás, usinas nucleares e reatores químicos. Segundo Falcone *et al.* (2009), os escoamentos multifásicos do tipo gás-líquido, bastante comuns, são provavelmente a mais

importante forma de escoamento multifásico. Medir e monitorar os parâmetros do escoamento bifásico relaciona-se diretamente com questões de eficiência e segurança das instalações e processos.

Os escoamentos podem ser classificados em horizontal, vertical ou inclinado, conforme a posição da tubulação, e neste critério, a principal diferença se relaciona com o efeito da gravidade sobre os fluidos ou misturas que se deslocam pela tubulação. Como os transdutores desenvolvidos nesta pesquisa estão instalados na tubulação horizontal da planta, o escoamento caracteriza-se horizontal. Este tipo de escoamento tende a ser assimétrico, a ação da gravidade atua na direção normal ao escoamento de tal forma que fluidos mais densos tendem a se concentrar no fundo da tubulação, enquanto que os menos densos, tendem a se posicionar na parte superior da tubulação.

Conforme Shoham (2005), os principais padrões de escoamento horizontal são o estratificado, intermitente, anular e bolhas dispersas (Figura 2-1).

Figura 2-1: Padrões de escoamento horizontal e próximo do horizontal



Fonte: Adaptado de Shoham (2005)

O padrão estratificado liso e ondulado ocorre quando as vazões de líquido e gás são baixas. Nos padrões em golfadas e bolha alongada as vazões de líquido e gás são moderadas. O padrão anular ocorre para altas vazões de gás e baixas de líquido. Nos padrões bolhas e bolhas dispersas, ocorrem altas vazões de líquido e baixas de gás (SHOHAM, 2005).

### 2.3. Classificação dos medidores de vazão

Os medidores de vazão estão entre as principais ferramentas que contribuem para qualidade e otimização de diversos processos industriais. Delmeé (2003), classifica-os em quatro grupos, segundo o princípio de medição conforme apresentado no Quadro 1 (DELMÉE, 2003).

Quadro 1: Classificação de princípios de medição de vazão

Medidores de vazão							
Geradores de $\Delta P$		Medidores Lineares		Volumétricos		Em canais abertos	
Placa	T	Área variável	$\Lambda$	Diafragma	G	Calhas	L
Bocal	T	Coriolis	$\Lambda$	Disco de natação	L	Vertedores	L
Venturi	T	Eletromagnético	LC	Palheta	L		
		Térmico	$\Lambda$	Pistões recíprocos	L		
<b>Inserção</b>		Turbina	$\Lambda$	Pistões oscilantes	L		
Pitot	T	Ultra-sônico	T				
Pitot de media	T	Vórtice	T				
				<b>Rotor</b>			
<b>Especiais</b>		<b>Especiais</b>		Lóbulo	G		
Centrífugos	$\Lambda$	Força	F	Engrenagem	L		
Laminares	G	Correlação	E	Semi-imerso	G		
Jato	$\Lambda$	Laser	G				
<p>Os princípios de medição do quadro são compatíveis com:  T, líquidos, gases e vapor;  G, medição de gases, exclusivamente;  L, medição de líquidos, exclusivamente;  LC, medição de líquidos condutores de eletricidade, exclusivamente;  <math>\Lambda</math>, indica que não é usado para vapores, salvo exceção;  E, líquidos com sólidos em suspensão.</p>							

Fonte: Adaptado de Delmeé (2003).

As características da instalação, como diâmetro da tubulação, pressão, temperatura, viscosidade e teor de impureza definem qual princípio de medição utilizar. Além de que a escolha dos medidores deve considerar a perda de carga que o elemento introduz na tubulação, os trechos instaláveis disponíveis, os custos de implantação e os custos de manutenção (DELMÉE, 2003). Existem ainda indústrias como a de produção de petróleo na qual um dos requisitos básicos da instrumentação é que sejam intrinsecamente seguros para não gerar explosões.

## 2.4. Instrumentos Industriais em Atmosferas explosivas

Embora o objetivo desta pesquisa não seja o desenvolvimento de um transdutor específico para atmosferas explosivas, é interessante que se faça uma breve introdução a respeito do tema, visto que os sensores a fibra ótica são promissores candidatos para essas aplicações.

De acordo com Cohn (2011), locais onde possa existir a mistura acima do limite inferior de explosão de substâncias inflamáveis com o oxigênio do ar, são considerados áreas classificadas. Portanto há a necessidade de que os equipamentos elétricos, eletrônicos, digitais, de automação, possuam características especiais de proteção.

Para que uma reação química de combustão seja iniciada é necessário que exista a ocorrência simultânea das três partes integrantes desta reação: o combustível, o oxidante e a fonte de ignição (COHN, 2011).

Entre as fontes comuns de ignição, pode-se citar as centelhas provocadas por comutação de contatos elétricos, fugas de corrente devido a falhas de isolamento elétrico, curtos-circuitos e as descargas decorrentes do acúmulo de cargas eletrostáticas. Na Figura 2-2 são apresentadas as condições para ocorrência de explosão.

Figura 2-2: Triângulo de explosão com as três partes integrantes para uma possível reação: combustível, oxidante e a fonte de ignição



Fonte: Cohn (2011)

Os primeiros instrumentos projetados para utilização em atmosferas explosivas eram do tipo com invólucros à prova de explosão, onde os instrumentos eram

enclausurados em grandes e pesados invólucros metálicos. Logo surgiram equipamentos com tecnologia mais simples, seguras e confiáveis, como as técnicas de encapsulamento, invólucros pressurizados e sistemas óticos.

O desenvolvimento de equipamentos para atmosferas explosivas deve proporcionar maior segurança, desempenho, confiabilidade e qualidade, custo baixo de fabricação, instalação, manutenção e reparos. Com relação a instrumentação e monitoramento de vazão, alvo dessa pesquisa, os sensores a fibra ótica minimizam o risco de explosões já que não utilizam energia elétrica no ponto de medição.

A literatura apresenta diversos estudos em monitoramento de vazão por fibra ótica, entre eles os que utilizam sensores de vazão com redes de Bragg, sendo este o assunto dos próximos itens deste capítulo.

## 2.5. Redes de Bragg em Fibras Óticas

A rede de Bragg em fibra ótica consiste em uma alteração periódica produzida no índice de refração do núcleo da fibra ao longo do seu eixo longitudinal. Foi com a descoberta da fotossensibilidade por Hill e seus colaboradores em 1978 (HILL *et al.*, 1978) que essa nova classe de dispositivos em fibra foi desenvolvida. A descoberta da fotossensibilidade, possibilitou a gravação de um dispositivo fotorefrativo que se comporta como um sensor baseado na modulação do índice de refração do núcleo da fibra ótica e responde a perturbações térmicas e mecânicas (HILL *et al.*, 1978).

Na experiência de Hill *et al.* (1978), a luz de um laser de Argônio foi acoplada em uma fibra de sílica dopada com germânio. Devido à reflexão de Fresnel, na extremidade oposta a entrada do laser na fibra, houve a formação de um feixe contra propagante que interferiu com o feixe incidente, formando uma onda luminosa estacionária no interior do núcleo. Verificou-se ainda que nos pontos de máxima intensidade havia a alteração permanente e periódica do índice de refração do núcleo da fibra. A esta propriedade, que algumas fibras apresentam após a exposição à radiação ultravioleta, deu-se o nome de fotossensibilidade. A rede periódica gravada em função da onda estacionária chama-se rede de Bragg (HILL *et al.*, 1978).

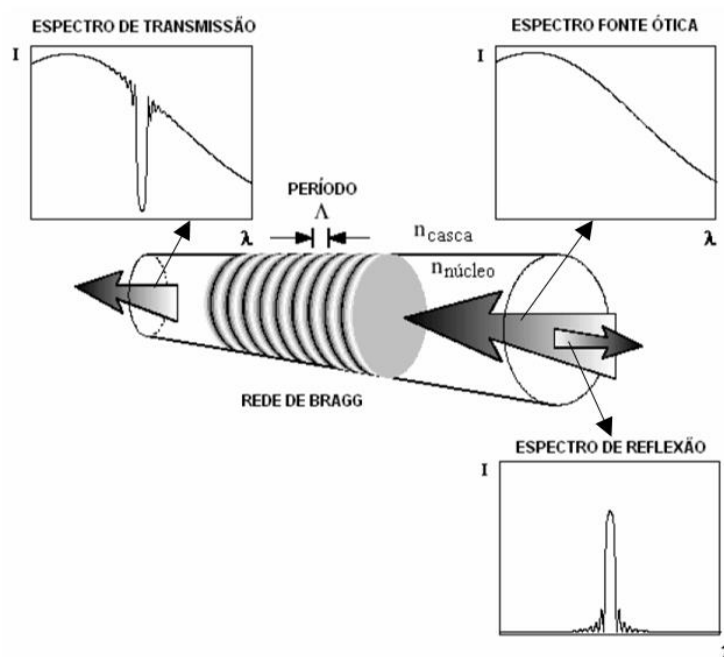
Assim, a FBG é uma estrutura periódica gravada em uma fibra ótica que induz uma banda proibida em torno do comprimento de onda de Bragg, impedindo a propagação dessas frequências, funcionando como um refletor seletivo. Em termos

funcionais considerando o sinal em transmissão, as redes de Bragg têm comportamento semelhante ao filtro eletrônico rejeita faixa (OTHONOS, 1997).

A luz guiada pelo núcleo da fibra ótica será refletida por cada plano da rede. Se a condição de Bragg for satisfeita, há contribuição construtiva da luz refletida por cada plano da rede na direção contra propagante em um determinado comprimento de onda, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede. Quando a condição de Bragg não é satisfeita, a luz refletida em cada plano torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente a intensidade de luz refletida é cancelada (OTHONOS; KALLI, 1999).

A Figura 2-3 apresenta os espectros da fonte ótica de banda larga, transmitido e refletido pela FBG.

Figura 2-3: Representação da rede de Bragg e seus espectros



Fonte: Adaptado de Othonos e Kalli (1999)

O comprimento de onda que caracteriza o espectro refletido é chamado de comprimento de onda de Bragg  $\lambda_B$  e é dado pela Equação (2.1) (HILL; METZ, 1997)

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda, \quad (2.1)$$

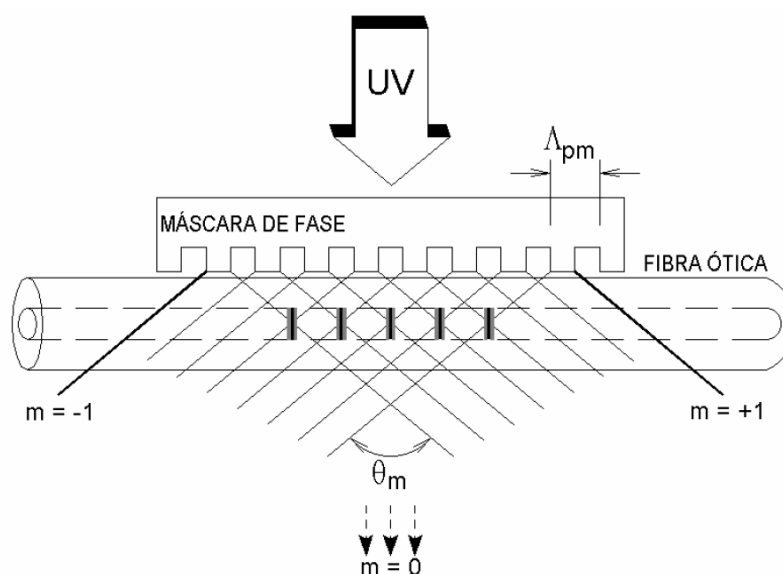
onde  $\Lambda$  é o período da rede e  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra.



Gravar redes de Bragg em fibras óticas é uma tarefa delicada, que necessita alta precisão e estabilidade do sistema de gravação (DA SILVA, 2005). A Figura 2-4 apresenta o processo de gravação das FBG por máscara de fase<sup>1</sup>, que foi realizado para gravação das FBG utilizadas neste trabalho. A fibra é posicionada diretamente atrás da máscara de fase, reduzindo a sensibilidade à vibrações mecânicas. A desvantagem desse método é que não permite a gravação de diferentes comprimentos de onda utilizando uma mesma máscara de fase. Para cada comprimento de ressonância de Bragg desejado se faz necessário a máscara de fase correspondente.

Como mostrado na Figura 2-4, a luz ultravioleta, ao atravessar a máscara de fase, é difratada pelas suas depressões periódicas.

Figura 2-4: Máscara de fase com a representação do feixe UV incidente e as ordens 0 e  $\pm 1$



Fonte: Adaptado de Kashyap (1999).

O princípio de operação é baseado na difração de feixe incidente em várias ordens,  $m = 0, \pm 1, \pm 2$ . Com a radiação UV em incidência normal à máscara de fase, ou seja,  $\theta_i = 0$ , a radiação difratada é dividida nas ordens  $m = 0$  e  $\pm 1$ . Um padrão de interferência pode ser criado na fibra pela superposição dos feixes de ordens  $\pm 1$ . O período da rede  $\Lambda$  está relacionando ao ângulo de difração,  $\theta_m/2$  (KASHYAP, 1999).

<sup>1</sup> A máscara de fase é um elemento ótico difrator, que consiste em depressões longitudinais na superfície de substrato de sílica (KASHYAP, 1999).

### 2.5.1. Sensibilidade das redes de Bragg à temperatura e deformação

Qualquer perturbação que altere o índice de refração efetivo do modo propagado ou o período de modulação da FBG altera o comprimento de onda de Bragg (OTHONOS, 1997). O índice de refração efetivo bem como o período podem ser afetados por perturbações externas, de natureza mecânicas e de natureza térmica.

As mudanças no comprimento de onda de Bragg, em virtude das perturbações de temperatura e deformação mecânica, podem ser determinadas utilizando a Equação (2.2) (OTHONOS E KALLI, 1999):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{dn_{eff}}{dl} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dl} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dT} \right) \Delta T, \quad (2.2)$$

onde  $\Delta\lambda_B$  é a variação causada no comprimento de onda de Bragg pelas perturbações mecânicas ou térmicas,  $l$  é o comprimento da rede e  $T$  a temperatura. O primeiro termo da soma representa o efeito da deformação na fibra ótica e o segundo, representa o efeito da temperatura que a rede está submetida.

### 2.6. Métodos Óticos Aplicados ao Monitoramento de Vazão

Embora existam diversos estudos em monitoramento de vazão por fibra ótica, ainda há necessidade em desenvolver novas técnicas de monitoramento, utilizando meios eficientes e confiáveis de encapsular a fibra sem que o contato com o fluido a danifique.

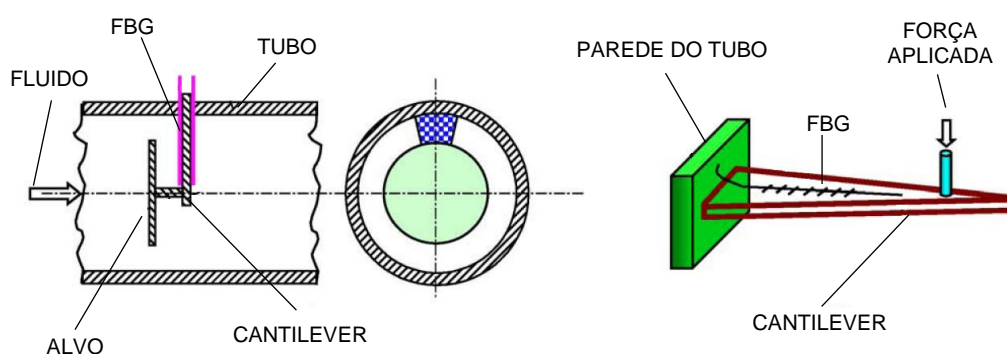
Sensores a fibra ótica para monitoramento de vazão vem sendo estudados nos últimos quarenta anos. Lyle e Pitt (1981) propuseram um modelo de sensor utilizando uma fibra que atravessa perpendicularmente um tubo com diâmetro de 25 mm. A fibra ótica atua como um obstáculo na direção normal ao escoamento. Em velocidades baixas, as linhas fluidas acompanham o formato do objeto. Ao aumentar a velocidade, as linhas não seguem mais a forma do obstáculo, afastando-se de seu contorno. Esta separação gera com o aumento da velocidade, zonas de baixa pressão e a ruptura da camada limite. Como consequência surgem os vórtices. Este fenômeno é chamado de vórtices de Von Karman. A frequência dos vórtices gerados é diretamente

proporcional à velocidade do fluido em escoamento, então é possível mensurar a vazão através da modulação de luz na fibra. Os autores relatam que o desempenho do medidor foi similar aos medidores de escoamento da época, sendo que o dispositivo poderia ser usado para uma ampla gama de líquidos e gases. Por não ter peças móveis e ser pequeno, aumentava a confiabilidade e diminuía a obstrução ao escoamento.

Hu e Huang (2009) demonstraram uma fibra com macro curvatura tendo dois pontos fixos na tubulação e um ponto livre fechando o anel. Quando um líquido flui através da área de flexão do sensor de fibra, resulta na variação da curvatura de flexão devido ao impacto do fluido, que é relativo à velocidade do escoamento. A maior sensibilidade obtida encontra-se quando o raio da curvatura é de 8 mm e dimensões do bloco de 11 x 11 mm<sup>2</sup>.

Zhao *et al.* (2005) utilizaram FBG para monitorar o escoamento de líquido em tubulações. Duas FBGs são coladas em ambos os lados do *cantilever* semelhante a um triângulo isósceles, o *cantilever* foi engastado na parede do tubo, perpendicular ao eixo do escoamento. Na extremidade livre do triângulo, é fixado um disco tipo alvo Figura 2-5. A força criada pelo fluido no disco resulta na deformação do *cantilever*. Enquanto uma FBG é tracionada a outra é comprimida. Ao monitorar a diferença de mudança de comprimento de onda das duas FBGs, a velocidade do fluido pode ser obtida.

Figura 2-5: Estrutura do medidor de vazão utilizando *cantilever*, no qual se demonstra o local das diferentes forças e taxas de escoamento aplicadas



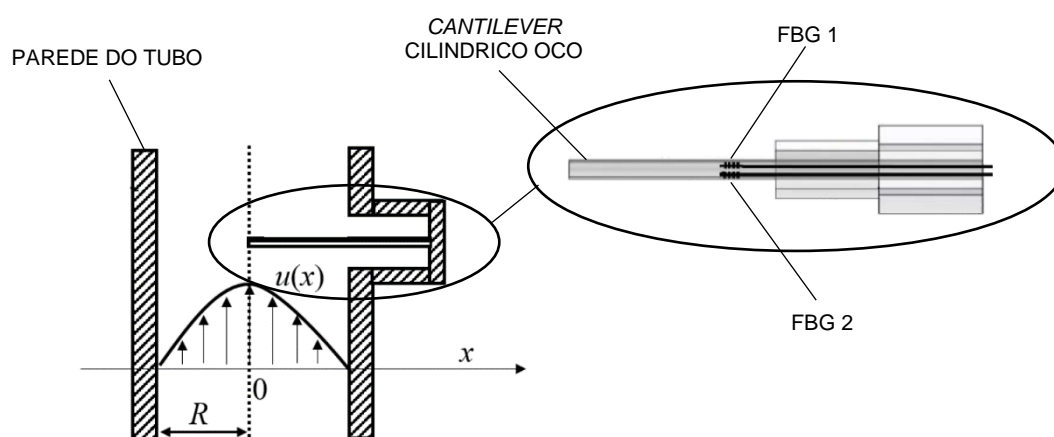
Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2005)

Os autores concluem que os resultados experimentais indicaram que o sensor poderia ser usado para medir o escoamento de fluido de 0 a 1000 cm<sup>3</sup>/s e o problema

de sensibilidade cruzada dos sensores FBG é efetivamente resolvido pelo método diferencial. Também é possível aumentar a sensibilidade e faixa de medição, alterando o material e as dimensões da estrutura. O triângulo isósceles projetado melhora a qualidade do espectro, devido a FBG ser fixada no dispositivo mecânico o esforço que sofre é diferente em cada região da fibra. Essa diferença de esforço cria um efeito de gorgeio na FBG, resultando na melhoria da resolução de medição.

Baseado também no método diferencial, um medidor tipo sonda foi proposto para medição de vazão por Zhao *et al.* (2017). Um par de FBGs é preso na parede interna de um tubo cilíndrico de aço com diâmetro interno de 0,6 mm, então é engastado perpendicularmente no interior da tubulação, respeitando a condição de maior deformação quanto ao ponto de engaste (Figura 2-6). As FBGs são posicionadas na direção do escoamento, enquanto uma traciona outra comprime, medindo a deformação do *cantilever*. A vazão pode ser obtida monitorando a diferença dos dois comprimentos de onda de Bragg. O problema da sensibilidade cruzada dos sensores FBG é resolvido pelo método de medição diferencial dos comprimentos de onda. A relação entre a diferença de mudança de comprimento de onda de Bragg e a vazão foi estabelecida por análise teórica.

Figura 2-6: Estrutura do medidor de vazão com *cantilever*, baseado no monitoramento dos comprimentos de ondas de FBGs com compensação de temperatura



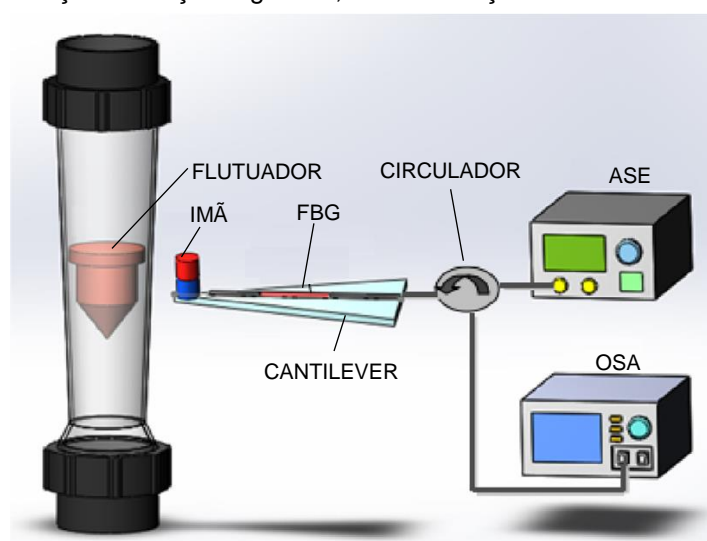
Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2017)

A simulação e os resultados dos testes mostraram um intervalo de medição de 0 a 22,5 m<sup>3</sup>/h. Em comparação com as referências existentes o medidor de vazão

proposto é mais compacto com boa sensibilidade, ampla faixa de medição, fácil fabricação e baixa perda de pressão.

Wang *et al.* (2014) propõem um sensor de escoamento de gás. Um tubo cônico é montado verticalmente na tubulação, dentro um flutuador move-se para cima e para baixo sob o efeito do escoamento de gás. O deslocamento longitudinal do flutuador é convertido na deformação do *cantilever* sob a ação de força magnética, resultando na mudança do comprimento de onda da FBG.

Figura 2-7: Medidor de escoamento de gás, no qual o deslocamento do flutuador é convertido sob ação de força magnética, na deformação do *cantilever*



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2014)

Os resultados experimentais demonstraram que o sensor possui características como boa linearidade e tempo de resposta rápido. O sensor proposto pôde determinar o escoamento de ar na faixa de 1 m<sup>3</sup>/h a 6,5 m<sup>3</sup>/h.

Liu *et al.* (2017) propuseram um medidor de vazão em miniatura com base em uma FBG no centro de quatro fibras dopadas com Co<sup>2+</sup>. As fibras dopadas são bombeadas a laser, aquecendo assim a FBG central. Quando em contato com o escoamento de fluido, o conjunto do encapsulamento diminui a temperatura, afetando diretamente a FBG sensora.

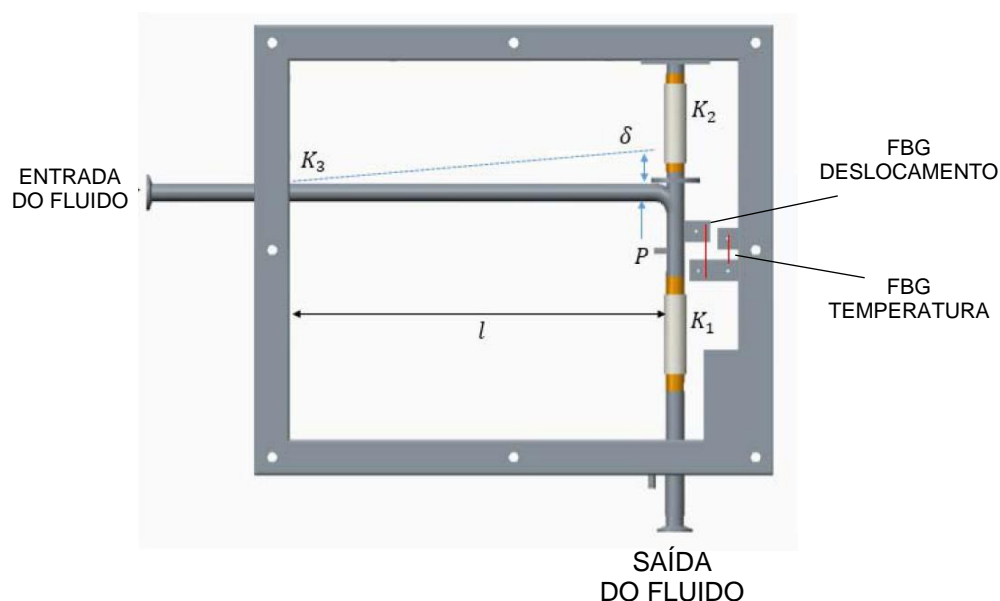
As vazões de água e óleo foram medidas e os resultados experimentais mostraram que a sensibilidade do sensor de vazão depende da capacidade calorífica dos fluidos, onde o fluido com maior capacidade de calor tem maior sensibilidade e menor limite de detecção. O maior poder de bombeamento do laser resulta em maior

diferença de temperatura inicial entre o sensor e os fluidos e, eventualmente, influencia a sensibilidade.

Outros sensores utilizando o efeito da temperatura na FBG são propostos. As mudanças no arranjo experimental incluem, por exemplo, sensores de referências encapsulados e sem influência da temperatura (GAO *et al.*, 2011) ou a fusão de uma pequena fibra sem núcleo antes da FBG para acoplar a luz na casca e aquecer o elemento sensor (WANG *et al.*, 2013). Além disso fibras com núcleo deslocado e FBGs revestidas com filme de prata (CHENG *et al.*, 2015) também possibilitam a aplicação como anemômetro, podendo assim mensurar vazões de líquidos e gases.

Medidores acoplados externamente na tubulação também são propostos. Kirwan *et al.* (2016) demonstram um dispositivo de medição de escoamento baseado em deflexões causadas pelo efeito de impulso do fluido em torno de uma curva na tubulação. O movimento entre a tubulação e a estrutura estática é medido usando uma FBG. A estrutura do medidor pode ser observada na Figura 2-8.

Figura 2-8: Esquema do medidor de escoamento por deflexão causada pelo efeito de impulso do fluido

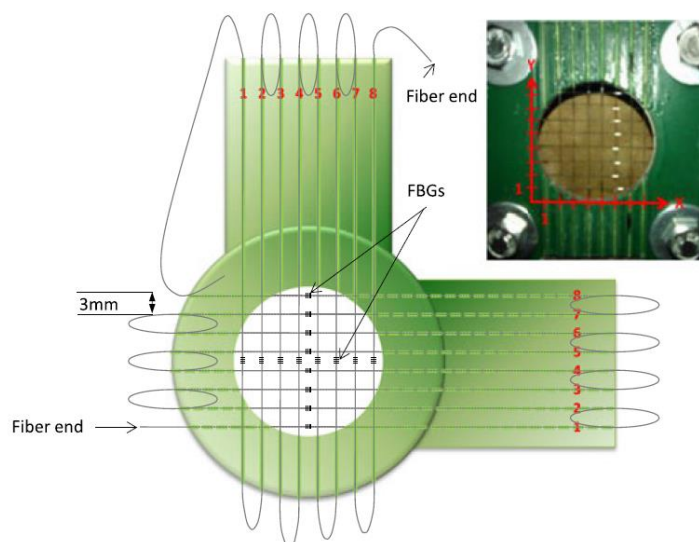


Fonte: Adaptado de Kirwan *et al.* (2016)

A resposta medida pela FBG mostrou-se correlacionada com a vazão do fluido no sistema. O efeito de temperatura foi compensado usando uma segunda FBG de referência. Os efeitos da pressão estática foram compensados com a adição de um fole absorvedor. Demonstrou-se que o sensor pôde efetivamente medir a vazão independentemente da pressão estática e das variações de temperatura.

Algumas aplicações exigem a caracterização de escoamento multifásico. Zamarreno *et al.* (2015) propuseram um sensor para caracterizar escoamento monofásico e multifásico de misturas de água e ar/água, por meio da utilização de redes FBGs. As FBGs atuam como transdutores entre a força aplicada na superfície da fibra óptica pelo escoamento. Foi estabelecida uma relação entre o comprimento da onda de Bragg e a velocidade de escoamento monofásico. Quando utilizado em escoamento multifásicos, um deslocamento repentino de comprimento de onda de Bragg representa uma mudança abrupta na força aplicada na fibra, o que significa uma transição entre líquido e gás dentro do tubo. O sensor proposto consiste em oito FBGs na horizontal e oito FBGs na vertical, formando uma grade com um total de 64 cruzamentos, conforme a Figura 2-9. O sensor foi comparado ao sistema convencional *wire-mesh* (PRASSER *et al.*, 1998) e mostrou-se satisfatório, podendo distinguir diferentes fases.

Figura 2-9: Representação esquemática da disposição da grade de 8 x 8 FBG similar ao *wire-mesh*, utilizado para caracterizar escoamento multifásico



Fonte: Zamarreno *et al.* (2015)

Apesar das vantagens da aplicação de sensores a fibra óptica, algumas desvantagens devem ser superadas, tais como: fragilidade mecânica, na maioria das aplicações há necessidade do contato direto com o mensurando e em alguns casos os equipamentos de medição são de valor elevado.

Diante dos trabalhos descritos, percebe-se que diferentes sensores são propostos, cada um com sua limitação, e, quando comparados aos convencionais,

resultam na maioria das vezes sensibilidade semelhante. Os sensores a fibra ótica possibilitam resolver problemas em aplicações complexas, entretanto a fragilidade da fibra ótica nua é um problema que carece de pesquisas e desenvolvimento de proteção mecânica adicional que os tornem mais robustos e reduzam o risco de rompimento da fibra.



### 3. Materiais e Métodos

Uma das vantagens em utilizar fibra ótica aplicada à monitoração de vazão está no impacto que a fibra causa no mensurando ou fenômeno que está sendo medido ser reduzido devido às suas pequenas dimensões (BARONCINI *et al.*, 2015). Porém, tem-se a desvantagem de na maioria das vezes há necessidade do contato com a grandeza física medida, sendo que as fibras óticas são frágeis. Portanto é importante o desenvolvimento de transdutores robustos.

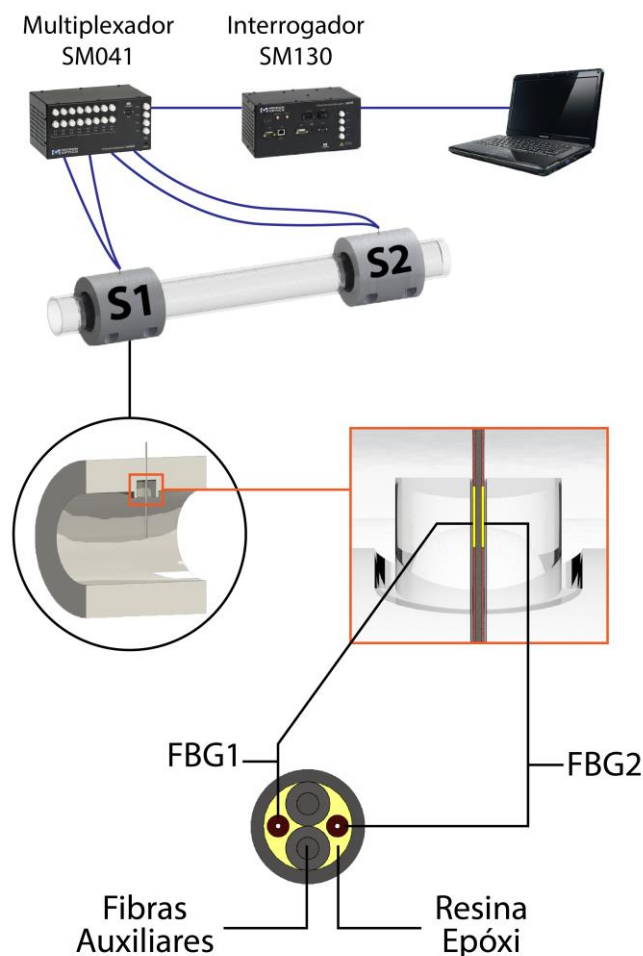
A metodologia proposta neste trabalho é o encapsulamento das fibras óticas em pequenos tubos de aço inoxidável, para tanto é utilizada uma peça tipo abraçadeira para facilitar o posicionamento do tubo metálico na tubulação, além disso são utilizadas fibras óticas auxiliares para garantir o posicionamento interno das FBGs. No entanto tal solução acarreta em modificações na sensibilidade dos sensores FBGs e na necessidade de caracterizar e calibrar os transdutores desenvolvidos.

#### 3.1. Processo de Montagem do Transdutor

O diagrama esquemático da estrutura do medidor de vazão proposto nesta Dissertação, é mostrado na Figura 3-1. Cada medidor (S1, S2) possui uma carcaça tipo abraçadeira (desenho técnico da peça está detalhado no APÊNDICE D – ABRAÇADEIRA), um tubo metálico em aço inoxidável com quatro fibras óticas no interior, duas atuando como estrutura auxiliar de posicionamento e as outras duas com FBGs. A extremidade livre do tubo de aço está posicionada no centro da tubulação e a outra extremidade é fixada na carcaça tipo abraçadeira que está instalada na parte superior da tubulação, o que facilita a realização dos ensaios estáticos, pois a sonda fica mais acessível se comparado com a opção utilizada por Zhao *et al.* (2017).

As fibras óticas utilizadas no desenvolvimento da sonda são da Nufern®, GF1, operando com comprimento de onda de 1500 a 1600 nm, diâmetro da casca  $125 \pm 1,5 \mu\text{m}$  e diâmetro com revestimento (acrilato) de  $250 \pm 20 \mu\text{m}$ . Para gravação das FBGs foi utilizado o processo de gravação por máscara de fase, Laser exímero ArF, modelo Xantos XS 500 (193 nm), marca COHERENT®, potência de 25 W, operando com pulsos de duração de 5 ns, taxa de repetição entre 250 e 300 Hz e energia por pulso entre 3 a 4,5 mJ/pulso.

Figura 3-1: Estrutura do medidor de vazão baseado no monitoramento dos comprimentos de ondas de FBGs com compensação de temperatura

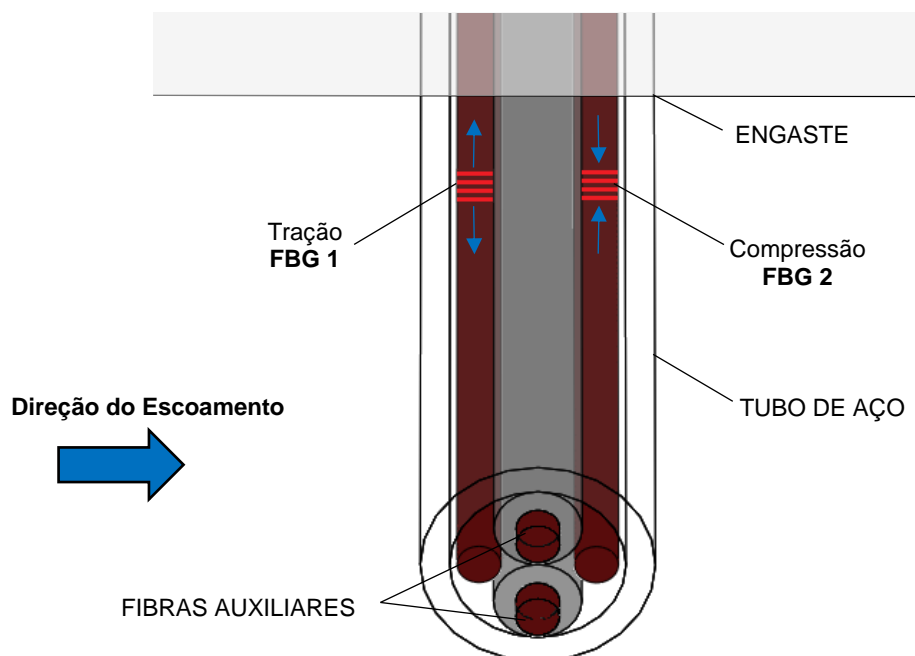


Fonte: Elaborada pelo autor

O *cantilever* é posicionado perpendicularmente ao eixo da tubulação e as duas FBGs estão fixas simetricamente ao longo da parede interna do tubo metálico. Para garantir o posicionamento é inserido no interior do tubo metálico o par de fibras auxiliares, Figura 3-2. As fibras são tracionadas até que as FBGs estejam posicionadas próximo ao engaste devido ser a região de maior deformação. O procedimento consiste em inserir as duas fibras auxiliares sem a resina, então marca-se o ponto onde as FBGs foram gravadas e o ponto de engaste no tubo metálico, logo insere-se as FO com FBGs atravessando totalmente o tubo metálico, após a aplicação da mistura da resina epóxi com o catalizador, as fibras ópticas são puxadas até que as FBGs estivessem próxima ao engaste. Após a cura da resina, inicia-se a colagem da sonda na abraçadeira. Uma massa é utilizada na extremidade livre da sonda e a diferença dos comprimentos de onda é monitorada enquanto é aplicado o movimento

de rotação na sonda, a fim de posicionar as FBGs e garantir a melhor sensibilidade do transdutor.

Figura 3-2: Vista lateral da sonda com detalhe da posição das fibras auxiliares e FBGs de tração e compressão próxima ao engaste



Fonte: Elaborada pelo autor

Aliado a montagem do transdutor são realizados os modelos matemáticos da parte ótica da sonda, bem como os cálculos das incertezas provenientes das medições.

### 3.2. Modelos Matemáticos da Parte Ótica da Sonda

Nesta seção são apresentados os modelos matemáticos que possibilitam simular os cenários estudados neste trabalho. Os parâmetros considerados são: módulo de elasticidade do tubo de aço  $E = 206 \cdot 10^6$  MPa; coeficiente fotoelástico da fibra ótica  $p_e = 0,22$ ; comprimento de onda de Bragg FBG1  $\lambda_{B1} = 1527$  nm; comprimento de onda de Bragg FBG2  $\lambda_{B2} = 1532$  nm; comprimento de onda de Bragg  $\lambda_B = 1529$  nm e fator de concentrações de tensões que está relacionado ao *cantilever*  $k = 0,106821$ .

### 3.2.1. Modelo matemático relacionado à aplicação de diferentes forças

De acordo com a mecânica dos materiais (BEER *et al.*, 2011), o momento fletor de uma viga engastada com seção transversal uniforme, suportando uma força  $F$  na sua extremidade livre, é igual a:

$$M = -Fl, \quad (3.1)$$

onde  $l$  é a distância da extremidade livre até o engaste,  $R_a$  o raio externo do tubo metálico, e  $r$  o raio interno. O momento de inércia  $J_s$  pode ser descrito como:

$$J_s = \frac{\pi(R_a^4 - r^4)}{4}. \quad (3.2)$$

A lei de Hooke estabelece que um aumento na tensão  $\sigma$  em um material com determinado módulo de elasticidade  $E$ , provoca um aumento proporcional na deformação específica  $\varepsilon$ , (BEER *et al.*, 2011) :

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (3.3)$$

relacionando deformação com momento fletor e inércia tem-se:

$$\varepsilon = \frac{M y}{E J_s}, \quad (3.4)$$

onde  $M$  é o momento fletor,  $E$  é o módulo de Young ou módulo de elasticidade,  $J_s$  o momento de inércia e  $y$  é a distância da linha neutra até a superfície externa. Portanto a deformação em  $l$ , para diferentes forças, pode ser expressa por:

$$\varepsilon = \frac{F l R_a}{E J_s}. \quad (3.5)$$

A relação entre a mudança de comprimento de onda com deformação e temperatura pode ser expressa como (OTHONOS; KALLI, 1999):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (a + \xi)\Delta T, \quad (3.6)$$

onde  $p_e$  é o coeficiente fotoelástico da fibra,  $\lambda_B$  comprimento de onda de Bragg,  $a$  é o coeficiente de expansão térmica da fibra e  $\xi$  é o coeficiente termo ótico da fibra. Como as duas FBGs estão próximas uma da outra, o efeito causado pela temperatura é considerado idêntico. Porém, os efeitos causados pela deformação estão em direções opostas. Portanto a diferença entre os dois comprimentos de onda de Bragg deslocados pode ser escrito como:

$$\Delta\lambda_B = 2 \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon. \quad (3.7)$$

### 3.2.2. Modelo matemático relacionado à aplicação de diferentes vazões

Quando o fluido está totalmente desenvolvido, o escoamento laminar  $u(x)$  em um local aleatório da tubulação pode ser descrito como (ZHAO *et al.*, 2017):

$$u(x) = 2 V_{avg} \left[ 1 - \left( \frac{x}{R} \right)^2 \right], \quad (3.8)$$

onde  $x$  é a dimensão radial do centro da tubulação,  $V_{avg}$  é a velocidade média do escoamento e  $R$  é o raio da tubulação. De acordo com a lei da conservação de energia, uma parte do fluido que chega até a sonda tem sua energia cinética transformada em um incremento de pressão ( $\Delta P$ ).

$$\Delta P = \frac{1}{2} p u^2 (x), \quad (3.9)$$

onde  $p$  é a densidade do fluido. Logo, a força sobre a sonda em um lugar aleatório pode ser expressa como:

$$F = \oint \Delta P dS. \quad (3.10)$$

O termo  $dS$  pode ser descrito em termos do diâmetro da sonda ( $D$ ), conforme:

$$dS = D dx. \quad (3.11)$$

Com as substituições necessárias, a força sobre o *cantilever* pode ser dada como:

$$F = \frac{16}{15} p D R V_{avg}^2. \quad (3.12)$$

Como o princípio de funcionamento do sensor com FBG está no desvio do comprimento de onda de Bragg causado pela deformação da fibra ótica, pode-se manusear as equações, a fim de se obter a relação entre vazão e desvio do comprimento de onda:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 2 k (1 - p_e) \left[ \frac{16}{15} p D R V_{avg}^2 \right], \quad (3.13)$$

onde  $k$  é o fator de concentrações de tensões que está relacionado ao *cantilever* e a distância de  $x$  da extremidade livre da sonda e é obtido por meio de simulação computacional.

A vazão volumétrica ( $Q_v$ ) da fase líquida pode ser descrita pela relação entre a área da seção transversal da tubulação ( $A$ ) pela velocidade média ( $V_{avg}$ ), conforme a Equação (3.14):

$$Q_v = A V_{avg}. \quad (3.14)$$

Assim a diferença entre os dois comprimentos de onda de Bragg deslocados pode ser descrita como:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k (1 - p_e) \left[ \frac{32}{15} p D R \left( \frac{Q_v}{A} \right)^2 \right]. \quad (3.15)$$

### 3.3. Cálculo das Incertezas

As incertezas são calculadas e expressas seguindo as orientações do GUM- 2008 (*Guide to the expression of uncertainty in measurement*) (INMETRO, 2012).

As fontes de incertezas consideradas neste trabalho são: dispersão das amostras e a reta de regressão linear (incertezas do tipo A); e resolução do interrogador ótico (incerteza do tipo B) (INMETRO, 2012).

A incerteza do tipo A é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística. Depende de uma sequência de observações sob as mesmas condições de um evento. Enquanto que a avaliação de incerteza do tipo B é realizada por outros meios que não a análise estatística (INMETRO, 2012).

Segundo o INMETRO (2012), na maioria dos casos, a média aritmética é a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza  $q$ , para a qual  $n$  observações foram obtidas nas mesmas condições de medição.

O desvio padrão experimental é calculado conforme a Equação 3.16 (INMETRO, 2012):

$$S(q_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n-1}}, \quad (3.16)$$

onde  $S(q_k)$  representa o desvio padrão da amostra, enquanto que o termo  $q_i$  representa a  $i$ -ésima indicação,  $\bar{q}$  a média das “ $n$ ” indicações e  $n$  o número de medições repetidas efetuadas.

Calcula-se a incerteza da dispersão das amostras ( $u_1$ ) dividindo-se a maior incerteza ( $S_p$ ) pela raiz quadrada do número de medições repetidas ( $n$ ) usadas para calcular a média, representado pela Equação 3.17.

$$u_1 = \frac{S_p}{\sqrt{n}} \quad (3.17)$$

As medições realizadas não são suficientes para estimar o comportamento dos sensores, para tanto se faz necessário ajustar os valores obtidos experimentalmente a uma função matemática de tal forma que para infinitos valores da grandeza

independente ( $x_i$ ) seja possível calcular o valor correspondente da grandeza dependente ( $y_i$ ).

O procedimento de ajuste de reta foi realizado com o auxílio do programa OriginPro®. Esse ajuste de reta foi realizado por meio da técnica de “regressão linear”, ferramenta de análise estatística que permite traçar a reta que, globalmente, mais se aproxima dos pontos medidos. A reta de regressão tem a seguinte forma (CABRAL, 2004) :  $y = a + b \cdot x$ , onde  $y$  é a variável dependente,  $x$  a variável independente,  $a$  a ordenada de origem e  $b$ , o declive da reta, também conhecido como “coeficiente de regressão” e pode ser calculado por meio da Equação 3.18, enquanto que a ordenada de origem  $a$ , por meio da Equação 3.19.

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad (3.18)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (3.19)$$

A Equação 3.20 permite o cálculo da incerteza padrão dos pontos experimentais em relação à reta de regressão linear, sendo que  $S_{yx}$  é o desvio padrão da reta,  $N$  é o número de pares de valores ( $x, y$ ), ou seja, o número de degraus de carregamento,  $S_y$  é o desvio-padrão da grandeza dependente e  $S_x$  é o desvio-padrão da grandeza independente, ambos calculados conforme a Equação (3.16).

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{N-1}{N-2} (S_y^2 - b^2 S_x^2)}. \quad (3.20)$$

A partir da equação (3.21) é possível calcular a incerteza do declive ou coeficiente angular da equação ( $S_b = u_2$ ), definido por:

$$S_b = u_2 = \frac{S_{yx}}{S_x \sqrt{n-1}}. \quad (3.21)$$



E também, a incerteza da ordenada na origem ( $S_a = u_3$ ), que pode ser obtida fazendo o uso da Equação 3.22.

$$S_a = u_3 = \pm \frac{S_{yx}}{\sqrt{n}}. \quad (3.22)$$

A incerteza determinada pela interpolação de um novo valor de  $y$  a partir de  $x$  pode ser calculada por meio da Equação 3.23 (CABRAL, 2004):

$$u_4 = \pm S_{yx} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)S_x^2}}. \quad (3.23)$$

Para o cálculo da incerteza das medidas realizadas pelo interrogador ótico (incerteza do “Tipo B”) utilizou-se a Equação 3.24, na qual  $R$  é a resolução do equipamento dada pelo fabricante. Como foi utilizado o interrogador SM130 da Micron Optics®, com resolução de 1 pm, em todas as medições e sensores, pode-se considerar o valor de  $u_5 = 0,2887$  pm.

$$u_5 = \frac{R}{2\sqrt{3}}. \quad (3.24)$$

A incerteza combinada ( $u_c$ ) é determinada pelo desvio-padrão resultante da ação combinada das componentes aleatórias de todas as fontes de incerteza que afetam um processo de medição. Utiliza-se a Equação 3.25 para calcular seu valor:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2}. \quad (3.25)$$

A incerteza padrão quando calculada baseada em um conjunto de medições repetidas deve ser associada à um número de graus de liberdade com que ela foi estimada. Esse número reflete o grau de segurança com que a estimativa do desvio-padrão é conhecida e corresponde ao número de medições efetuadas menos 1 (ALBERTAZZI G. JR; SOUSA, 2008). Para o cálculo dos graus de liberdade ( $\gamma_i$ ) foi utilizada a Equação 3.26

$$\gamma_i = n - 1. \quad (3.26)$$

O número de graus de liberdade correspondente à incerteza combinada deve ser calculado a partir dos valores do número de graus de liberdade e da incerteza-padrão de cada fonte de incerteza pela equação de Welch-Satterthwaite:

$$\frac{u_c^4}{\gamma_{ef}} = \frac{u_1^4}{\gamma_1} + \frac{u_2^4}{\gamma_2} + \dots + \frac{u_n^4}{\gamma_n}, \quad (3.27)$$

$u_n$  é a incerteza-padrão da  $n$ -ésima fonte de incerteza,  $\gamma_n$  é o número de graus de liberdade da  $n$ -ésima fonte de incerteza. Ao isolar  $\gamma_{ef}$  na Equação (3.27) tem-se a Equação 3.28 que permite o cálculo do grau de liberdade efetivo.

$$\gamma_{ef} = \frac{u_c^4}{\frac{u_1^4}{\gamma_1} + \frac{u_2^4}{\gamma_2} + \dots + \frac{u_n^4}{\gamma_n}}. \quad (3.28)$$

A incerteza expandida, também denominada de incerteza de medição ( $U$ ) é o intervalo dentro do qual para uma probabilidade de 95%, espera-se encontrar a componente aleatória dos erros de um processo de medição (INMETRO, 2012). Para encontrar seu valor, utiliza-se a Equação 3.29, na qual  $t_p$  é o coeficiente da distribuição *t-Student* com nível de confiança  $p$ , obtido por meio da tabela de coeficientes *t-Student*. (CABRAL, 2004).

$$U = t_p u_c. \quad (3.29)$$

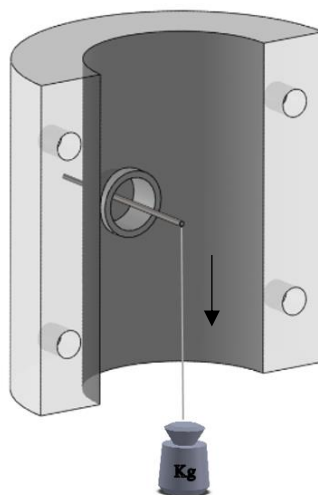
Os resultados dos cálculos da Incerteza Combinada e Expandida, assim como o coeficiente *t-Student* dos ensaios estáticos, temperatura e dinâmicos podem ser visualizados nas Tabela 3-1, Tabela 3-2 e Tabela 3-3. Bem como todos os resultados obtidos em cada etapa podem ser vistos nas tabelas do Apêndice B.

### 3.4. Calibração Estática

Após a montagem das sondas, realizou-se por meio de um arranjo experimental a calibração estática dos dois transdutores. Os diâmetros interno e externo do tubo metálico utilizado como encapsulamento das FBGs foram considerados 0,5 mm e 0,7 mm, respectivamente. O raio da tubulação pela qual a vazão será medida é definido como 14,5 mm e o comprimento da sonda, 35 mm. Conforme simulação realizada por Zhao *et al.* (2017), optou-se por posicionar a sonda a 20 mm do centro da tubulação, ponto em que a deformação no engaste em diferentes condições de força é relativamente homogênea.

O processo de calibração estática foi realizado com dez sequências de medições, iniciando com força de 0,0019 N e finalizando em 0,049 N (Figura 3-3). Quando a força é aplicada próxima à extremidade livre da sonda, a deformação é transferida para as duas FBGs. Por estarem em direções opostas, uma FBG é tracionada e a outra é comprimida.

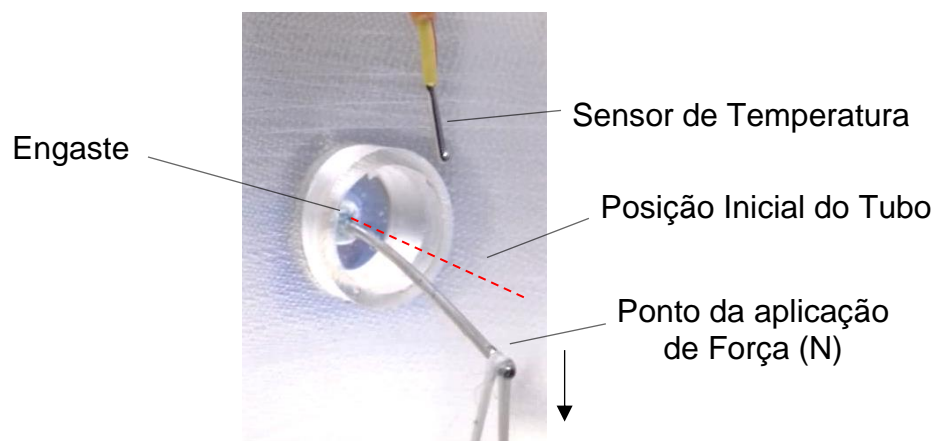
Figura 3-3: Arranjo experimental para os ensaio estáticos com o posicionamento da abraçadeira, do cantilever e a tração de uma das massas



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 3-4 é apresentado o detalhe da deflexão do tubo de aço inoxidável quando aplicada força em sua extremidade.

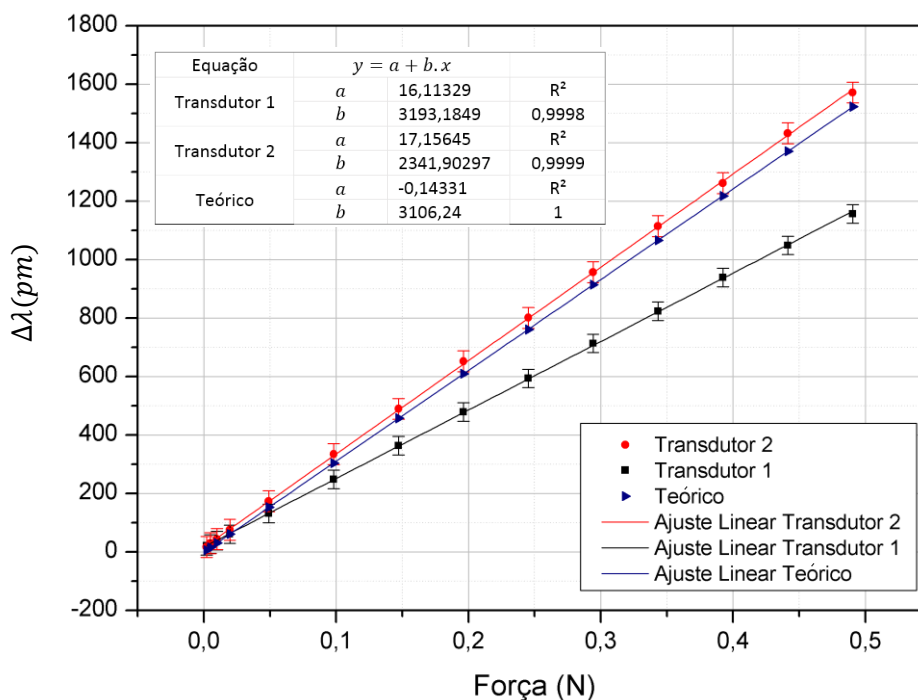
Figura 3-4: Deflexão do tubo de aço inoxidável propiciada pela aplicação de força em sua extremidade livre



Fonte: Elaborada pelo autor

As duas FBGs de cada transdutor foram conectadas ao interrogador ótico e o espectro das redes visualizado e armazenado em um microcomputador. O programa responsável pela aquisição e processamento dos sinais no microcomputador foi o *Enlight da Micron Optics*. Os resultados dos ensaios práticos com as diferentes forças são mostrados na Figura 3-5.

Figura 3-5: Resultado prático dos transdutores da calibração estática



Fonte: Elaborada pelo autor

O eixo das abscissas representa as forças aplicadas com o auxílio das massas, enquanto o eixo das ordenadas representa o deslocamento da diferença entre a FBG1

e FBG2 de cada transdutor. A diferença do deslocamento de comprimento de onda total no transdutor 1 foi de 1156 pm e no transdutor 2, 1571 pm, entre 0,0049 N e 0,049 N de força aplicada.

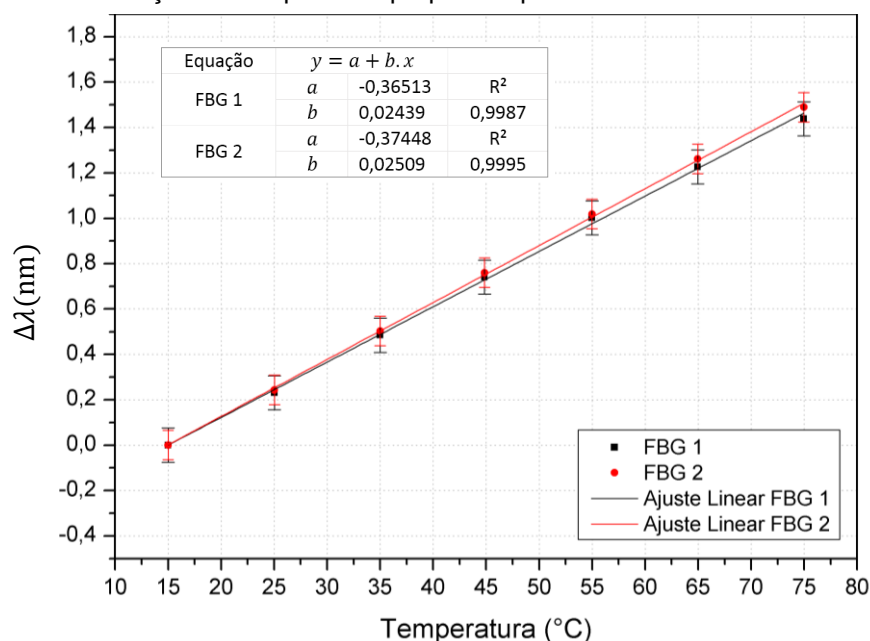
Tabela 3-1 – Sensibilidade e incerteza dos transdutores durante teste de calibração estática

Transdutor 1				
Força (N)	Sensibilidade (nm/N)	$U$ (pm)	$u_c$ (pm)	$t_p$ (95%)
0,0049 a 0,049	2,34	$\pm 31,17$	14,43	2,16
Transdutor 2				
	Sensibilidade (nm/N)	$U$ (pm)	$u_c$ (pm)	$t_p$ (95%)
0,0049 a 0,049	3,19	$\pm 35,4$	16,69	2,12

Fonte: Elaborado pelo autor

Para compensar a sensibilidade à temperatura e à deformação (sensibilidade cruzada), são utilizadas duas FBGs no interior do tubo metálico. Realizou-se ensaio com o Transdutor 1 a fim de verificar o comportamento das FBGs encapsuladas em relação a variação de temperatura. Este ensaio consistiu em submeter o Transdutor 1 à variação de temperatura de 15 a 75 °C em um banho térmico, modelo ECO GOLD 415, marca Lauda, e obter os valores de comprimento de onda de Bragg correspondentes.

Figura 3-6: Variação do comprimento de onda de Bragg das FBGs do Transdutor 1 em função da variação da temperatura propiciada pelo banho térmico



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 3-6 apresenta o resultado do ensaio de temperatura. Observa-se que as duas FBGs possuem sensibilidade semelhantes, o que permite concluir que estão sujeitas às mesmas variações de temperatura.

Tabela 3-2 – Sensibilidade e incerteza das FBGs do transdutor 1 com variação de temperatura

<b>FBG 1</b>					
<b>Temp. (°C)</b>	<i>Sensibilidade (pm/°C)</i>	<i>U (pm)</i>	<i>u<sub>c</sub> (pm)</i>	<i>u<sub>x</sub> (°C)</i>	<i>t<sub>p</sub> (95%)</i>
15 a 75	24,63	± 80	36,4	3,2	2,2
<b>FBG 2</b>					
	<i>Sensibilidade (pm/°C)</i>	<i>U (pm)</i>	<i>u<sub>c</sub> (pm)</i>	<i>u<sub>x</sub> (°C)</i>	<i>t<sub>p</sub> (95%)</i>
15 a 75	25,09	± 57	23,7	2,2	2,4

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5. Calibração Dinâmica

A calibração dinâmica consistiu em realizar cinco ensaios variando a vazão do escoamento de água em uma planta piloto da UTFPR, localizada no NUEM (Núcleo de Escoamento Multifásico). O arranjo experimental é formado por tubos de acrílico transparentes com 34,77 m de comprimento, 26 mm de diâmetro interno, uma bomba centrífuga, um compressor, três vasos de pressão, medidores de vazão de líquido do tipo Coriolis (da marca Yokogawa), que medem também a densidade e a temperatura do líquido localmente, (modelo RCCT34-AH1A01A3SL/BG/K6/FB) mede valores entre 0,1 e 2,5 m<sup>3</sup>/h e o de maior capacidade (modelo RCCT38) mede valores entre 1 e 35 m<sup>3</sup>/h. Medidores de vazão de gás do tipo Coriolis (da marca Yokogawa) que funcionam nas faixas de 0,1 a 8 Nm<sup>3</sup>/h (modelo RCCS30 + RCCF31 + RCCY031) e de 8 a 80 Nm<sup>3</sup>/h (modelo RCCS32 + RCCF31 + RCCY031) e sistema de controle e supervisão desenvolvida em LabVIEW, conforme detalhado por Naidek (2017). A Figura 3-7 exibe uma visão parcial da planta de escoamento com o painel de controle, instrumentos e o computador onde o sistema supervisão da planta é executado.

Figura 3-7: Sistema de controle da planta do NUEM com o supervisório e instrumentação ao fundo



Fonte: Elaborada pelo autor

Os mesmos transdutores utilizados na calibração estática foram instalados na tubulação com espaçamento de um metro, conforme a Figura 3-8.

Figura 3-8: Arranjo experimental para calibração dinâmica



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 3-9 é possível visualizar a sonda com as FBGs no centro da tubulação.

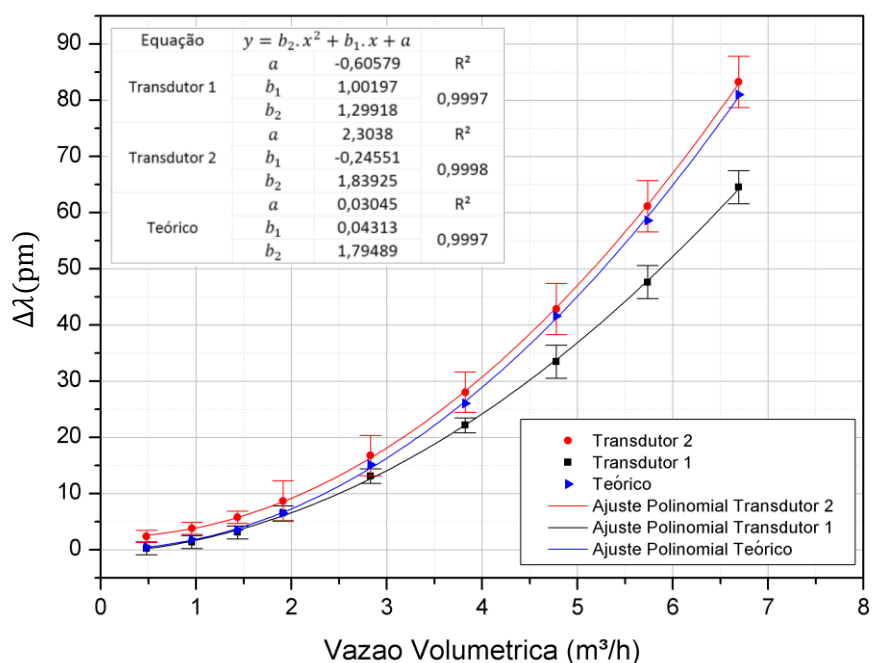
Figura 3-9: Posição da sonda na tubulação



Fonte: Elaborada pelo autor

Na calibração dinâmica, a vazão de líquido foi alterada em oito degraus para valores predefinidos de 0,5 a 6,6 m<sup>3</sup>/h. Os resultados dos ensaios práticos em diferentes taxas de escoamento são mostrados na Figura 3-10. O eixo das abscissas representa as diferentes vazões, enquanto o eixo das ordenadas representa o deslocamento da diferença entre a FBG1 e FBG2 de cada transdutor.

Figura 3-10: Resultado prático dos transdutores da calibração dinâmica



Fonte: Elaborada pelo autor



A diferença do deslocamento de comprimento de onda total do Transdutor 1 foi de 64 pm e no Transdutor 2, 83 pm. Com a vazão variando entre 0,5 a 6,6 m<sup>3</sup>/h.

O Transdutor 2 apresentou maior sensibilidade. Conforme mostra a Tabela 3-3 três faixas de medição foram consideradas para calcular a sensibilidade e incertezas.

Tabela 3-3 – Sensibilidade e incerteza dos transdutores em diferentes faixas de vazão

<b>Transdutor 1</b>				
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>	<i>Sensibilidade</i> ( $pm/\frac{m^3}{h}$ )	<i>U (pm)</i>	<i>u<sub>c</sub> (pm)</i>	<i>t<sub>p</sub> (95%)</i>
0 a 1,43	2,96	± 1,14	0,504	2,262
1,43 a 3,82	7,94	± 1,29	0,622	2,086
3,82 a 6,68	14,78	± 2,94	1,411	2,086
<b>Transdutor 2</b>				
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>	<i>Sensibilidade</i> ( $pm/\frac{m^3}{h}$ )	<i>U (pm)</i>	<i>u<sub>c</sub> (pm)</i>	<i>t<sub>p</sub> (95%)</i>
0 a 1,43	3,6	± 1,08	0,494	2,179
1,43 a 3,82	9,39	± 3,61	1,621	2,228
3,82 a 6,68	19,24	± 4,56	2,188	2,086

Fonte: Elaborado pelo autor

A diferença de sensibilidade entre os transdutores deve-se ao posicionamento incorreto das FBGs, visto que no período de secagem da cola houve uma pequena rotação da sonda do Transdutor 1, fazendo com que os eixos das FBGs não ficassem perpendiculares ao eixo da tubulação, não medindo a maior deformação do tubo de aço.

Após realizados os ensaios em escoamento monofásico viu-se a oportunidade em adquirir a resposta dos transdutores também em escoamento bifásico.

### 3.6. Resultados obtidos em escoamento bifásico utilizando sensores baseados em redes de Bragg em fibras óticas

Embora não sejam mencionados os modelos matemáticos do transdutor para escoamento bifásico, nesta seção é demonstrada a metodologia para apresentação dos dados obtidos quando o transdutor 1 é aplicado ao escoamento gás-líquido.

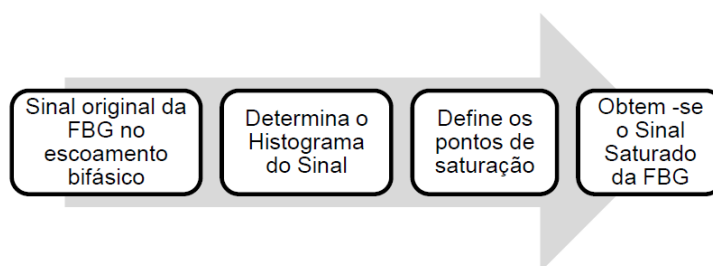
A literatura apresenta alguns trabalhos para monitoração de escoamento bifásico com fibras óticas sem encapsulamento, atravessando perpendicularmente a

tubulação (BARONCINI, 2015). Já o transdutor desenvolvido conta com o encapsulamento das FBGs no tubo de aço, o que garante robustez para instalações industriais possibilitando diferenciar as fases líquida e gasosa, portanto, é importante documentar os sinais obtidos pelo transdutor de vazão tipo *cantilever* desenvolvido.

Baroncini (2015) desenvolveu uma técnica para caracterizar o escoamento bifásico utilizando sensores de deformação baseados em redes de Bragg em fibras óticas. No escoamento bifásico, há uma alteração significativa na força que é aplicada na fibra ótica entre as fases líquida e gasosa. Logo, a deformação da fibra ótica e a correspondente mudança de comprimento de onda de rede de Bragg serão diferentes quando no escoamento houver uma bolha de ar ou um pistão de líquido.

Após a construção dos sensores, Baroncini (2015) desenvolveu uma metodologia para sua calibração utilizando o escoamento monofásico. Posteriormente, por meio de histogramas realizou o processamento e o tratamento dos sinais oriundos do escoamento bifásico. Esta metodologia para tratamento dos sinais do escoamento bifásico também é utilizada para processar os sinais adquiridos com os transdutores de vazão desenvolvidos nesta pesquisa. A Figura 3-11 apresenta o diagrama de blocos do processamento dos sinais até obtenção do sinal saturado da FBG.

Figura 3-11: Diagrama de blocos mostrando as etapas para da saturação do sinal obtido no escoamento bifásico através das redes de Bragg em fibra ótica.

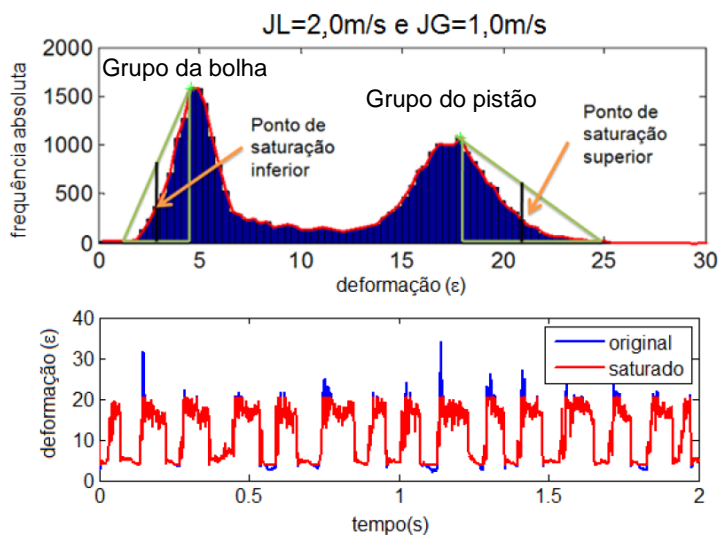


Fonte: Baroncini (2015)

O histograma fornece uma ideia da amostra e quando apresenta uma distribuição bimodal, fica caracterizado um escoamento bifásico. Assim, quando houver gás e líquido este histograma deve apresentar uma distribuição baixa no centro com a existência de um pico a esquerda e outro a direita, conforme Figura 3-12. Nesta figura também estão definidos os pontos de saturação superior e inferior e é apresentada a série temporal do sinal original e do sinal saturado, mostrando os picos

que foram eliminados com procedimento de saturação. Este procedimento e outros são necessários para facilitar a determinação de parâmetros do escoamento.

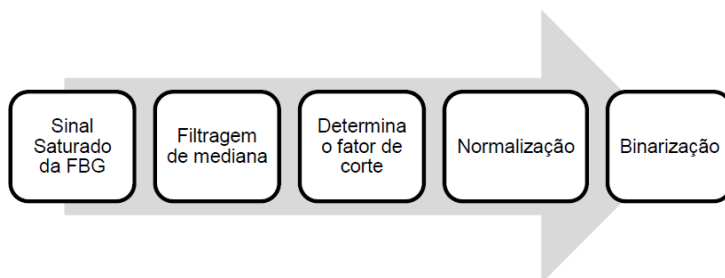
Figura 3-12: Exemplo da metodologia do procedimento de saturação. (a) Histograma do sinal obtido pela FBG quando  $JL=2,0$  m/s e  $JG=1,0$  m/s e indicando os pontos de picos, juntamente com os pontos de saturação. (b) Série temporal do sinal original e do sinal saturado.



Fonte: Adaptado de Baroncini (2015)

Para suavizar os picos dos sinais, Baroncini (2015) utilizou um processo de filtragem chamado filtragem de mediana, onde pontos muito altos e muito baixos são descartados e amplitudes distintas são forçadas a um valor próximo do restante. Com a resposta do sensor no escoamento bifásico saturada e filtrada determina-se o fator de corte, em que toda informação abaixo desse valor corresponde à bolha alongada; e toda informação acima corresponde ao pistão de líquido, conforme é apresentado pelo diagrama de blocos da Figura 3-13.

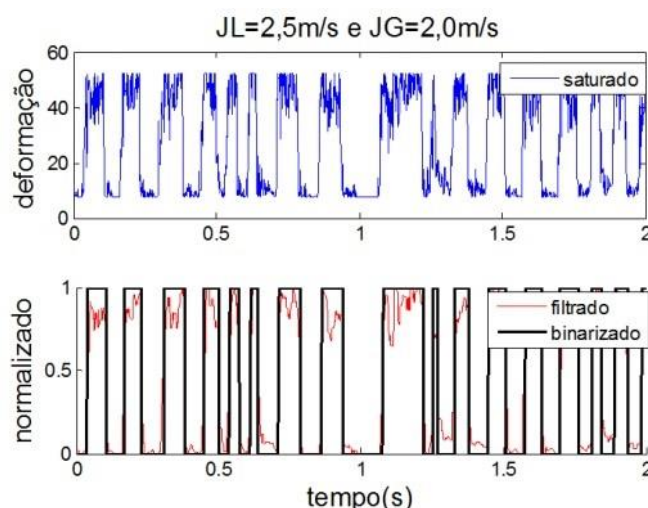
Figura 3-13: Diagrama de blocos mostrando as etapas para o tratamento do sinal bifásico (filtragem e binarização) obtido através das redes de Bragg em fibra ótica.



Fonte: Baroncini (2015)

A Figura 3-14 apresenta, como exemplo, a série temporal do sinal tratado por Baroncini (2015): saturado, filtrado, normalizado e binarizado; quando  $JL=2,5$  m/s e  $JG=2,0$  m/s.

Figura 3-14: Exemplo da metodologia do procedimento de filtragem e binarização. Séries temporais do sinal saturado, filtrado-normalizado e binarizado obtido pela FBG quando  $JL=2,5$  m/s e  $JG=2,0$  m/s.



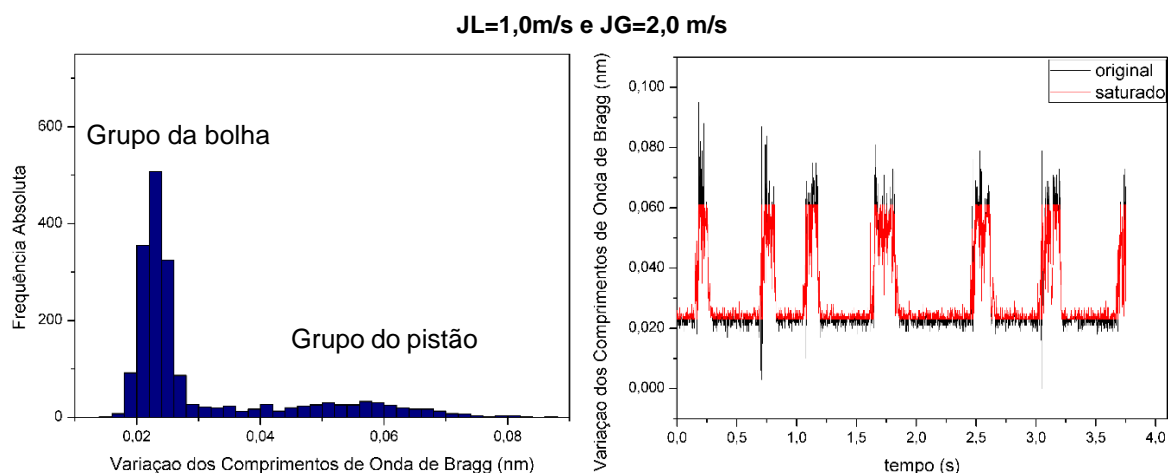
Fonte: Baroncini (2015)

Zamarreño *et al.* (2015) também trabalharam com escoamento de misturas multifásicas e FBGs e assim como Baroncini (2015) utilizaram a fibra ótica sem qualquer proteção mecânica adicional. Demonstraram a viabilidade de sensores óticos com fibra ótica para medição do escoamento, entretanto a fragilidade da fibra ótica nua é um problema que carece de pesquisas e do desenvolvimento de protótipos que tornem tal tipo de sensor mais adequado a ambientes agressivos como os industriais.

As fibras óticas utilizadas nesta pesquisa estão encapsuladas em um tubo de aço e facilitam o manuseio dos sensores graças a proteção mecânica adicional que tornam o conjunto mais robusto e reduzem o risco de rompimento da fibra.

O procedimento semelhante a Baroncini (2015) para tratamento dos sinais é utilizado nos sinais obtidos com o Transdutor 1. Embora não seja descrito nessa dissertação comparações dos resultados com outros sensores. As séries temporais filtradas e binarizadas para diferentes valores de velocidade de líquido e gás são apresentadas. Na Figura 3-15 é mostrado o histograma e a série temporal do sinal original e do sinal saturado, quando  $JL=1,0$  m/s e  $JG=2,0$  m/s.

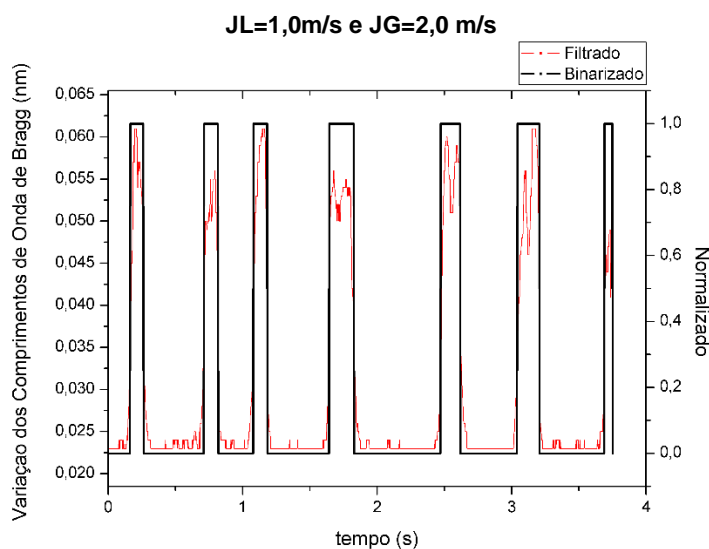
Figura 3-15: Procedimento de saturação. (a) Histograma do sinal obtido pelo Transdutor 1 quando  $JL=1,0$  m/s e  $JG=2,0$  m/s. (b) Série temporal do sinal original e do sinal saturado.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3-16 apresenta, a série temporal do sinal tratado do Transdutor 1: saturado, filtrado e binarizado; quando  $JL=1,0$  m/s e  $JG=2,0$  m/s.

Figura 3-16: Série temporal do sinal, filtrado e binarizado. Transdutor 1 quando  $JL=1,0$  m/s e  $JG=2,0$  m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor

As séries temporais filtradas e binarizadas de onze diferentes configurações de fase líquida e gasosa do Transdutor 1 estão disponíveis no APÊNDICE E – SÉRIES TEMPORAIS DO ESCOAMENTO BIFÁSICO

## 4. Conclusões

Nesta dissertação foi realizado o desenvolvimento de um transdutor para monitoração de vazão em tubulações industriais, convertendo deformação mecânica em deslocamento espectral. O transdutor foi construído e calibrado de forma estática aplicando diferentes forças e de forma dinâmica com diferentes valores de vazões.

Foi realizada uma breve revisão sobre os medidores utilizando fibra ótica já desenvolvidos. O trabalho proposto nesta dissertação seguiu as ideias e princípios de operação do método diferencial com *cantilever* cilíndrico oco proposto por ZHAO *et al.* (2017), no entanto, foram alterados parâmetros como comprimento do tubo metálico, diâmetro e posicionamento da tubulação. O valor da sensibilidade média dos transdutores desenvolvidos foi de aproximadamente 35% inferior a Zhao *et al.* (2017). Situação que pode ser prevista quando se analisa as equações, visto que o aumento da sensibilidade do transdutor está relacionado às características do material e diminuição do diâmetro do tubo de aço e/ou aumento no diâmetro da tubulação. Quando comparados os ensaios e simulações o transdutor apresentou resposta próxima ao modelo teórico.

De maneira similar a Zhao *et al.* (2017), duas FBGs foram utilizadas para aumentar a sensibilidade e evitar que variações da temperatura influenciem na deformação, no entanto, outras duas fibras óticas auxiliares foram inseridas no tubo de aço a fim de melhorar a sustentação e estabilidade das FBGs dentro do tubo metálico. A utilização das fibras auxiliares de posicionamento cumpriu com o objetivo de garantir o afastamento entre as FBGs.

O desenvolvimento da carcaça tipo abraçadeira facilitou a execução dos ensaios estáticos com as massas e a instalação do sensor na tubulação para os ensaios dinâmicos e também garantiu a perpendicularidade do tubo metálico com a tubulação. As peças desenvolvidas tipo abraçadeiras se mostraram práticas, resistentes e eficientes nas etapas de calibração e nos demais experimentos, viabilizando sua aplicação em ambientes industriais.

Diversas foram as dificuldades encontradas na fase da montagem das sondas. O primeiro desafio foi garantir a perpendicularidade do tubo metálico com a tubulação, solucionado com o desenvolvimento das abraçadeiras. O segundo foi assegurar que as FBGs estariam em posições opostas, próxima a parede do tubo metálico oco,

resolvido com a utilização das FO auxiliares. Finalmente o procedimento mais desafiador foi a colagem e inserção das fibras óticas no tubo metálico oco. Em suma, a complexidade no procedimento de inserção das fibras óticas no tubo metálico está na dificuldade em preencher com resina as lacunas entre as fibras óticas e a parede do tubo de aço.

Na calibração estática observou-se que os transdutores apresentaram um comportamento linear e as diferenças de sensibilidade justificam-se principalmente pelo processo manual de montagem, pelas características e propriedades da resina epóxi e posicionamento incorreto das FBGs que causa uma diminuição na sensibilidade do transdutor, haja visto que as FBGs não se encontram alinhadas corretamente ao eixo com maior deformação que é causada pela aplicação de força.

Foram realizadas calibrações estática e dinâmica. Sendo a faixa de medição de força de 0,0049 N a 0,049 N. Com limitação da planta experimental devido a configuração momentânea dos medidores de referência instalados na planta industrial a faixa de medição do escoamento foi de 0,5 m<sup>3</sup>/h a 6,6 m<sup>3</sup>/h. Porém, quando realizada a conversão da força em Newton para vazão em metros cúbicos por hora, observa-se que maiores valores de vazões não serão problemas para futuras aplicações industriais.

A aplicação do transdutor em escoamento bifásico possibilitou diferenciar as fases líquida e gasosa. O transdutor apresentou melhor resultado para baixas velocidades de líquido e altas velocidades de gás, posteriormente quando as velocidades das fases são semelhantes e por fim, o pior resultado ocorreu para altas velocidades de líquido e baixas velocidades de gás.

#### **4.1. Trabalhos futuros**

Segundo as pesquisas e análises propostas nesta dissertação, o transdutor apresentou-se como uma boa alternativa para medição de vazão. Como sugestão para trabalhos futuros pode-se desenvolver e comparar transdutores para diferentes diâmetros de tubulação com sensibilidades semelhantes.

Embora seja possível obter a direção do escoamento com as FBGs de tração e compreensão. Pode-se utilizar as fibras óticas auxiliares de posicionamento e aumentar a quantidade de sensores no mesmo encapsulamento a fim de medir o vetor completo de força ou vazão.

Quando aplicado a escoamento bifásico, deve-se atentar ao fato de que a sonda não transpassa a tubulação. Portanto, é errôneo afirmar que a sonda tipo *cantilever* pode caracterizar todos os padrões de escoamento bifásicos horizontais, devido ao comprimento da sonda ser limitada ao raio da tubulação. Uma solução que possivelmente permite utilizar o *cantilever* em escoamento bifásico horizontal com mais confiabilidade está em aumentar o comprimento e aproximar a extremidade livre da sonda da parede oposta ao engaste. Outra possível solução está em instalar na tubulação maior número de sondas do tipo *cantilever*.



## REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI G. JR, A.; SOUSA, A. R. de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1a. ed. Barueri, SP: Manole, 2008.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**, 2. ed., LTC, 2013.
- BARONCINI, V. H. V. **Método de caracterização do escoamento bifásico usando sensores de deformação baseados em redes de Bragg em fibras ópticas**. 2015. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- BARONCINI, V. H. V.; MARTELLI, C.; DA SILVA, M. J.; COZIN, C.; MORALES, R. E. M. Single-and-Two-Phase Flow Characterization Using Optical Fiber Bragg Grating. **Sensors**, 15, p. 6549-6559; mar. 2015.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E, R, Jr.; DEWOLF, J, T.; MAZUREK, D, F. **Mecânica dos Materiais**, 5. ed., AMGH, 2011.
- BEGA, E. A.; DELMÉE, G. J.; COHN, P. E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V. S. **Instrumentação Industrial**, 3. ed., Interciência, 2011.
- CABRAL, P. **Erros e incertezas nas Medições**, IEP – Instituto Eletrotécnico Português e ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, jul. 2004.
- CHENG, J.; ZHU, W.; HUANG, H.; HU, P. Experimental and simulation study on thermal gas flowmeter based on fiber Bragg grating coated with silver film. **Sensors and Actuators A: Physical**, 228, pp.23-27, 2015.
- COHN, P. E. Sistema de Instrumentação Industrial em Atmosferas Explosivas – Requisitos para Instalação. In: BEGA, E. A. *et al.*, **Instrumentação Industrial**, 3. ed., Interciência, 2011.
- DA CUNHA, J. R. F. A.. **Modelo teórico de sensores ópticos baseados em fibras com grade de Bragg**. 2007, 73 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Pará, 2007.
- DA SILVA, J. C. C. **Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra ótica**, 2005, 194 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/79>, acesso em 17 jul 2018, às 17:00:05.
- DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**, 3. ed., Edgard Blücher, 2003.
- FALCONE, G; HEWITT, G. F.; ALIMONTI, C. **Multiphase Flow Metering**, principles and applications, Elsevier, Amsterdam, 2009.

GAO, S.; ZHANG, A. P.; TAM, H. Y.; CHO, L. H.; LU, C. All-optical fiber anemometer based on laser heated fiber Bragg gratings. **Journal Article, Opt. Express**, vol.19, no.11, p.10124–10130, OSA, 2011.

HERZOG, J. P. An optical fiber vortex sensor for flowrate measurements. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 32, p. 696-700, 1992.

HILL, K. O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, v. 32, p. 647-649, 1978.

HILL, K.; METZ, G. Fiber Bragg technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, 1263-1276, 1997.

HU, R. P. HUANG, X.G. A Simple Fiber-Optic Flowmeter Based on Bending Loss, **IEEE Sensors Journal**, vol. 9, no.12, pp. 1952-1955, 2009.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**. 1ª edição brasileira da 1ª edição do BIPM de 2008. ed. Rio de Janeiro, 2012.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg Grating**. Salt Lake City: Academic Press, 1999.

KERSEY, A.D.; DAVIS, M. A.; PATRICK, H. J.; LEBLANC, M.; KOO, K. P.; ASKINS, C. G.; PUTNAM, M. A.; FRIEBELE, E. J. Fiber Grating Sensors, **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, ago. 1997.

KIRWAN, P. P.; CREIGHTON, D.; COSTELLO, C.; O'BRIEN, T. P.; MOLONEY, K. W. Momentum Change Flow Meter With Pressure Compensation Using FBGs, **IEEE Sensors Journal**, vol.16, no.19, p. 7061-7064, 2016.

LIU Z.; HTEIN, L.; CHENG, L.; MARTINA, Q.; JANSEN, R.; TAM, H. Miniature FBG-based fluidic flowmeter to measure hot oil and water, **SPIE**, vol.10323, p. 1032336-1 - 1032336-4, 2017.

LU, P.; CHEN, Q. Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of flow rate and direction. **Measurement Science and Technology**, 19, p. 1-8, oct 2008. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/12/125302>

LYLE, J. H.; PITT, C. W. Vortex shedding fluid flowmeter using optical fiber sensor, **Electronic Letters**, v. 17, p. 244-245, 1981.

NAIDEK, B. P. **Análise das condições iniciais para simulação do escoamento em golfadas utilizando o modelo lagrangeano de seguimento de pistões**. 2017, 161 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

OTHONOS, A. Fiber Bragg gratings. **Review of Scientific Instruments**, v. 68, n. 12, p. 43099-4341, 1997.

OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. London: Artech House Print on Demand, 1999.

PRASSER H.-M., BÖTTGER A., and ZSCHAU J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v 9, p. 111-119, jun 1998.

RAJAN, G. (Ed.). **Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications (Devices, Circuits, and Systems)**. 1 ed.. Boca Raton: CRC Press, 2015.

SHOHAM, O. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. Society of Petroleum Engineers (SPE), 310p., 2005.

VIM. Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). **Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO**, 94 p., 2012. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim\\_2012.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf)>. Acesso em: 24 nov. 2018.

WANG, P.; ZHAO, Y.; YANG, Y.; BI, D. Research on a novel variable-area optical fiber gas flow sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 221, p. 29–32, 2014.

WANG, X.; DONG, X.; ZHOU, Y.; NI, K.; CHENG, J.; CHEN, Z. Hot-wire anemometer based on silver-coated fiber Bragg grating assisted by no-core fiber. **IEEE Photonics Technology**, vol.25 no.24, p. 2458–2461, 2013.

ZAMARRENO, C. R.; MARTELLI, C.; BARONCINI, V. H. V.; DOS SANTOS, E. N.; DA SILVA, M. J.; MORALES, R. E. M.; ZUBIATE, P.; ARREGUI, F. J.; MATIAS, I. R. Single and Multiphase Flow Characterization by Means of an Optical Fiber Bragg Grating Grid, **Journal of Lightwave Technology**, vol.33, no.99, p. 1857–1862, 2015.

ZHAO, Y.; HU, H.; BI, D.; YANG, Y. Research on the optical fiber gas flowmeters based on intermodal interference. **Elsevier, Optics and Lasers in Engineering**, v. 82, p. 122- 126, 2016.

ZHAO, Y.; CHEN, K.; YANG, J. Novel target type flowmeter based on a differential fiber Bragg sensor. **Measurement**, v. 38, p. 230-235, jul. 2005.

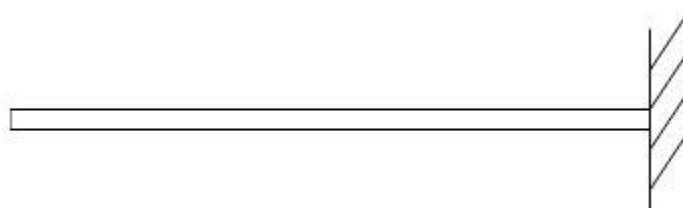
ZHAO, Y.; GU, Y. LV, R., YANG, Y. A small probe-type flowmeter based on the differential fiber Bragg grating measurement method. **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, v. 66, no. 3, p. 502-506, mar. 2017.

## APÊNDICE A – MODELO DA VIGA EM BALANÇO

Para se obter o modelo matemático foram utilizados conceitos de Mecânica dos Sólidos, mais especificamente, vigas e seus esforços.

O modelo escolhido e que melhor se adapta à estrutura e construção das sondas é o de uma viga em balanço ou *cantilever*.

Figura A-0-1: Modelo escolhido para representar as sondas (viga em balanço)

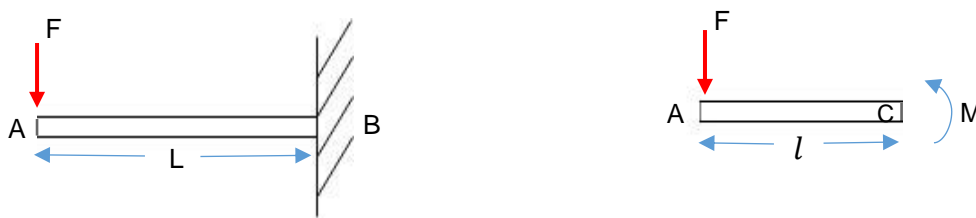


Fonte: Elaborado pelo autor

### A.1. Esquema estático de carregamento

A viga em balanço AB Figura A-0-2, tem seção transversal uniforme, apresenta um apoio em B e suporta uma força  $F$  na sua extremidade livre A que representa as massas aplicadas na calibração das sondas.

Figura A-0-2: Esquema estático de carregamento da viga em balanço com a representação da força aplicada na extremidade da viga, as reações dos apoios.



Fonte: Elaborado pelo autor

## A.2. Momento fletor máximo (esforço interno)

Usando o diagrama de corpo livre da parte AC da viga, em que C está localizado a uma distância  $l$  da extremidade A encontra-se:

$$M = -Fl \quad (\text{A.0.1})$$

Substituindo  $M$  na Equação (A.0.1) e multiplicando ambos os membros pela constante  $EI$ , escreve-se:

$$\frac{d^2y}{dl^2} = \frac{M(l)}{EI} \quad (\text{A.0.2})$$

Integrando em  $l$ :

$$EI \frac{dy}{dl} = -\frac{1}{2}Fl^2 + C_1 \quad (\text{A.0.3})$$

Na extremidade engastada B tem-se  $l = L$  e  $\theta = \frac{dy}{dl} = 0$  substitui-se esses valores na Equação (A.0.3) e resolvendo  $C_1$ , tem-se:

$$C_1 = \frac{1}{2}FL^2 \quad (\text{A.0.4})$$

Então substitui-se  $C_1$  novamente na Equação (A.0.3):

$$EI \frac{dy}{dl} = -\frac{1}{2}Fl^2 + \frac{1}{2}FL^2 \quad (\text{A.0.5})$$

Integrando ambos os lado da equação:

$$EIy = -\frac{1}{6}Fl^3 + \frac{1}{2}FL^2l + C_2 \quad (\text{A.0.6})$$

Mas como em B  $l = L, y = 0$

$$C_2 = -\frac{1}{3}FL^3 \quad (\text{A.0.7})$$

Utilizando o valor de  $C_2$  novamente na Equação (A.0.6) . Obtem-se a equação da linha elástica:

$$y = \frac{F}{6EI}(-l^3 + 3L^2l - 2L^3) \quad (\text{A.0.8})$$

A deslocamento e a inclinação em A , são obtidos fazendo  $l = 0$  nas Equações (A.0.8) e (A.0.5).

$$y_A = \frac{FL^3}{3EI} \quad (\text{A.0.9})$$

$$\theta_A = \frac{FL^2}{2EI} \quad (\text{A.0.10})$$

## APÊNDICE B – RESULTADO DO CÁLCULO DAS INCERTEZAS

As tabelas trazem os resultados dos cálculos mencionados na Seção 3.3. Cálculo das Incertezas. Demonstra-se: a ordena de origem, declive da reta, desvio padrão e as respectivas incertezas na faixa de cada transdutor.

Tabela B-1 Resultado de cada etapa da análise estatística da calibração estática

	Transdutor 1	Transdutor 2	Média	Unid.
$a$	17,158	16,11	16,634	
$b$	2341,89	3193,17	2767,53	
$r$	0,99995	0,99995	0,99995	
$S_Y(\text{pm})$	406,9	554,93	480,915	pm
$S_X(N)$	0,174	0,174	0,174	N
$S_{YX}$	3,8587	5,7749	4,8168	
$S_p$	41,13	43,75	42,44	pm
$u_1$	13,00	13,83	13,41	pm
$u_2$	6,158	9,216	7,687	pm
$u_3$	1,031	1,543	1,287	pm
$u_5$	0,2886	0,2886	0,2886	pm
$\gamma$	9,000	9,000	9,000	
$u_c$	14,432	16,69	15,56	pm
$\gamma_{ef}$	12,98	15,95	14,46	
$t_{95\%}$	2,16	2,12	2,14	pm
$Uy$	31,173	35,4	33,286	pm
$Ux$	0,013	0,011	0,012	N

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela B-2 Resultado de cada etapa da análise estatística da calibração dinâmica – Faixa 1

Faixa 1 (0 a 1,43 m <sup>3</sup> /h)				
	Transdutor 1	Transdutor 2	Média	Unid.
$a$	-1,272	0,542	-0,73	
$b$	2,96	3,60	3,28	
$r$	0,99167	0,99588	0,99377	
$S_Y(\text{pm})$	1,426	1,729	1,577	pm
$S_X(\text{m}^3/\text{h})$	0,48	0,48	0,48	m <sup>3</sup> /h
$S_{YX}$	0,25	0,22	0,47	
$S_p$	0,079	0,433	0,256	pm
$u_1$	0,035	0,193	0,114	pm
$u_2$	0,384	0,328	0,356	pm
$u_3$	0,150	0,128	0,139	pm
$u_5$	0,2886	0,2886	0,2886	pm
$\gamma$	4,000	4,000	4,000	
$u_c$	0,504	0,494	0,499	pm
$\gamma_{ef}$	9,026	12,03	10,52	
$t_{95\%}$	2,262	2,179	2,22	pm
$Uy$	1,142	1,08	1,111	pm
$Ux$	0,38	0,29	0,335	m <sup>3</sup> /h

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela B-3 Resultado de cada etapa da análise estatística da calibração dinâmica – Faixa 2

<b>Faixa 2 (1,43 a 3,82 m<sup>3</sup>/h)</b>				
	<b>Transdutor 1</b>	<b>Transdutor 2</b>	<b>Média</b>	<b>Unid.</b>
<i>a</i>	-8,643	-8,659	-8,651	
<i>b</i>	7,944	9,394	8,669	
<i>r</i>	0,99813	0,99441	0,99627	
<i>S<sub>y</sub></i> (pm)	8,398	9,968	9,183	pm
<i>S<sub>x</sub></i> (m <sup>3</sup> /h)	1,06	1,06	1,06	m <sup>3</sup> /h
<i>S<sub>yx</sub></i>	0,627	1,288	0,957	
<i>S<sub>p</sub></i>	0,66	2,858	1,759	pm
<i>u<sub>1</sub></i>	0,295	1,278	0,786	pm
<i>u<sub>2</sub></i>	0,343	0,705	0,524	pm
<i>u<sub>3</sub></i>	0,313	0,644	0,478	pm
<i>u<sub>5</sub></i>	0,2886	0,2886	0,2886	pm
<i>γ</i>	4,000	4,000	4,000	
<i>u<sub>c</sub></i>	0,622	1,621	1,121	pm
<i>γ<sub>ef</sub></i>	21,04	9,45	15,24	
<i>t<sub>95%</sub></i>	2,086	2,228	2,15	pm
<i>U<sub>y</sub></i>	1,2975	3,613	2,455	pm
<i>U<sub>x</sub></i>	0,163	0,384	0,273	m <sup>3</sup> /h

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela B-4 Resultado de cada etapa da análise estatística da calibração dinâmica – Faixa 3

<b>Faixa 3 (3,86 a 6,6 m<sup>3</sup>/h)</b>				
	<b>Transdutor 1</b>	<b>Transdutor 2</b>	<b>Média</b>	<b>Unid.</b>
<i>a</i>	-35,749	-47,326	-41,537	
<i>b</i>	14,78	19,24	17,01	
<i>r</i>	0,99612	0,99608	0,9961	
<i>S<sub>y</sub></i> (pm)	18,308	23,838	21,073	pm
<i>S<sub>x</sub></i> (m <sup>3</sup> /h)	1,23	1,23	1,23	m <sup>3</sup> /h
<i>S<sub>yx</sub></i>	1,971	2,58	2,275	
<i>S<sub>p</sub></i>	0,66	2,811	3,471	pm
<i>u<sub>1</sub></i>	0,295	1,257	0,776	pm
<i>u<sub>2</sub></i>	0,922	1,207	1,064	pm
<i>u<sub>3</sub></i>	0,985	1,290	1,137	pm
<i>u<sub>5</sub></i>	0,2886	0,2886	0,2886	pm
<i>γ</i>	4,000	4,000	4,000	
<i>u<sub>c</sub></i>	1,411	2,188	1,799	pm
<i>γ<sub>ef</sub></i>	21,51	19,79	20,65	
<i>t<sub>95%</sub></i>	2,086	2,086	2,086	pm
<i>U<sub>y</sub></i>	2,944	4,564	3,754	pm
<i>U<sub>x</sub></i>	0,199	0,237	0,218	m <sup>3</sup> /h

Fonte: Elaborada pelo autor.



Tabela B-5 Resultado de cada etapa da análise estatística da calibração de temperatura

<b>Temperatura (15 a 75°C)</b>				
	<b>FBG 1</b>	<b>FBG 2</b>	<b>Média</b>	<b>Unid.</b>
<i>a</i>	1526,5119	1532,1331	1529,3225	
<i>b</i>	0,02433	0,02509	0,02471	
<i>r</i>	0,99948	0,99979	0,99963	
$S_Y$ (nm)	0,5267	0,5416	0,5341	nm
$S_X$ (°C)	21,58	21,58	21,58	°C
$S_{YX}$	0,0185	0,0119	0,0152	
$S_p$	0,1187	0,0616	0,09015	nm
$u_1$	0,0685	0,0275	0,048	nm
$u_2$	0,00035	0,00022	0,00285	nm
$u_3$	0,0069	0,0045	0,0057	nm
$u_5$	0,0002887	0,0002887	0,0002887	nm
$\gamma$	9,000	9,000	9,000	
$u_c$	0,03647	0,0237	0,0300	nm
$\gamma_{ef}$	10,78	6,00	6,14	
$t_{95\%}$	2,2	2,4	2,3	nm
$U_y$	0,080	0,056	0,068	nm
$U_x$	3,29	2,26	2,77	°C

Fonte: Elaborada pelo autor.

## APÊNDICE C – PUBLICAÇÃO

O desenvolvimento desta pesquisa gerou a seguinte publicação:

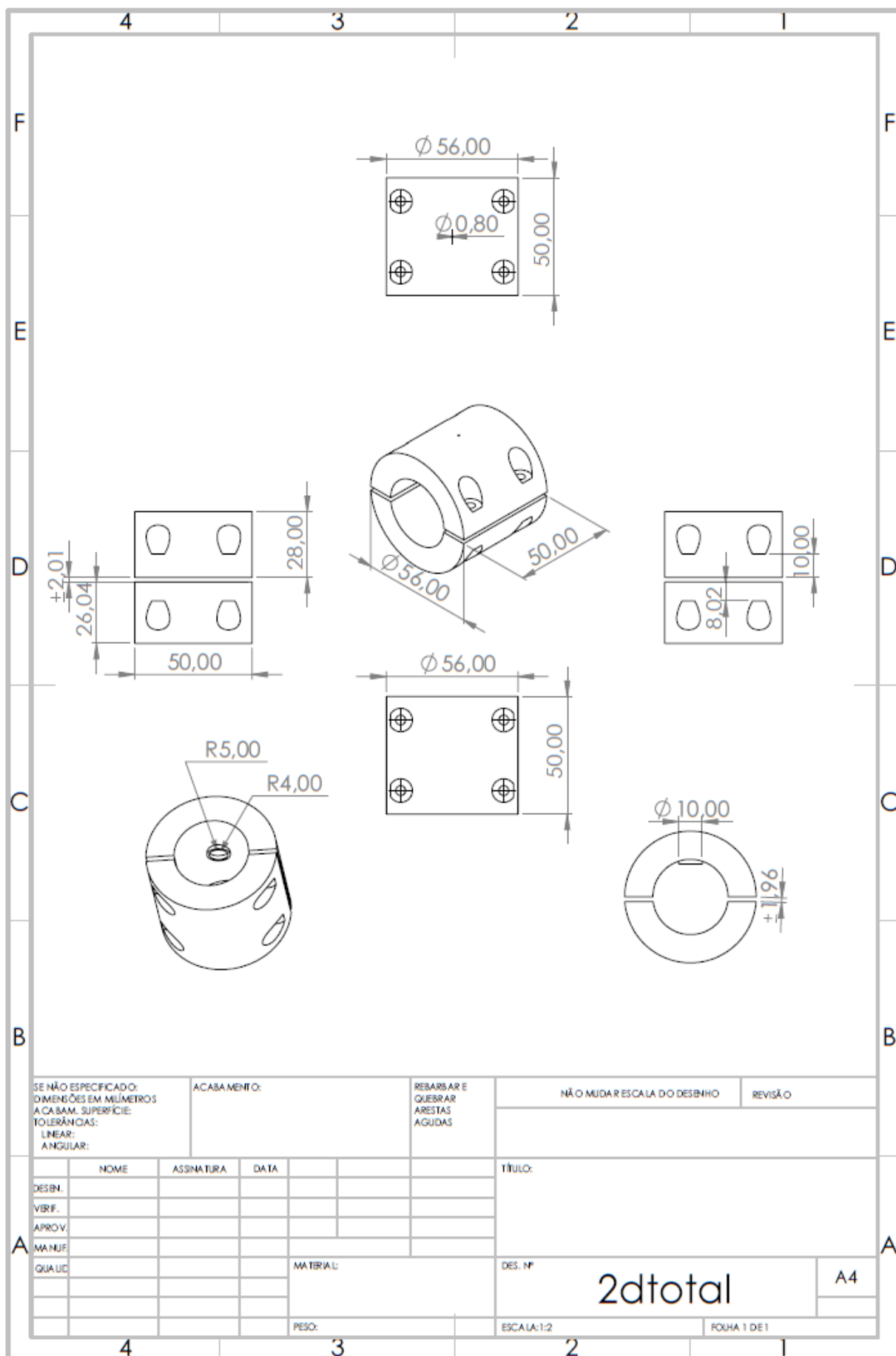
- 1) Conferência: MOMAG 2018: 18º SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 13º CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo

Transdutor a Fibra Ótica para Monitoração de Vazão em Tubulações Industriais.

Anais do MOMAG 2018, v. único. p. 594-597.

Santa Rita do Sapucaí – MG - 2018.

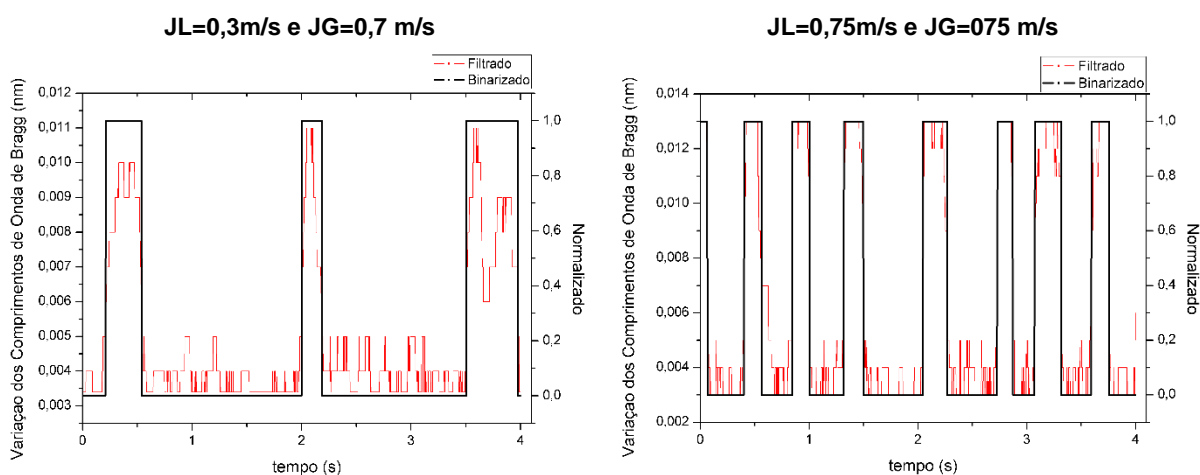
## APÊNDICE D – ABRAÇADEIRA



## APÊNDICE E – SÉRIES TEMPORAIS DO ESCOAMENTO BIFÁSICO

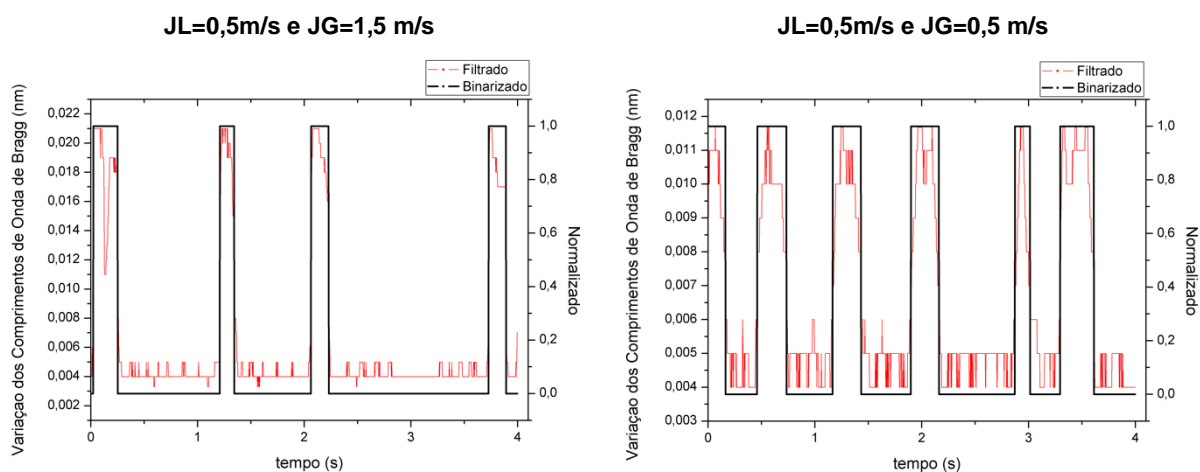
As figuras trazem os resultados do processamento mencionado na Seção 3.6. Resultados obtidos em escoamento bifásico utilizando sensores baseados em redes de Bragg em fibras óticas. Demonstra-se os sinais saturados, filtrados e binarizados de onze combinações diferentes de velocidade líquida e gasosa.

Figura D-0-1: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando  $JL=0,3$  m/s e  $JG=0,7$  m/s. (b) Transdutor 1 quando  $JL=0,75$  m/s e  $JG=0,75$  m/s.



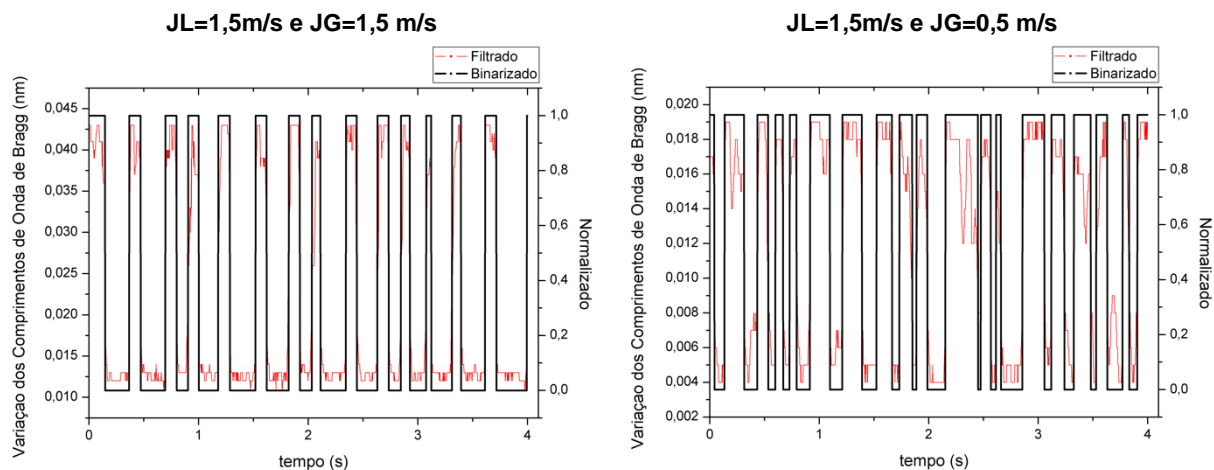
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura D-0-2: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando  $JL=0,5$  m/s e  $JG=1,5$  m/s. (b) Transdutor 1 quando  $JL=0,5$  m/s e  $JG=0,5$  m/s.



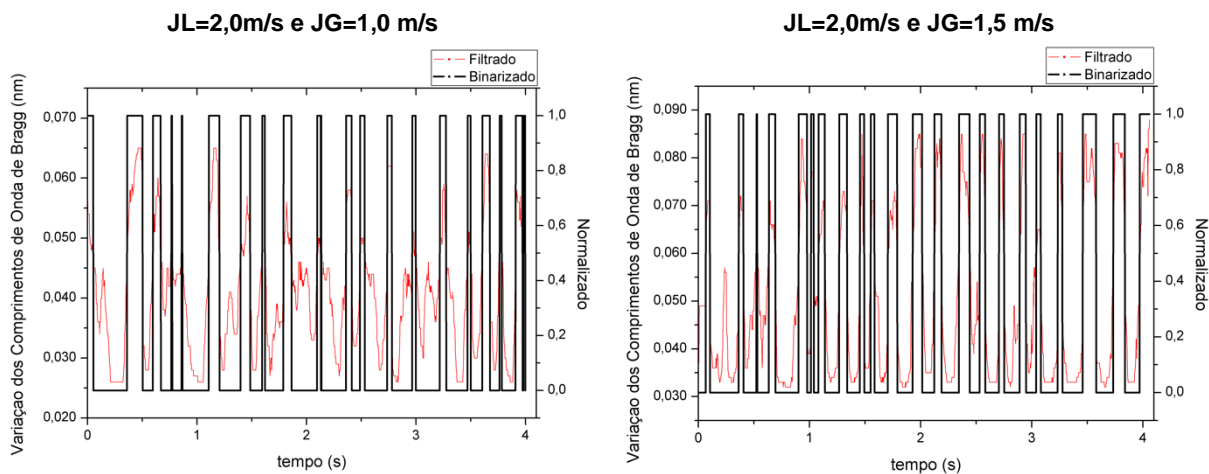
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura D-0-3: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando  $JL=1,5$  m/s e  $JG=1,5$  m/s. (b) Transdutor 1 quando  $JL=1,5$  m/s e  $JG=0,5$  m/s.



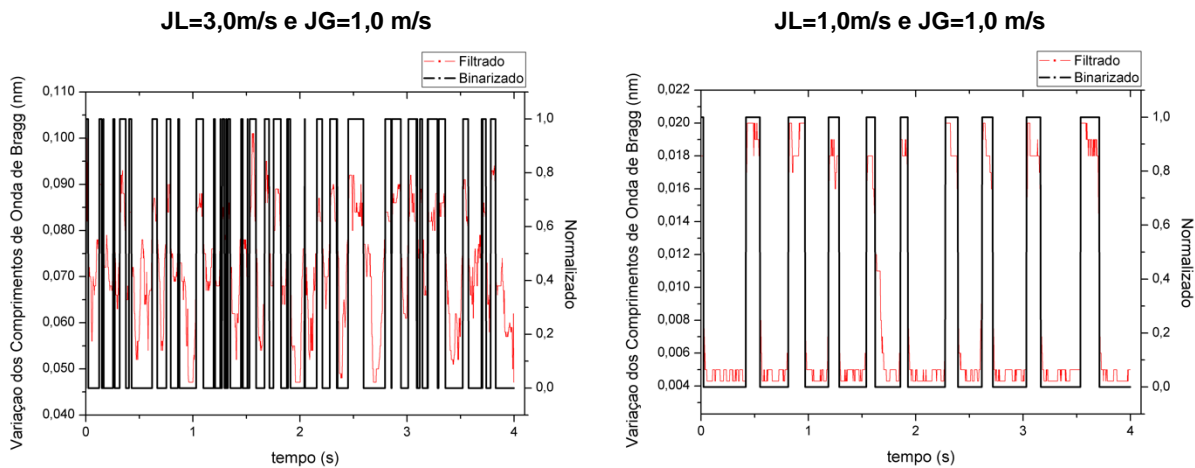
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura D-0-4: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando  $JL=2,0$  m/s e  $JG=1,0$  m/s. (b) Transdutor 1 quando  $JL=2,0$  m/s e  $JG=1,5$  m/s.



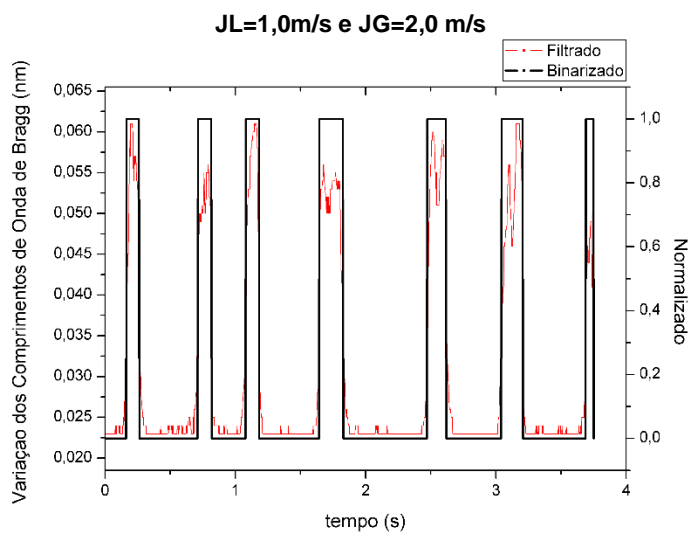
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura D-0-5: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. (a) Transdutor 1 quando  $JL=3,0$  m/s e  $JG=1,0$  m/s. (b) Transdutor 1 quando  $JL=1,0$  m/s e  $JG=1,0$  m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura D-0-6: Séries temporais do sinal saturado, filtrado e binarizado. Transdutor 1 quando  $JL=1,0$  m/s e  $JG=2,0$  m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor