

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

RODOLFO LUIZ PATYK

**INSTRUMENTAÇÃO BASEADA EM REDES DE BRAGG EM FIBRA
ÓTICA PARA A MONITORAÇÃO DA VAZÃO DE FLUÍDOS
ATRAVÉS DO USO DA TERMOMETRIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RODOLFO LUIZ PATYK

**INSTRUMENTAÇÃO BASEADA EM REDES DE BRAGG EM FIBRA
ÓTICA PARA A MONITORAÇÃO DA VAZÃO DE FLUÍDOS
ATRAVÉS DO USO DA TERMOMETRIA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Hypolito José Kalinowski

CURITIBA

2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P322i Patyk, Rodolfo Luiz
Instrumentação baseada em redes de Bragg em fibra ótica para a monitoração da vazão de fluídos através do uso da termometria / Rodolfo Luiz Patyk. – 2010.
110 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Hypolito José Kalinowski

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de concentração: Informática industrial, Curitiba, 2010.

Bibliografia: p. 107-10

1. Detectores ópticos. 2. Detectores de fibras ópticas. 3. Grades de Bragg. 4. Termopares. 5. Termômetros e termometria. 6. Medidores de fluxo. 7. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Kalinowski, Hypolito José, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Biblioteca Central da UTFPR

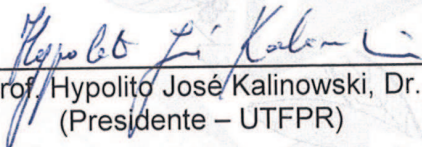
Título da Dissertação Nº 523:

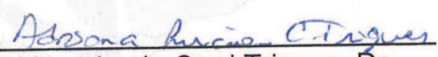
“Instrumentação baseada em redes de Bragg em fibras óticas para a monitoração da vazão de fluídos através do uso da termometria”

por

Rodolfo Luiz Patyk

Esta dissertação foi apresentada, às 08h30min, do dia 09 de abril de 2010, como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Informática Industrial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora.

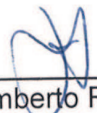

Prof. Hypolito José Kalinowski, Dr.
(Presidente – UTFPR)


Adriana Lucia Cerri Triques, Dr.
(PETROBRÁS - RJ)


Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão
(UTFPR)


Prof. Gícero Martelli, Dr.
(UTFPR – Ponta Grossa)

Visto da coordenação:


Prof. Dr. Humberto Remígio Gamba
(Coordenador do CPGEI)

Dedico este trabalho aos meus pais, Dante e Rose, pelas lições de vida e pelo incentivo ao meu trabalho.

AGRADECIMENTOS

Eu não teria concluído esta dissertação de mestrado, se não fosse por inúmeras pessoas que conheci no decorrer de minha vida e que talvez injustamente sejam esquecidas em meu agradecimento. Por isso agradeço antecipadamente a todos que ajudaram a construir o meu caráter e o meu conhecimento.

Um agradecimento especial aqueles que ajudaram diretamente na conclusão deste trabalho:

Ao Professor Hypolito J. Kalinowski, pelos ensinamentos e profissionalismo em sua orientação.

Aos meus pais, Dante e Rosi, pelo apoio e carinho incondicional.

À Lucieli, pela sua compreensão, paciência e companheirismo nesta jornada.

Ao Reinaldo pela amizade e a ajuda na montagem da bancada experimental.

Aos meus colegas do laboratório LOOP: Valmir, Ismael e Márcia, pelo companheirismo e ajuda nas discussões dos problemas enfrentados.

Aos colegas do laboratório LASER.

Aos amigos da UTFPR, Wyllian, Emmerson, Sergio e Diogo pela companhia neste período de mestrado. Aos membros da banca Prof. Dr. Adriana L. C. Triques, Prof. Dr. Cicero Martelli e Prof. Dr. Cezar O. R. Negrão, pelas correções e contribuições dadas à dissertação.

Ao Projeto IBP de bolsas de mestrado pelo apoio financeiro.

Das Utopias

Se as coisas são inatingíveis... ora!
Não é motivo para não querê-las...
Que tristes os caminhos, se não fora
A mágica presença das estrelas!

Mario Quintana, espelho mágico.

RESUMO

PATYK, Rodolfo Luiz. Instrumentação Baseada em redes de Bragg em Fibra Ótica Para a Monitoração da Vazão de Fluídos Através do Uso da Termometria. 110 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

Neste trabalho foi inferida a vazão de um fluido que escoava em um tubo de cobre através do uso da termometria em diferentes regimes de escoamento, com o uso de sensores óticos de temperatura baseados em redes de Bragg escritas em fibras óticas (FBG). Foi utilizado um processo de medição não-intrusivo de vazão através do uso da termometria o qual consiste no monitoramento da temperatura em dois pontos fixos, com uma distância conhecida (d), na parede externa do tubo. Além dos sensores óticos de temperatura foram utilizados sensores comerciais de temperatura, termopares, com a intenção de comparar os resultados obtidos experimentalmente. No experimento o fluido estará escoando com uma temperatura T_1 , e em determinado tempo será liberado um pequeno volume de fluido com temperatura T_2 , onde $T_2 > T_1$, simulando um pulso térmico. É monitorada a evolução temporal do pulso térmico e anotado o tempo de trânsito (t) entre os dois sensores de temperatura. Com o valor da distância (d) e do tempo de trânsito (t) obtemos a velocidade média de escoamento (\bar{v}). De posse da (\bar{v}) e área de seção transversal do tubo (A) podemos inferir a vazão. A técnica de medição não-intrusiva de vazão através do uso da termometria foi testada para diferentes regimes de escoamento: laminar, transição e turbulento. Foram comparados os valores medidos da vazão mássica do sistema com os valores obtidos experimentalmente para os sensores comerciais e redes de Bragg. Para o regime turbulento a exatidão de medição da velocidade de escoamento do fluido foi de 0,75 para os sensores óticos e 0,60 para os sensores comerciais. No caso do regime de transição a exatidão na medida foi de 0,90 para o sensor ótico e 0,69 para os sensores comerciais. Finalmente para o regime laminar a exatidão nas medidas foram de 0,98 para os sensores ótico e 0,76 para os sensores comerciais.

Palavras-chave: Redes de Bragg, Sensores óticos, Medição de vazão, medidores não-intrusivos, termometria.

ABSTRACT

PATYK, Rodolfo Luiz. Instrumentation Based on Fiber Optics Bragg Grating for Monitoring Fluid Flow Through Use of Thermometry. 110 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

In this work we inferred a fluid flow seeping from a copper pipe through thermometers scheme in different flows, through the use of optical sensors based on temperature Bragg Gratings written in optical fiber (FBG). We used a non-intrusive measurement process through the use of thermometry, which consists of monitoring the temperature at two fixed points with a known distance (d) on the outer wall of the tube. Besides the optical sensors of temperature, sensors were used for commercial temperature, thermocouples, with the objective of comparing the results obtained experimentally. In the experiment, the fluid is flowing at a temperature T_1 , and will be released at any given time a small volume of fluid with temperature T_2 , where $T_2 > T_1$, simulating a thermal pulse. It's monitored the evolution of the thermal pulse and noted the transit time (t) between the two temperature sensors. With the value of the distance (d) and transit time (t) we obtain the average velocity of flow (v). Tenure velocity (v) and the tube transversal sectional area (A) we can infer the non-intrusive measurement technique flow. The flow through the use of thermometry was tested for different flow regimes: laminar, transitional and turbulent. We compared the values measured with the mass flow of the system with the experimental values for the sensors and commercial FBG's. In the turbulent the accuracy of measuring the speed and fluid flow was 0.75 to 0.60 optical sensors and sensor for commercial purposes. Finally for the laminar accuracy in the measurements were 0.98 optical sensors and 0.76 for commercial sensors.

Keywords: Flow measurement, Thermometry, Optical sensors, Fiber Bragg gratings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do sistema de medição não-intrusivo de vazão através da termometria.	18
Figura 2 – Fluxograma para medição - Representação simplificada das etapas realizadas para um sistema de medição geral.	40
Figura 3 – Desenho esquemático da fibra ótica.	54
Figura 4 – Gráfico das janelas de transmissão via fibras óticas.	55
Figura 5 – Representação esquemática do trajeto da luz dentro da fibra ótica.	56
Figura 6 – Representação esquemática da abertura numérica.	57
Figura 7 – Desenho esquemático de uma rede de Bragg.	59
Figura 8 – Representação esquemática do espectro de transmissão e reflexão da luz passando em uma rede de Bragg na fibra ótica.	59
Figura 9 – Desenho esquemático da máscara de fase.	61
Figura 10 – Desenho esquemático da máscara de fase com a fibra ótica.	62
Figura 11 – Representação Esquemática do Sistema de Medição de Vazão Através da Termometria.	64
Figura 12 – Representação esquemática do reservatório de nível constante.	65
Figura 13 – Representação esquemática do sistema de abastecimento e drenagem. ...	66
Figura 14 – Representação esquemática do sistema de abastecimento e drenagem do fluido quente.	67
Figura 15 – Representação esquemática do sistema de válvulas solenóides.	69
Figura 16 – Figura esquemática dos sensores óticos interno e externo.	70
Figura 17 – Figura do painel de controle do sistema de medição não-intrusivo de vazão através de termometria.	70
Figura 18 – Diagrama de bloco do sistema de interrogação das FBG's.	74
Figura 19 – Esquemático da montagem de gravação com máscara de fase.	75
Figura 20 – Representação esquemática do encapsulamento metálico.	75
Figura 21 – Gráfico da resposta do sensor ótico com o pico de reflexão em 1533nm com variação de temperatura, resposta obtida pelo interrogador comercial mine OSA.	76
Figura 22 – Gráfico da resposta do sensor ótico com o pico de reflexão em 1533nm com variação de temperatura, resposta obtida pelo interrogador de filtro sintonizável.	77
Figura 23 – Gráfico da resposta do sensor ótico com o pico de reflexão em 1545nm com variação de temperatura, resposta obtida pelo interrogador comercial mine OSA.	77
Figura 24 – Gráfico da resposta do sensor ótico com o pico de reflexão em 1545nm com variação de temperatura, resposta obtida pelo interrogador de filtro sintonizável.	78
Figura 25 – Gráfico do espectro refletido dos sensores óticos da linha sensora interna.	82
Figura 26 – Gráfico do espectro refletido dos sensores óticos da linha sensora externa.	82
Figura 27 – Gráfico da evolução temporal da resposta do termopar ao pulso térmico no	

	ponto P_0 , onde está localizado o sensor 1, $TP0$	83
Figura 28	– Gráfico da evolução temporal da resposta do termopar ao pulso térmico no ponto $P_{1,5}$, onde está localizado o sensor 2, $TP1,5$	83
Figura 29	– Gráfico da evolução temporal da resposta do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto P_0 , onde está localizado o sensor 1, $SOP0$	84
Figura 30	– Gráfico da evolução temporal da resposta do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto $P_{1,5}$, onde está localizado o sensor 2, $SO1,5$	84
Figura 31	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura na evolução do pulso térmico.	84
Figura 32	– Gráfico da evolução da resposta em variação de comprimento de onda do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto P_0	85
Figura 33	– Gráfico da evolução da resposta em variação de comprimento de onda do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto $P_{1,5}$	85
Figura 34	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores óticos de temperatura na evolução do pulso térmico com dados obtidos por um interrogador comercial.	86
Figura 35	– Gráfico da evolução temporal da resposta do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto P_0 para diversas medidas, na subida da temperatura.	87
Figura 36	– Gráfico da evolução temporal da resposta do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto P_0 para diversas medidas na subida da temperatura.	87
Figura 37	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento.	88
Figura 38	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos internos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento.	88
Figura 39	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento, através de pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.	91
Figura 40	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento, através de pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.	91
Figura 41	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento, através de pulsos térmicos duração de 3s, 5s, 10s, 20s, 30s e 50s.	92
Figura 42	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento, através de pulsos térmicos duração de 5s e 10s com 30s de	

	descanso.	92
Figura 43	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime transitório.	93
Figura 44	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos internos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime transitório.	95
Figura 45	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime de transição, através de consecutivos pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.	95
Figura 46	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos interno e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime de transição, através de consecutivos pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.	96
Figura 47	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime de transição, através de pulsos térmicos duração de 3s, 5s, 10s, 20s, 30s e 50s.	96
Figura 48	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime de transição, através de pulsos térmicos duração de 3s e 10s com 80s de descanso.	97
Figura 49	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar.	98
Figura 50	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos internos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar.	98
Figura 51	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar, através de consecutivos pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.	100
Figura 52	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos interno e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar, através de consecutivos pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.	101
Figura 53	– Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no	

regime laminar, através de pulsos térmicos duração de 3s, 5s, 15s, 10s, 7s, 20s, 30s e 50s. 101

Figura 54 – Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar, através de pulsos térmicos duração de 15s e 7s com 80s de descanso. 102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÕES	19
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivo Específico	22
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	MEDIÇÃO DE VAZÃO	23
2.2	TERMOMETRIA	25
2.2.1	Termômetros	25
2.2.2	Medição de Vazão Não-Intrusiva Através da Termometria	29
2.3	SENSORES EM FIBRA ÓTICA	31
2.3.1	Fibra Ótica	31
2.3.2	Sensores de Redes de Bragg	32
2.3.3	Sistema de Interrogação para sensores de redes de Bragg	35
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	39
3.1	INTRODUÇÃO À MEDIÇÃO DE VAZÃO	39
3.1.1	Conceitos físicos para a medição de vazão	43
3.2	MEDIDORES DE VAZÃO	47
3.2.1	Tipos de medidores de Vazão	49
3.3	TERMOMETRIA	50
3.4	SENSORES EM FIBRA ÓTICA	53
3.4.1	Fibra Ótica	53
3.4.2	Sensores de Redes de Bragg	58
	Sensibilidades das Redes de Bragg para Deformação e Temperatura	60
3.4.3	Sistema de Gravação dos Sensores de Bragg	60
4	METODOLOGIA	63
4.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	63
4.1.1	Reservatório de Nível Constante	64
4.1.2	Sistema de Fluido Frio	66
4.1.3	Sistema de Fluido Quente	66
4.1.4	Sistema de Válvulas Solenóides	68
4.1.5	Linha de Testes	69
4.1.6	Sistema de Controle	70
4.2	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO POR TERMOMETRIA	71
4.2.1	Número de Reynolds R_e	72
4.3	SISTEMA DE INTERROGAÇÃO DAS FBG'S	73
4.4	CONTRUÇÃO DOS SENSORES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS	73
4.4.1	Encapsulamento dos sensores	74
4.4.2	Calibração dos Sensores Óticos	76
4.5	METODOLOGIA	77

5	RESULTADOS	81
5.1	SENSORES DE REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS	81
5.2	GERAÇÃO DOS GRÁFICOS DE TENSÃO VERSUS TEMPO DE EVOLUÇÃO	82
5.2.1	Sistema de Interrogação dos Sensores Óticos	86
5.3	RESULTADOS PARA O REGIME TURBULENTO	86
5.3.1	Determinação do Tempo de Equilíbrio Térmico para o Regime Turbulento	87
5.3.2	Determinação da Resposta do Sistema para o Regime Turbulento	90
5.3.3	Determinação da Duração Mínima do Pulso Térmico para o Regime Turbulento	90
5.4	RESULTADOS PARA O REGIME DE TRANSIÇÃO	91
5.4.1	Determinação do Tempo de Equilíbrio Térmico para o Regime Transitório	92
5.4.2	Determinação da Resposta do Sistema para o Regime de Transição	93
5.4.3	Determinação da Duração Mínima do Pulso Térmico para o Regime de Transição	96
5.5	RESULTADOS PARA O REGIME LAMINAR	97
5.5.1	Determinação do Tempo de Equilíbrio Térmico para o Regime Laminar	97
5.5.2	Determinação da Resposta do Sistema para o Regime Laminar	98
5.5.3	Determinação da Duração Mínima do Pulso Térmico para o Regime Laminar	100
5.6	DISCUSSÃO FINAL	101
6	CONCLUSÃO	105
6.1	CONCLUSÃO	105
6.2	TRABALHOS FUTUROS	105
	REFERÊNCIAS	107

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se medir a vazão está presente no nosso cotidiano e em muitas vezes não percebemos o quão rotineiro pode ser seu uso, desde o simples abastecimento de combustível em postos de gasolina ou no controle da quantidade de água que é consumida nas residências. O uso de medidores de vazão em processos que envolvem milhares de litros tornam-se indispensáveis. Podemos citar a área mundial de extração e produção de petróleo, que envolve milhões de barris diários. No Brasil, a produção média de petróleo e gás natural feita pela PETROBRAS em 2009, foi de 2,3 milhões de barris de óleo equivalente (BRASILIENSE, 2009). Com o crescente aumento da exploração de petróleo (FINANCEIRA, 2010), transporte de hidrocarbonetos e processos industriais que utilizam o controle de processos e o controle de produção, há a necessidade de técnicas para a medição de algumas grandezas físicas essenciais, como: pressão, temperatura, vazão, nível, condutividade, pH, oxigênio e densidade. E entre essas grandezas físicas medidas em processos químicos industriais, a medida da vazão é a terceira mais importante, perdendo somente para a medida de pressão e temperatura (MATA, 2004), mas quando trata-se do controle da quantidade de fluido que escoar numa linha de produção, quer seja em volume ou massa a medida de vazão é fundamental. A escolha do medidor de vazão¹ é influenciada por vários fatores, dentre os quais se destacam: a precisão exigida; a faixa de operação; o custo; a complexidade; a facilidade de leitura e o tempo de vida em serviço. Existe uma ampla faixa para a aplicação de medidores de vazão que vai desde as características físicas e químicas do fluido até estrutura da fábrica. Além disso, existe uma grande variedade de medidores de vazão cada qual com suas variáveis físicas mensuráveis. Os medidores de vazão podem ou não estar em contato com o fluido e com isso ser classificados, de uma maneira geral, em (DELMÉE, 1995):

- Medidores Intrusivos: estes medidores estão em contato direto com o fluido, isto é, são instalados no interior das tubulações onde o fluido circula. Os medidores intrusivos possuem posições fixas e devem ser instalados no ponto em que se pretende fazer a medição, determinado pelo projeto de engenharia. Exemplos de medidores intrusivos são os medidores tipo Venturi e os tipo Placa de Orifícios. Ambos baseiam-se na medição de vazão

¹Os medidores de vazão são dispositivos que nos fornecem a quantidade de líquido ou gás, em massa ou em volume, que passa por uma secção transversal em um dado intervalo de tempo.

através da relação diferencial de pressão entre as seções transversais de maior e menor área do medidor, valendo-se do teorema de Bernoulli². Como o medidor está em contato com o fluido, este torna-se um obstáculo ao percurso do mesmo, ocasionando, assim, perdas de carga, podendo ainda sofrer contaminação ou incrustação.

- **Medidores Não-Intrusivos:** os medidores não intrusivos destacam-se por não necessitarem do contato direto com o fluido que está escoando. Podemos citar como exemplo de medidores não-intrusivos, os medidores de vazão eletromagnéticos e os medidores de vazão ultrassônicos. Os medidores eletromagnéticos utilizam como meio de funcionamento o princípio da indução magnética, baseado na Lei de Faraday ou Lei da indução magnética³. Os medidores ultrassônicos operam através da manipulação dos feixes de ultrassom. Análogo ao que ocorre com os feixes óticos, os quais podem ser focados ou direcionados, e também podem sofrer os fenômenos da refração e reflexão total. Os medidores de vazão por ultrassom podem utilizar como princípio de funcionamento o efeito Doppler ou o tempo de trânsito.

Como os medidores intrusivos estão em contato direto com o fluido, isso pode provocar perdas de carga na linha de transporte devido a incrustação de materiais no medidor, o que pode alterar o valor real da medida de vazão. Isso viabiliza o uso de medidores não intrusivos. O fato de não estarem em contato direto com o fluido, diminui as perdas e distúrbios no escoamento. Isso dá a essa classe de medidores uma enorme portabilidade, pois os equipamentos de medição poderão ser instalados ou removidos sem a necessidade da paralisação da linha de produção. A ausência de atrito ou incrustação de materiais pelo fluido que está escoando e também a ausência de contaminação no medidor, aumenta a vida útil desses medidores de vazão não intrusivos. Com essas vantagens, a pesquisa e o desenvolvimento de medidores de vazão não intrusivos tornou-se atrativa para as indústrias.

Os medidores de vazão utilizam os mais variados princípios físicos para o seu funcionamento, cada medidor tem sua faixa de aplicação e suas limitações. E isso não é diferente para os medidores de vazão não intrusivos eletromagnéticos e ultrassônicos, que também possuem suas limitações (DELMÉE, 1995):

- O funcionamento dos medidores de vazão por Indução Magnética baseiam-se na Lei de Faraday ou Lei da indução magnética. O princípio de funcionamento destes medidores

²O físico suíço Daniel Bernoulli, 1700-1782, encontrou uma relação entre a velocidade e a pressão para o escoamento dos fluidos: "Quando a velocidade de uma partícula de um fluido aumenta durante o escoamento ao longo de sua trajetória, a pressão do fluido deve diminuir e vice-versa".

³Físico e químico britânico Michael Faraday, 1791-1867, introduziu os conceitos para a formulação da lei da indução magnética, que consiste na geração de corrente elétrica através de um condutor sob a influência de um campo magnético variável ou por um condutor em movimento em um campo magnético constante.

está em aplicar um campo magnético no plano perpendicular ao fluxo do fluido, o qual deverá ser um condutor. Quando este fluido condutor se desloca no campo magnético gera uma força eletromotriz nas extremidades do tubo de escoamento proporcional à intensidade do campo magnético, ao seu comprimento e a velocidade de deslocamento. Os medidores por indução eletromagnética destinam-se ao escoamento de líquidos com condutividade elétrica acima de $100 \mu S/m$ e com velocidade de escoamento acima de $0,3 m/s$. Não possuem problemas para a medição de vazão em baixas temperaturas mas no caso de altas temperaturas são limitadas em $150^\circ C$. Outro fator relevante, está no fato de que a força eletromotriz gerada deve ser da ordem de microvolts necessitando de proteção adequada do sinal gerado, proporcionando assim um sinal com baixo ruído.

- O funcionamento dos medidores ultrassônicos ocorre por meio de transdutores e receptores, que emitem e recebem feixes de ondas ultrassônicas. No caso dos transdutores o seu formato podem convergir, divergir ou alinhar o feixe ultrassônico, semelhante ao que ocorre aos feixes óticos com o uso de lentes. Os medidores ultrassônicos podem operar por efeito Doppler ou tempo de transito e só apresentam resultados confiáveis para um regime turbulento ou com presença de partículas.

Os medidores não-intrusivos eletromagnéticos e ultrassônicos possuem, em casos específicos, algumas desvantagens em relação à sua utilização, mas as vantagens oferecidas por esses medidores proporcionou uma crescente busca por novas técnicas de medição não-intrusivas de vazão. Como alternativa para novas técnicas de medição não-intrusiva de vazão, está o emprego de técnicas termométricas⁴. A técnica de medida de vazão por termometria consiste, em um determinado intervalo de tempo, criar uma variação brusca da temperatura de um pequeno volume do fluido, o qual estará escoando na tubulação, e acompanhar a variação da temperatura em dois ou mais pontos distintos. Essa mudança de temperatura é observada através de sensores de temperatura, S_1 e S_2 , que estão posicionados em dois pontos afastados por uma distância d conhecida, ao longo da superfície externa na direção axial. Com a obtenção da diferença de tempo da chegada do pulso térmico em cada sensor, pode-se inferir a diferença de tempo Δt a uma variação de temperatura entre os sensores. Fazendo a razão da distância d pela diferença do tempo de variação de temperatura entre os sensores de temperatura, Δt , obtemos a velocidade média de escoamento do fluido, \bar{v} . Como os parâmetros do tubo onde o fluido escoar são conhecidos, pode-se encontrar indiretamente a vazão, estabelecendo uma razão da massa ou volume do fluido que escoar em uma seção transversal por um determinado intervalo de tempo t .

⁴Termometria é uma parte da termologia que estuda as relações entre a temperatura e outras grandezas termométricas através de um instrumento conhecido como termômetro.

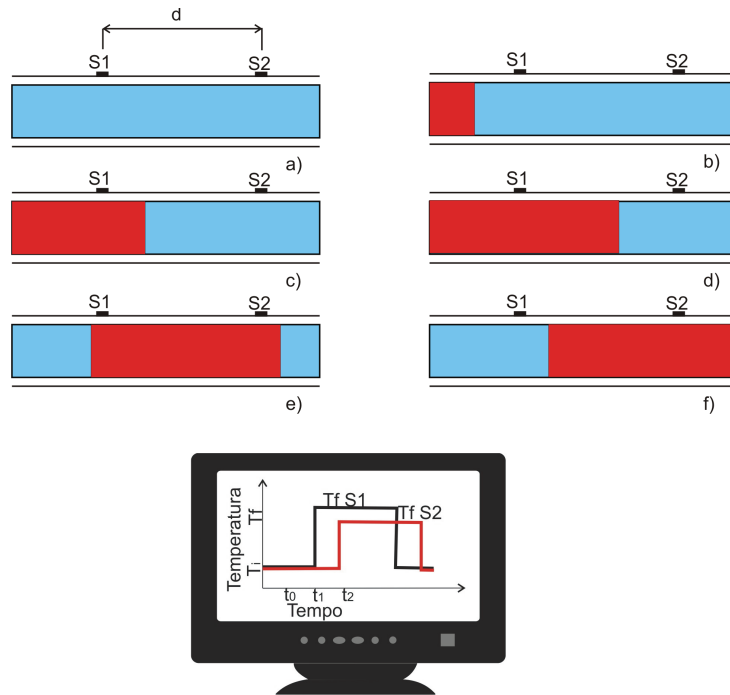


Figura 1: Representação esquemática do sistema de medição não-intrusiva de vazão por termometria. Os itens *a,b,c,d,e* e *f* representam o tubo, no qual escoam um fluido e na parede externa do duto estão fixados os sensores de temperatura S_1 e S_2 separados por uma distância d . O item *a* representa o fluxo de um fluido com temperatura T_1 escoando dentro de um tubo, nesta condição ambos os sensores registram a mesma temperatura T_1 . No item *b* é liberado um pulso térmico com uma temperatura T_2 onde $T_2 > T_1$ num determinado instante de tempo inicial t_0 . O item *c* representa a chegada do pulso térmico no primeiro sensor S_1 no intervalo de tempo t_1 , neste caso o sensor S_1 está com temperatura T_2 e o sensor S_2 está com temperatura T_1 . O item *d* representa o pulso térmico entre os sensores S_1 e S_2 , onde o sensor S_1 está a uma temperatura T_2 e o sensor S_2 a uma temperatura T_1 . O item *e* representa o instante da chegada do pulso térmico no segundo sensor S_2 no tempo t_2 , neste ponto representativo ambos os sensores estão na temperatura T_2 . O item *f* representa o final do pulso térmico após passar o primeiro sensor no tempo t_3 , neste momento o primeiro sensor S_1 no intervalo de tempo t_3 está com temperatura T_1 e o sensor S_2 está com temperatura T_2 . O item *g* representa um sistema de monitoramento em tempo real.

A Figura 1 representa esquematicamente o sistema de medição de vazão não-intrusiva por termometria. Os itens *a, b, c, d, e* e *f* representam o tubo, no qual escoam um fluido e na parede externa do tubo estão fixados os sensores de temperatura S_1 e S_2 separados por uma distância d , estes itens representando a evolução do pulso térmico com o passar do tempo. O item *a* representa o fluxo de um fluido com temperatura T_1 escoando dentro de um tubo. Nesta condição ambos os sensores registram a mesma temperatura T_1 . No item *b* é liberado um pulso térmico com uma temperatura T_2 onde $T_2 > T_1$ num determinado instante de tempo inicial t_0 . O item *c* representa a chegada do pulso térmico no primeiro sensor S_1 no intervalo de tempo t_1 , neste caso o sensor S_1 está com temperatura T_2 e o sensor S_2 está com temperatura T_1 . O item *d* representa o pulso térmico entre os sensores S_1 e S_2 , onde o sensor S_1 está a uma temperatura

T_2 e o sensor S_2 a uma temperatura T_1 . O item e representa o instante da chegada do pulso térmico no segundo sensor S_2 no tempo t_2 . Neste ponto representativo, ambos os sensores estão na temperatura T_2 . O item f representa o final do pulso térmico após passar o primeiro sensor no tempo t_3 , neste momento o primeiro sensor S_1 no intervalo de tempo t_3 está com temperatura T_1 e o sensor S_2 está com temperatura T_2 . O item g representa um sistema de monitoramento em tempo real.

Na aplicação da técnica de medição não-intrusiva por termometria para a obtenção da velocidade média, devemos levar em consideração alguns requisitos que são importantes, como uma frente de onda bem definida para o pulso térmico, e a transferência de calor do fluido até a parede externa deverá acontecer o mais rápido possível. Isso é um problema pois na realidade a temperatura obtida pelo sensor é levemente menor devido a trocas de calor entre a parede do tubo e o ambiente. Para resolver este problema deve-se usar sensores de temperatura cuja a resposta seja imediata com a variação de temperatura, o que diminui o tempo de coleta de dados e com isso há uma menor troca térmica com o ambiente (MACHADO et al., 2005a).

A proposta do presente trabalho é utilizar sensores de temperatura baseados em redes de Bragg gravadas em fibras óticas, cuja técnica de fabricação e interrogação⁵ é dominada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, pelo grupo de dispositivos fotônicos. A modelagem matemática do problema físico e a identificação das situações onde a técnica não-intrusiva de medição da velocidade média de escoamento de fluidos através da termometria é viável, já foram iniciadas e resultados preliminares foram apresentados pelo Laboratório de Ciências Térmicas da UTFPR por Machado (MACHADO et al., 2005a). O problema estudado é o problema transitório da convecção-condução de calor do escoamento em tubulações. Com o estudo realizado mostrou-se a viabilidade de inferir a vazão através da medição da temperatura na parede externa da tubulação em dois pontos distintos.

1.1 MOTIVAÇÕES

Com o advento do laser e a descoberta das fibras óticas com baixas perdas, as transmissões de sinais via cabos óticos tornou-se viável. Com a descoberta dos efeitos não lineares na fibra foi possível desenvolver sensores de deformação e temperatura na própria fibra ótica. Hoje a tecnologia empregada para os sistemas de sensores óticos já é dominada e sua construção já é realizada no Laboratório de Nano Estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Além desses sensores serem usados em comunicações, os sensores óticos podem ser usados na indústria civil, mecânica, elétrica e química. Estes sensores são usados para avaliar propriedades físicas, principalmente temperatura e pressão e podem ser usados nas mais diversas

⁵Interrogação é o método ou sistema pelo qual é realizado a leitura do sinal fornecido pelos sensores.

estruturas como: pontes, edifícios, estruturas metálicas, veículos, entre outros.

O uso dos sensores em fibras óticas estão ganhando mercado na área petrolífera, onde já estão sendo implementados em tubos para a monitoração de vazamentos, pressão e temperatura, em tempo real. Isso pode ser comprovado com as várias empresas que atuam na comercialização de sensores para o ramo petrolífero como a CIDRA Corporation (GYSLING, 2009), OptoIQ, SMART FIBRES, Gávea Sensors (SENSORS, 2009), entre outras. As redes de Bragg gravadas em fibras óticas, FBG⁶, são componentes comuns hoje em redes de telecomunicações e vêm sendo extensamente exploradas em aplicações de sensoriamento por um grande número de pesquisadores e grupos comerciais desde a década passada. No campo petrolífero de *Kern River*, próximo a *Bakersfield*, na Califórnia, em 1999 foi instalado o primeiro sensor baseado em redes de Bragg operacional para medição de temperatura e pressão em poços petrolíferos a uma profundidade de 670m (GYSLING, 2009).

Com o emprego das FBG's na área petrolífera para a medição de temperatura, pressão e vazamentos, o uso destes sensores em fibras óticas para outros fins, como por exemplo na medição de vazão, tornou-se bastante atrativo. Os medidores de vazão devem satisfazer a exigências de desempenho, confiabilidade, facilidade de instalação, manutenção e manuseio. Deve-se levar em conta, ainda, os custos de instalação e os custos operacionais, que deverão ser compatíveis com a aplicação e com as demais tecnologias disponíveis. A tecnologia empregada para os sistemas de sensores óticos já é dominada e utilizada em sistemas de comunicação e transmissão de dados e seu uso está sendo realizado pela PETROBRAS, no monitoramento de grandezas físicas durante o escoamento de petróleo, na área de poços inteligentes e polidutos, particularmente utilizando Redes de Bragg (FBG). A PETROBRAS tem projetos com a empresa *Gávea Sensors*⁷ para a monitoramento de pressão e temperatura utilizando sensores de Redes de Bragg, que já foram instalados em poços de teste. Assim é natural utilizar a mesma tecnologia para monitoramento de outras grandezas, como é o caso da vazão de óleos pesados (SENSORS, 2009).

O uso da mesma tecnologia pode significar redução dos custos na aparelhagem eletrônica de interrogação dos sensores, bem como na própria produção nacional dos sensores de redes de Bragg. Além disso, acrescenta um novo elemento à família de sensores, permitindo maior flexibilidade operacional e compatibilidade de *software* de controle já existente. Em caso de instalação disseminada, o melhor controle de fluxo pode levar a economia de escala nas áreas de produção, transporte e controle de processos. Devido às vantagens das medições não-intrusivas e das limitações técnicas ou econômicas dos medidores atualmente disponíveis no mercado, o

⁶O termo FBG vem do inglês, *Fiber Bragg Gratings*. Outra denominação usada para estes sensores é redes de Bragg.

⁷http://www.gaveasensors.com.br/instalacoes_petroleo_monitoramento.html

estudo da viabilidade da medição de vazão empregando técnicas termométricas é altamente interessante para a indústria e estas técnicas termométricas possuem uma enorme potencialidade de aplicação em escoamentos submetidos a uma variação de temperatura.

1.2 OBJETIVOS

O presente projeto tem por objetivo mostrar a viabilidade de medir vazão de líquidos neste caso, um líquido homogêneo utilizando termometria diferencial por meio de redes de Bragg, juntamente com a montagem do protótipo instrumental. A técnica consiste em medir a variação de temperatura ao longo da tubulação após passar um pequeno volume de líquido quente em seu interior. Com isso é medida a variação de temperatura em dois pontos distintos na superfície externa da tubulação separados por uma distância d conhecida. Através da diferença do tempo que o fluido quente leva para percorrer a distância entre os sensores, pode-se estimar o tempo t de transporte do fluido entre os pontos de medição. A razão da distância d para o tempo t de transporte pode ser correlacionada com a velocidade média de escoamento \bar{v} e conhecendo-se as dimensões da tubulação pode-se estimar a vazão Q do fluido. A modelagem matemática do problema físico e a identificação das situações onde a técnica pode ser empregada já foram iniciadas junto com a construção da bancada experimental (MACHADO et al., 2005a).

Neste trabalho serão utilizados sensores de temperatura baseados em redes de Bragg gravados em fibras óticas, os quais possuem tempo de resposta, à variação de temperatura, quase instantâneo, bem como alta sensibilidade a variações de temperatura. Com o sistema de medição não intrusivo termométrico pretende-se cobrir uma ampla faixa na vazão dos fluidos, desde o regime laminar até o regime turbulento. Adicionalmente, podem-se iniciar estudos visando o uso dessa técnica em emulsões, oriundas da mistura de fluidos ou mesmo gases. Em estágio posterior pretende-se estudar os resultados quando os sensores são introduzidos no próprio fluido em escoamento. Um trabalho recente já demonstrou que as redes de Bragg podem ser utilizadas para reconstruir o perfil de velocidade de fluidos em escoamento, inserindo as redes dentro do tubo (KUSTERS et al., 2002). As questões a serem estudadas nessa situação dizem respeito principalmente à confiabilidade da resposta do elemento sensor em contato com o fluido (MACHADO et al., 2005a; KUSTERS et al., 2002; GRABARSKI et al., 2007).

1.2.1 Objetivo Geral

Os objetivos gerais são: *i*) a instalação e montagem da bancada de testes para medição não-intrusiva da velocidade média de escoamento de fluidos através de técnicas termométricas; *ii*) Montagem do sistema de aquisição de dados; *iii*) Montagem do sistema de gravação redes de Bragg em fibra ótica através do processo de gravação direta por máscara de fase; *iv*) Construção dos sensores de temperaturas baseados em redes de Bragg escritas em fibras óticas; *v*)

Implementação dos sensores de FBG para a medição não-intrusiva do escoamento de fluidos através da termometria.

1.2.2 Objetivo Específico

O objetivo deste trabalho é a implementação de sensores de FBG como sensores de temperatura no experimento de medição não-intrusiva de vazão através da termometria bem como seu sistema de interrogação. Os sensores de FBG utilizados no trabalho foram fabricados no laboratório de nano-estruturas da UTFPR, LANOE, através do método de gravação com máscara de fase usando um laser de Excímero. Montagem do sistema de interrogação dos sensores de FBG através do uso de filtros fixos. Depois da montagem do sistema de interrogação foi realizada a montagem do sistema de aquisição de dados e monitoração em tempo real da temperatura. No final do trabalho são comparados a resposta dos sensores térmicos comerciais, termopares tipo T, com os sensores de FBG feitos na UTFPR.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos: no primeiro capítulo faz-se uma breve introdução da técnica não-intrusiva termométrica para medição da velocidade média do escoamento de um fluido. Neste capítulo estão focados os objetivos deste trabalho. O segundo capítulo apresenta os avanços científicos ocorridos na área de termometria, medição de vazão e em sensores óticos baseados em redes de Bragg necessários para a execução do trabalho. O terceiro capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho. É apresentada uma introdução da medição de vazão onde serão abordados os conceitos físicos necessários para a medição de vazão, conceitos de termometria e os tipos de medidores de vazão existentes e sobre os sensores óticos baseados em redes de Bragg. No quarto capítulo é apresentada a metodologia adotada para a medição de velocidade média de escoamento não-intrusiva através da termometria, assim como o procedimento experimental, o sistema de controle, o sistema de aquisição de dados e a calibração dos sensores. No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos bem como a sua discussão, abordagem dos sensores convencionais e dos sensores óticos. No sexto capítulo são apresentadas a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O primeiro capítulo apresentou uma breve introdução da técnica não-intrusiva termométrica para a medição da velocidade média de escoamento de um fluido em um tubo. Para aplicar a técnica não-intrusiva termométrica na medição de vazão, necessitamos de conhecimentos de diversas áreas, como por exemplo, o uso de sensores gravados em fibras óticas ou transmissão de informação em fibras óticas, assim como em áreas cuja a fundamentação teórica e experimental está solidificada, como por exemplo, a termometria e a medição de vazão. Neste Capítulo iremos discutir de onde veio a necessidade de se medir a vazão, e de modo simples, exemplificar a importância do desenvolvimento de medidores de vazão cada vez mais precisos, e como o presente trabalho irá utilizar a termometria como recurso no desenvolvimento do medidor de vazão. Abordaremos suas origens, bem como os estudos realizados na transmissão de calor, mostrando sua viabilidade. Por último será abordado o desenvolvimento da tecnologia por trás dos sensores óticos de temperatura baseados em redes de Bragg.

Os itens abordados neste capítulo são:

- Medição de Vazão
- Termometria
- Sensores em Fibra Ótica

2.1 MEDIÇÃO DE VAZÃO

O homem sempre buscou conforto e bem estar, quer seja no trabalho ou em sua residência. Podemos usar como exemplo a canalização de água e esgoto em suas moradias, que junto aos esforços da comunidade, beneficiam todos com este serviço. Para continuar a usufruir de água potável e saneamento, estabeleceu-se um sistema de manutenção, que cobrava e hoje ainda cobra pelos seus serviços, e assim cada casa paga pela quantidade de água consumida. Com a finalidade de registrar a quantidade de água consumida, desenvolveu-se dispositivos que medem a vazão, neste caso, o hidrômetro. O termo vazão refere-se a uma quantidade física de fluido¹, volume ou massa, que passa por uma seção reta de um tubo por um determinado

¹Fluido é uma substância que se deforma quando submetida a uma tensão de cisalhamento independente da intensidade dessa tensão. Pode ser líquido ou gás. Fluidos não resistem a uma deformação e tomam a forma de

período de tempo. Mesmo o homem tendo canalizado a água em suas residências no período Romano, a grande contribuição na medição de vazão foi proposta em 1502 por Leonardo da Vinci (UPP; LANASA, 2002). Ele observou que a quantidade de água por unidade de tempo que escoava num rio era a mesma em qualquer parte de seu curso, independente da geometria de sua seção transversal. Mais tarde, no século XIX, com o advento das indústrias, surgiram os processos industriais, os quais necessitaram do desenvolvimento de dispositivos práticos que auxiliassem a produção. Isso foi possível graças ao trabalho de pesquisadores como Bernoulli², Pitot³, Reynolds⁴ entre outros. No começo da era industrial, os processos eram realizados na forma de bateladas⁵, mas com a evolução das indústrias, o aumento de produção e a demanda de produtos, os processos industriais evoluíram para fluxo contínuo, gerando a necessidade do desenvolvimento de medidores de vazão (DELMÉE, 1995). Hoje os medidores de vazão estão presentes no transporte de fluido na indústria petrolífera, nos serviços públicos com abastecimento e saneamento, e na indústria geral no controle de fluxo de fluido ou na contabilização do total consumido em determinada linha de produção. Como mencionado anteriormente, a medida de vazão tornou-se um evento diário em nossas vidas e já estamos acostumados com medidores de vazão domésticos como, o hidrômetro, os medidores de gás e ainda temos os medidores de combustível nos postos de abastecimento (UPP; LANASA, 2002; WEBSTER, 2000a). Hoje com o crescente aumento da exploração de petróleo, transporte de hidrocarbonetos e processos industriais, o uso do controle de processos e o uso do controle de produção necessitam de técnicas para a medição de algumas grandezas físicas principais como: pressão, temperatura, vazão, nível, condutividade, pH, oxigênio e densidade. Entre as grandezas físicas medidas em processos químicos industriais a medida da vazão é a terceira mais importante, perdendo somente pela medida de pressão e temperatura (MATA, 2004).

seus recipientes.

²Matemático holandês Daniel Bernoulli, 1700-1782, propôs o Teorema de Bernoulli, o qual associa a velocidade de escoamento com a pressão. Seu teorema foi fundamental para o desenvolvimento de inúmeros medidores de vazão entre eles o da placa de orifícios e o venturi.

³Engenheiro hidráulico, o francês Henry Pitot, 1695-1771, desenvolveu um dispositivo para medir a velocidade de fluidos, o qual ficou conhecido como tubos de Pitot.

⁴Físico britânico Osborne Reynolds, 1842-1912, classificou o regime de escoamento de fluidos através de um coeficiente adimensional conhecido como número de Reynolds.

⁵É um sistema no qual ocorre o bombeamento do fluido em um reservatório onde há um sensor, quando o nível do fluido atinge o sensor a bomba joga esse líquido do reservatório para a estação de tratamento, e depois desliga, voltando a ligar novamente, assim que o nível atingir novamente o sensor da bomba. O liga e desliga desse ciclo é contínuo, a isso se dá o nome de batelada.

2.2 TERMOMETRIA

A termometria⁶ é a ramificação da física preocupada em estudar a medição da temperatura através do uso de um dispositivo conhecido como termômetro. O termômetro, um dispositivo tão usual hoje, teve uma evolução lenta até Idade Média, mas com a difusão de seu uso em experiências, houve um enorme aperfeiçoamento deste dispositivo, atuando com grande importância no desenvolvimento da termodinâmica, como veremos a frente. Para a aplicação da termometria na obtenção da medida de vazão de fluidos, devemos conhecer o problema da condução de calor através de uma parede, que será tratado na sessão 2.2.2.

2.2.1 Termômetros

A sensação de frio ou calor é conhecida desde a existência do homem, principalmente com a descoberta do fogo e seu uso na construção de cerâmicas e utensílios. A primeira civilização a tentar estimar escalas para as nuances de calor foram os gregos. No século VI a.C., eles tentaram descrever os graus de muito quente, muito frio, pouco quente, pouco frio e assim por diante. Os gregos realizaram experiências rudimentares entre as quais muitos experimentos com a expansão do ar. Por volta de 300 a.C. foi desenvolvido um instrumento que mostrava a relação entre a expansão do ar e a variação de temperatura, o qual seria conhecido posteriormente no século XVII como termoscópio⁷. Alguns médicos nos primeiros períodos deste século, tentaram representar com valores os diversos graus de temperatura, mas as escalas de temperatura só foram criadas na Idade Moderna⁸ com a construção de instrumentos cada vez mais sofisticados e precisos. O primeiro deles foi desenvolvido por Galileu Galilei⁹ em 1592, constituindo um novo tipo de termoscópio¹⁰, o qual estava em contato com o ar sofrendo a influência da pressão atmosférica. A primeira pessoa a adotar uma escala termométrica no termoscópio foi o médico italiano Santório Santórii em 1611, sendo o precursor do termômetro clínico. Os avanços seguintes no termômetro ocorreram por volta de 1630, quando da substituição do ar como substância termométrica por água, álcool e mercúrio. Outra mudança significativa foi isolar a substância termométrica da atmosfera através do fechamento de sua extremidade, realizado pelo soberano italiano Ferdinando II de Toscana por volta de 1644. Conjuntamente, eram desenvolvidos termômetros cuja substância termométrica era o ar. Em 1672, foi construído o

⁶Parte da terminologia que estuda a medição de temperaturas e as medidas e os padrões estabelecidos e a tecnologia empregada para esta medição. Definição fornecida pelo dicionário digital Aulete.

⁷Dispositivo semelhante a um barômetro só que com a finalidade de estudar o calor radiante, a diferença entre esse dispositivo e o barômetro estava na extremidade superior do tubo com o formato de uma esfera que quando aquecida comprimia a substância termométrica podendo assim observar a variação de calor.

⁸Período histórico que vai do século XV ao XVIII.

⁹Físico italiano nascido em 1564, considerado o pai da ciência moderna pelo uso do método empírico.

¹⁰O termoscópio de Galilei constituía de um frasco de vidro com gargalo muito estreito preenchido de água colorida até a metade e mergulhado de cabeça para baixo num recipiente com o mesmo líquido colorido, com a variação de temperatura o ar expandiria ou contrairia movendo a coluna de água.

primeiro termômetro a ar sem influência da pressão atmosférica. Com o desenvolvimento da ciência a necessidade de escalas termométricas mais precisas tornava-se essencial. Mas só no final do século XVII o francês Joachin Dalencé demonstrou que uma escala termométrica deve ser definida através de duas temperaturas fixas e não a partir de uma somente. Essa idéia revolucionou a escolha de escalas termométricas. Um exemplo disso foi o trabalho de Isaac Newton em 1701¹¹ apresentando uma escala de graus de calor, onde o 0 era o calor do ar de inverno onde a água começava a congelar, e finalizando em 192 que representava o calor da brasa de uma pequena cozinha, alimentada por um fole. Em 1724 Fahrenheit apresentou sua escala termométrica, onde o zero correspondia ao congelamento de uma solução de gelo e sal e a temperatura do sangue humano. Fahrenheit construiu um termômetro usando mercúrio depurado com o qual conseguia medir temperaturas acima do ponto de ebulição da água e abaixo de seu ponto de fusão, esse termômetro possuía mais precisão devido a escalas mais finas. Ainda na metade do século XVIII surgiram outras duas escalas ainda usuais o Reamur em 1730 e a Célcius em 1742. Nesta época surgiram inúmeras escalas termométricas com pontos fixos arbitrários e com a escolha das substâncias termométricas com respostas diferentes à variação da temperatura, gerando inúmeras dificuldades para o desenvolvimento da termometria. Christiaan Huygens, Ole Römer e Gabriel Daniel Fahrenheit propuseram a criação de uma escala termométrica calibrada mostrando a necessidade da padronização das medidas de temperatura. Isso torna fácil compreender que cada substância termométrica tem uma característica própria, como no exemplo da água que aumenta seu volume próximo à temperatura de congelamento. Com o uso e o avanço dos termômetros a gás, algumas dificuldades em relação as medidas foram transpostas. Esses termômetros comportavam-se igualmente, independente da variação de temperatura e suas propriedades como volume e pressão poderiam ser usadas em escalas termométricas. Mas ainda existiam discrepâncias entre as medidas para diferentes gases. Em 1848, Lord Kelvin¹² propôs uma escala que fosse independente da escala termométrica utilizada. Kelvin adotou a escala centesimal de Celsius e o zero absoluto estipulado por Amontons¹³, que na escala Célcius possui o valor $-273,7^{\circ}\text{C}$, criando a escala Kelvin. O zero absoluto era a temperatura quando a energia cinética das moléculas seria nula. Com a escala Kelvin pode-se padronizar as demais escalas em dois pontos fixos, fusão e ebulição da água, isso se tornou conveniente para a termometria. No começo do século XIX, além dos gases e líquidos, os sólidos começaram a ser utilizados como termômetros, isso devido à descoberta de algumas propriedades que se alternavam com a variação de temperatura. Em 1821, o químico inglês Sir Humphry Davy observou

¹¹Trabalho publicado no volume 22 do Philosophical Transactions.

¹²Físico e matemático escocês Willian Thomson, 1804 a 1907.

¹³Físico francês Guillaume Amontons, 1633 a 1705, mostrou que a água sempre fervia à mesma temperatura e que cada gás a um volume constante variava igualmente de pressão com uma mesma mudança de temperatura e devido a esses resultados concluiu que existiria um ponto de frio máximo, um estado de repouso absoluto.

a condutividade de diferentes metais e percebeu que esta condutividade mudava com o aumento da temperatura. O primeiro termômetro a utilizar a resistência em função da temperatura foi construído por Willian Siemens em 1871, cuja a substância termométrica foi a platina¹⁴. Outra categoria de termômetros constituídos de substâncias termométricas sólidas foram os termômetros semicondutores de resistência, também conhecidos como termistores. Os termistores são bem mais sensíveis que os termômetros de platina. Por outro lado são menos estáveis. Com a descoberta do efeito termoelétrico também conhecido como efeito Seebeck¹⁵, onde temos dois metais diferentes soldados em uma extremidade formando uma junção que, quando submetida a uma diferença de temperatura, gera uma força eletromotriz entre os metais diferentes. Os termômetros construídos usando o princípio do efeito Seebeck são conhecidos como termopares. A principal vantagem entre o termopar e os outros termômetros existentes, até então, está no fato de que, devido a sua pequena massa, o equilíbrio térmico é atingido rapidamente quando em contato com um outro sistema no qual deseja-se medir a temperatura. Como comentado no início, o homem teve contato com o fogo desde sua origem e percebeu uma relação entre o calor e a radiação emitida por um corpo quente. Mas a medição da radiação emitida por um corpo em função da temperatura só foi realizada nas décadas finais do século XIX, desenvolvendo-se assim os termômetros de radiação ou pirômetros. Os pirômetros tornaram-se usuais depois que o físico alemão Max Karl Ernest Planck obteve uma função da intensidade da radiação em relação ao comprimento e à temperatura absoluta(BASSALO, 1991; ZYTEMP, 2009).

Como vimos até agora, para se construir um termômetro necessitamos de uma propriedade física que sofra variação com a temperatura e hoje existem os mais variados tipos de termômetros. Como exemplos de outros termômetros construídos temos: termômetros constituídos de bimetais, que mostram a variação de temperatura através da dilatação dos metais; os termômetros acústicos que beneficiam-se da variação da velocidade de propagação de uma onda sonora ser dependente da temperatura; os termômetros magnéticos usando como propriedade física sensível à temperatura a susceptibilidade magnética e como último exemplo temos termômetros óticos baseados em redes de Bragg escritas no núcleo de uma fibra ótica. Os termômetros óticos ou sensores de temperatura baseados em redes de Bragg serão abordados com mais detalhes nas próximas seções mas o seu desenvolvimento deu-se com a descoberta da mudança do índice de refração para a luz guiada em materiais de sílica, realizada por Hill em 1978 (HILL; MELTZ, 1997), cujo o objetivo era o seu uso como filtros para sistemas de comunicação ótica. Hill relatou uma dependência com a temperatura e a deformação da fibra as quais afetariam dramaticamente a resposta dos filtros, mas não o seu uso em sensores de tem-

¹⁴O físico inglês Hugh Longbourne Callendar, 1863 a 1930, demonstrou a estabilidade e precisão na medida de temperatura por termômetros de resistência usando platina como substância termoelétrica

¹⁵Físico russo-alemão Thomas Jonham Seebeck, 1770 a 1831.

peratura. Outra revolução no desenvolvimento dos sensores de temperatura baseados em redes de Bragg gravados em fibra ótica está no aperfeiçoamento do processo de escrita das redes de Bragg divulgado por Meltz em 1989 (MELTZ et al., 1999).

O presente trabalho de medição não-intrusivo de vazão através do uso da termometria usa como sensor de temperatura: sensores baseados em redes de Bragg inscritas em fibras óticas, FBG. A técnica de gravação das FBG é dominada no Laboratório de Nano-Estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

O grande problema de se utilizar o sistema de medição não-intrusivo de velocidade média de escoamento de fluidos em tubos através de técnicas termométricas está no problema físico que envolve a convecção-condução conjugadas em regime transitório. Isso por que o sensor de temperatura está aderido à parede externa do tubo e o objetivo é obter a resposta à variação de temperatura do fluido que escoar dentro do tubo. Para chegar à compreensão do problema da convecção-condução conjugadas em regime transitório, inúmeros estudos foram realizados. Piva propôs uma solução analítica para prever o desenvolvimento completo do número de Nusselt¹⁶ para um fluxo laminar dentro de tubos com o perfil circular, levantando exponencialmente o calor (PIVA, 1995).

Após isso, alguns pesquisadores estudaram a transferência de calor em tubos sugerindo mudanças nas condições de contorno ou nas condições de entrada do fluido. Essas mudanças estavam na consideração de uma parede extremamente fina nas tubulações. Com isso poderia ser desconsiderado o efeito de condução na parede, permanecendo a mesma condição de temperatura na parede interna para a parede externa (SUCEC, 2002; BILIR, 1995; BILIR; ATES, 2003; YAPICI; ALBAYRAK, 2004).

Ainda, com os trabalhos de Bilir, procurou-se determinar os parâmetros de influência e seus efeitos no problema da transferência de calor em escoamentos transitórios. Esses parâmetros são associados às características básicas do sistema, levando em conta o valor da espessura da parede do tubo em relação ao diâmetro interno do tubo, a razão das difusibilidades térmicas e condutividades térmicas do sólido e do fluido, a relação da velocidade média axial do fluido com a difusibilidade térmica do fluido e por último o coeficiente de transferência de calor da superfície externa do tubo pela convecção térmica do tubo. Com o trabalho de Campo e Schuler (1988) sobre a transferência de calor em escoamentos em tubos, através do aquecimento de um determinado intervalo na parede do tubo, foi evidenciado os parâmetros de influência citados acima (CAMPO; SCHULER, 1988).

Foi realizada uma análise experimental quanto ao efeito da condução de calor axial na parede de tubos uniformemente aquecidos no qual escoavam fluidos laminares permanentes.

¹⁶O número de Nusselt estabelece uma relação entre o fluxo de calor por convecção e o fluxo de calor por condução no próprio fluido.

Neste trabalho foram comparados o escoamento totalmente desenvolvido e o parcialmente desenvolvido. Os resultados para os dois tipos de escoamento foram similares, evidenciando o aumento do fluxo de calor entre o sólido e o fluido devido à condução de calor axial na parede do tubo (BAROZZI; PAGLIARINI, 1984).

Ainda com trabalhos teóricos foi possível demonstrar que em uma região pré-aquecida, o fluxo de calor na parede tubo de pequena espessura em relação ao diâmetro, varia exponencialmente oferecendo uma maneira de calcular a relação entre a transferência de calor por convecção e a transferência de calor por condução no fluido, conhecido como número de Nusselt, dependendo da condutividade térmica da parede do tubo e da relação da velocidade média do fluido na direção axial pela difusibilidade térmica do fluido (BILIR, 1995).

Estudos numéricos sobre a transferência de calor conjugado no regime transitório, foram feitos por inúmeros pesquisadores, entre os quais destacam-se, Suec e Bilir. Os estudos de transferência de calor foram realizados com tubos colocados em contato com ambiente com uma súbita mudança de temperatura e posteriormente feitos estudos sobre a transferência de calor conjugada em escoamentos em tubos com aquecimento na parede (SUCEC, 2002; BILIR; ATES, 2003).

Um trabalho que fornece uma ferramenta para a análise de experimentos relativos à transferência de calor transitório em tubos foi realizado por Bilir e Ates (2003). O problema que estudaram consistia em um sistema a uma temperatura inicial T_i . Em determinado tempo a temperatura ambiente era elevada a uma nova temperatura T_f , permanecendo constante até o regime tornar-se permanente. Neste trabalho os autores, Bilir e Ates, resolveram o problema através do método de diferenças finitas¹⁷ e ainda realizaram simulações para verificar a dependência dos parâmetros de influência apresentados nos trabalhos anteriores (BILIR, 1995; BILIR; ATES, 2003).

2.2.2 Medição de Vazão Não-Intrusiva Através da Termometria

O estudo da transferência de calor transitório em escoamento em tubos está presente em muitos processos na engenharia, como por exemplo o estudo da eficiência de trocadores de calor, Lähdeniemi *et al*, 2000 (LÄHDENIEMI et al., 2000). Técnicas termométricas possuem uma enorme potencialidade de aplicação em escoamentos submetidos a uma variação de temperatura. O problema da medição de vazão por termometria é de que a transferência de calor no escoamento em tubos está ligada ao fato que o experimento é realizado com a medida da temperatura na parede externa do tubo e não na temperatura do fluido que está escoando, logo a resposta obtida pelo sistema de aquisição de dados não representará o que acontece realmente

¹⁷Método de diferenças finitas é utilizado para resolver equações diferenciais baseando-se na aproximação de derivadas por diferenças finitas.

com o fluido (MACHADO et al., 2005a, 2005b).

O trabalho realizado por Machado *et. al.*, tinha o objetivo de inferir a vazão do escoamento de um fluido através da medição da temperatura em dois pontos localizados na superfície externa do tubo. Para tanto, utilizou uma modelagem matemática do problema transitório da convecção condução de calor do escoamento em tubulações. Esse trabalho identificou os parâmetros de influência do problema e a alta dependência deste no processo descrito de medição de vazão. Neste trabalho considerou-se que:

- O escoamento é incompressível;
- A espessura do tubo é pequena quando comparada com ao seu diâmetro e portanto a condução radial é desprezada;
- O escoamento é desenvolvido e unidimensional pois o interesse é na temperatura média na secção transversal;
- O número de Peclet é muito maior que 1,0, portanto a difusão axial no escoamento pode ser desprezada;
- A difusão axial no tubo é pequena quando comparada à advecção no escoamento.

Kusters em 2005 (KUSTERS et al., 2002) realizou experimentos com o objetivo de obter o perfil da velocidade média de deslocamento de líquidos escoando através de tubos. O experimento consistia em injetar água quente na lateral da entrada do tubo provocando uma variação de temperatura. A temperatura era checada em intervalos de tempos regulares, através de sensores baseados em redes de Bragg com localizações equidistantes dentro do tubo.

Em 2007, Grabarski *et.al.*(GRABARSKI et al., 2007), mostrou o uso de sensores em fibras óticas para medir o fluxo em tubulações. A técnica consistia em medir a variação de temperatura na superfície externa da tubulação, a qual possuía dimensões conhecidas quando um fluido quente atravessava o sistema. O tempo de evolução de temperatura entre os pontos de medição podem fornecer a velocidade média ou o fluxo dentro da tubulação. Neste trabalho foram comparadas a resposta dos sensores baseados em redes de Bragg em fibra ótica com a resposta de termopares. Os dados obtidos foram comparados com resultados de modelagem teórica para a transferência de calor em tubos.

O presente trabalho utilizará o método de medição não-intrusivo de vazão por termometria descrito por Machado(MACHADO et al., 2005a), utilizando redes de Bragg como sensores temperatura como no trabalho de Grabarski(GRABARSKI et al., 2007).

2.3 SENSORES EM FIBRA ÓTICA

A vantagem de se usar cabos de fibra ótica em relação aos fios metálicos, é que o do sinal transmitido por essas fibras é um espectro eletromagnético, ou seja, frequências no espectro luminoso, em vez de elétrons. Isso possibilita um alcance maior, uma maior velocidade de transmissão das informações e a possibilidade de serem utilizadas em locais nos quais existe a impossibilidade do uso dos sensores elétricos, como, em ambientes com elevados campos eletromagnéticos; de alta tensão e com altos níveis de contaminação de substâncias explosivas. Essas vantagens das fibras óticas em relação aos cabos metálicos estão relacionadas com a sua composição estrutural, a qual é constituída de material inerte, como, óxido de silício (SiO_2); ou polímeros.

2.3.1 Fibra Ótica

O vidro já era conhecido pelo homem por cerca de 2500 anos antes de Cristo e a manufatura do vidro no formato de fios era realizada no Império Romano. O homem também utilizou a luz para se comunicar desde a antiguidade com sinais luminosos entre pessoas. Entretanto, o uso de sistemas de comunicações óticas data de dois séculos atrás com a invenção do telégrafo ótico pelo engenheiro francês Claude Chappe. Em 1880, Alexander Graham Bell patenteou um sistema de telefone ótico chamado de *Photofone*, onde o meio de transmissão do sinal era o ar, o que o tornava pouco eficiente. O *photofone* consistia de um tubo com um espelho flexível na extremidade, quando alguém falava, o som vibrava o espelho criando uma modulação de luz, a qual era coletada por uma fotocélula a uma distância de 200 metros. Nas décadas seguintes a luz foi usada para aplicações especiais, como sinalização entre navios, mas o vidro ainda não era usado como meio de transmissão da luz. Com o passar do tempo descobriu-se o fenômeno da reflexão total da luz, onde seria possível confinar a luz em um material que estivesse envolto por outro de índice de refração menor, como no caso do vidro no ar. Por volta de 1840 o físico suíço Daniel Colladon e o físico francês Jacques Babinet mostraram que a luz pode ser guiada através de jatos de água por uma fonte expositora, mas foi o físico britânico John Tyndall, em 1854 que popularizou o experimento, guiando a luz por jatos de água que fluía de um tanque, isso causou fascínio nos espectadores, que não esperavam que a luz acompanhasse a curvatura do jato de água. A partir desta data foram realizadas inúmeras pesquisas e patentes sobre o uso de luz em guias transparentes, principalmente na medicina como fontes luminosas, e por volta de 1920 na transmissão de imagens. Em 1951, foi depositada uma patente sobre o uso de imageamento por fibras óticas na medicina em locais de difícil acesso no corpo humano. A grande revolução da comunicação ótica veio após 1960 com:

- Com o laser mostrado por Theodore Maiman e em dezembro deste mesmo ano Ali Javan

produziu o primeiro laser com feixe estacionário de hélio - neônio para Bells Labs;

- A fibra ótica, pois até então a interface usada era o vidro-ar para o efeito da reflexão interna total. Abraham van Heel recobriu uma fibra nua com uma casca de material com índice de refração mais baixo, e a atenuação luminosa das fibras vidro-casca foi em torno de um decibel por metro, muito boa para imagens na medicina e muito alta para comunicações óticas.

Em 1961, Elias Snitzer mostrou que fibras com o núcleo pequeno poderiam guiar um único modo de propagação da luz. Nessa época ainda existia um grande problema a ser resolvido, a atenuação da luz de 1 decibel por metro, o desejável é no máximo de 10 ou 20 decibéis por quilômetros para que o seu uso em comunicações óticas seja viável. Nesta década Charles K. Kao estudou a viabilidade do uso de fibras óticas no lugar dos cabos coaxiais e guias de onda de metais para aplicações em telecomunicações. Kao discutiu o problema da atenuação como sendo devido a impurezas na composição da fibra. Em setembro de 1970, foi anunciado pela Corning Glass Works a fabricação de fibras monomodos com atenuação no espectro de $633nm$ de $20dB/km$, elas foram confeccionadas com sílica fundida e com auto controle dos elementos de dopagem para mudança do índice de refração. A partir daí inúmeros avanços ocorreram na transmissão de dados via fibras óticas devido ao surgimento de lasers semicondutores e diodos lasers com comprimento de ondas operando em faixas de menor atenuação e o surgimento de fibras multimodos com gradiente de índice de refração entre o núcleo e a casca. Hoje os sistemas óticos trabalham com uma nova geração de fibras monomodos com baixa perda por atenuação da ordem de $0,2db/km$ no espectro de $1,55nm$ (HECHT, 1987; CRISP, 2001; HECHT, 2001, 2009; YIN et al., 2001).

2.3.2 Sensores de Redes de Bragg

Comentamos anteriormente que na década de 1960, duas grandes invenções revolucionaram as transmissões óticas: o desenvolvimento do laser e a utilização de fibras óticas como guia de onda. Logicamente isso desencadeou um avanço da fotônica, o surgimento de novos dispositivos com funções básicas de detecção, geração e processamento da luz como: transmissores, amplificadores, filtros de seleção de bandas óticos, entre outros. Em conjunto com a evolução dos sistemas de transmissões óticas surgiram pesquisas direcionadas na área de sensores, voltados ao sensoriamento de grandezas físicas, químicas e biológicas. Entre os sensores óticos, destaca-se o sensor baseado em redes de Bragg, que veremos mais a frente, trata-se de uma perturbação periódica do índice de refração do núcleo da fibra ótica ao longo de seu eixo longitudinal (HILL; MELTZ, 1997). Os sensores em redes de Bragg surgiram com a observação da fotossensibilidade em fibras óticas com núcleo dopado com germânio, sendo

primeiramente realizadas por Hill em 1978 (HILL et al., 1978) com a descoberta da mudança do índice de refração para a luz guiada em materiais de sílica. Essa descoberta deu-se com a observação do aumento da luz refletida pela fibra ótica conforme o tempo de exposição a radiação de um laser de argônio, na frequência do visível, com comprimento de onda de 488nm , mostrando que o índice de refração do núcleo poderia ser alterado com a absorção de radiação. Essa mudança de índice de refração era causada pela formação de uma onda estacionária devido a interferência entre as ondas co-propagantes e as contra-propagantes no interior do núcleo da fibra ótica. Essa foi a primeira observação de uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra ótica, nascendo assim as redes de Hill (HILL; MELTZ, 1997; HILL et al., 1993a), posteriormente chamadas de redes de Bragg ou FBG¹⁸ (HILL; MELTZ, 1997; OTHONOS; KALLI, 1999; HILL et al., 1993a). O espectro de reflexão observado por Hill estava na faixa de 488nm e 514nm .

O estudo da fotossensibilidade do núcleo da fibra revelou que a mudança fotoinduzida do índice de refração aumentava com o quadrado da intensidade da luz, sugerindo um processo de dois fótons (MELTZ et al., 1999; LAM; GARSIDE, 1981). O problema do experimento de Hill era o perfil das redes de Bragg, que devido ao processo de construção das redes que permitiam pouca flexibilidade na modificação do período das franjas de interferência. Meltz *et. al.* (MELTZ et al., 1999), propôs uma nova técnica para a construção das redes, usando a iluminação transversal, ao comprimento da fibra, na casca da fibra através da intersecção de dois feixes no espectro do ultravioleta (UV), conhecido como processo holográfico de Meltz. O experimento de Hill utilizava a radiação emitida por um laser de argônio, no comprimento de 488nm , o qual era refletido na extremidade da fibra ótica formando uma onda estacionária, que dava origem a rede de Bragg. Mais tarde Hill mostrou que um único fóton com metade desta energia e comprimento de onda de 244nm , seria mais eficiente (LAM; GARSIDE, 1981; HILL; MELTZ, 1997; MELTZ et al., 1999).

A técnica demonstrada por Meltz permitia escrever redes de Bragg que operavam no comprimento de 647nm . Kashyap em 1999 (KASHYAP, 1999) anunciou a foto-impressão de FBG's na terceira janela de transmissão ótica¹⁹, as janelas são:

- 1ª janela: 850 nm - Aplicável apenas a fibras multimodo;
- 2ª janela: 1310 nm - Aplicável a fibras multimodo ou monomodo;
- 3ª janela: 1550 nm - Aplicável apenas a fibras monomodo.

Isso aumentou o interesse no estudo e aplicação da fotossensibilidade em fibras óticas

¹⁸*Fiber Bragg Gratings*

¹⁹Janelas de Transmissão ótica: São os comprimentos de onda de operação de uma fibra ótica, para o qual a atenuação da mesma tem um ponto de mínimo. Fonte: <<http://www.lucalm.hpg.ig.com.br/dicionario.htm>>

proporcionando uma revolução nas comunicações óticas. A partir do processo pioneiro descrito por Meltz, inúmeras outras técnicas de escrita transversal de redes de Bragg foram feitas pelo lado da casca da fibra ótica. Entre essas técnicas destacam-se: a técnica de escrita com máscara de fase (HILL et al., 1993a; OTHONOS; KALLI, 1999), a técnica de gravação interferométrica e um híbrido das duas: a técnica interferométrica com máscara de fase.

A técnica não-interferométrica com máscara de fase descrita por Hill (HILL et al., 1993a), apresenta inúmeras vantagens devido a sua simplicidade do sistema de gravação de FBG's, sem a necessidade de um laser com alta coerência. Essa técnica apresenta boa reprodutibilidade na gravação das redes de Bragg.

Paralelamente com o desenvolvimento dos processos de escrita das redes de Bragg, buscou-se desenvolver fibras com melhores características para a escrita de redes. As fibras dopadas com germânio foram estudadas extensamente, como no trabalho de Stone, devido à crença na época de que a fotossensibilidade era devido á dopagem da fibra pelo germânio (STONE, 1987).

Com o avanço da pesquisa sobre a foto sensibilidade ocorrida em fibras óticas, observou-se que esse fenômeno está relacionado à ação da radiação incidente em diversos tipos de fibras, mostrando que a fotossensibilidade não era observada somente pela presença da dopagem do germânio na fibra e sim pela dependência de vários fatores como, as condições da irradiação, a composição do material vítreo constituinte do núcleo da fibra e o processamento da fibra antes da exposição à radiação(HILL; MELTZ, 1997).

Com o tempo buscaram-se novas alternativas para aumentar a fotossensibilidade das fibras óticas, e uma dessas alternativas foi a introdução de hidrogênio na fibra. Esse processo consistia em submeter a fibra ótica ao hidrogênio em alta pressão(LEMAIRE et al., 1993).

Cientistas como Weller-Brophy e Hall (BROPHY; HALL, 1985), e Yamada e Sakoda (YAMADA; SAKODA, 1987) buscaram o entendimento e um modelo para explicar as características do espectro de reflexão das redes de Bragg. Erdogan (ERDOGAN, 1997) explicou isso usando a teoria dos modos acoplados, a qual considera uma diferença muito pequena entre o índice de refração do núcleo e da casca, resultando em modos propagantes ideais, nos quais os componentes transversais são expressos pela superposição dos modos ideais. Inúmeras aplicações surgiram com o aparecimento das redes de Bragg. Hill (1978) (HILL et al., 1978) já explorava sua utilização como filtros de sinal ótico e sua extrema dependência com a temperatura e deformação. A sua aplicação na área de telecomunicações é extensa como podemos ver no trabalho de Giles (1997) (GILES, 1997)

O emprego das redes de Bragg no setor industrial está voltado a segmentos onde os sensores tradicionais não são satisfatórios. Isso aplica-se em ambientes com altos campos eletromagnéticos, ambientes com a presença de gases tóxicos ou combustíveis, entre outros. Também

possuem a vantagem de sensoriamento a longa distância, possuem flexibilidade e tamanho reduzido(CULSHAW, 2000).

O emprego no campo petrolífero de sensores óticos baseados em redes de Bragg gravados em fibras óticas para a medição de pressão e temperatura, já possui duas décadas, e um exemplo disso é o uso em campo com coleta de dados em tempo real, como no campo petrolífero de *Kern River* próximo à *Bakersfield*, na Califórnia, a uma profundidade de 670m do conjunto de bombas do poço. A primeira distribuição comercial de um sistema baseado em redes de Bragg foi instalado em uma plataforma no Golfo do México em abril de 2000. Esse sistema em um único ponto mede a pressão e a temperatura a uma profundidade de 4572 metros, e seu desempenho se equiparou a precisão dos medidores eletrônicos. Desde desta implementação comercial inúmeros sistemas com sensores óticos vem sendo desenvolvidos (GYSLING, 2002).

Os parâmetro físicos que podem ser medidos por sensores óticos são os mais variados, mas de acordo com o percentual de trabalhos apresentados na *15th Optical fiber Sensors Conference*, OFS-15, as medidas de deformação e temperatura foram os mais explorados. Agora quanto ao tipo de sensores óticos desenvolvidos e apresentados, as FBG's ocuparam quase metade dos trabalhos(LEE, 2003).

A aplicação de sensores em fibras óticas no mercado está sendo desenvolvida para atuarem onde os sensores comerciais são ineficazes ou que o custo de operação torna-se dispendioso. Os sensores óticos oferecem inúmeras vantagens geradas pela sua passividade elétrica, podendo serem empregados em regiões hostis, como em: altos campos eletromagnéticos, substâncias explosivas, temperaturas elevadas e altas pressões. Os sensores baseados em redes de Bragg destacam-se entre os demais sensores óticos devido a sua versatilidade de sensoriamento e principalmente na capacidade de sensoriamento distribuído trazendo vantagens ao fato de poderem ser multiplexadas em vários sensores numa única fibra(CULSHAW, 2000; KERSEY et al., 1997). Devido ao seu pequeno tamanho os sensores óticos podem ser implementados dentro das estruturas a serem medidas, criando estruturas inteligentes, para a medição de grandezas físicas como deformação , temperatura, carregamento e vibração permitindo a fiscalização em tempo real da saúde estrutural medida.

2.3.3 Sistema de Interrogação para sensores de redes de Bragg

Para realizar a leitura dos sensores óticos baseados em redes de Bragg, geralmente usamos uma fonte luminosa de grande largura espectral que abrange o espectro da rede de Bragg usada. O espectro de banda estreita refletido pela rede de Bragg é direcionado para um sistema de detecção de comprimento de onda, ou o sinal espectral transmitido é analisado (KERSEY et al., 1997). Melle et al em 1992, descreveu um sistema de demodulação de comprimento

de onda (WDS²⁰) passivo e de alta referência, o qual mede o comprimento de onda de banda estreita do espectro refletido de um guia de onda acoplado a uma rede de Bragg. Esse sistema foi construído para a interrogação do sinal gerado pela deformação de sensores baseados em sensores de Bragg inscritos na fibra ótica (MELLE et al., 1992).

Hoje com a evolução dos sensores de fibras óticas em conjunto com o desenvolvimento da indústria fotônica, possibilitou o emprego de componentes optoeletrônicos nas indústrias atuando onde os sensores mais tradicionais são ineficientes. Mas para o uso dos sensores baseados em redes de Bragg é necessário o uso de técnicas de interrogação e leitura dos sensores com valores compatíveis com a tecnologia tradicional existente. Para o uso de sensores baseados em redes de Bragg necessitamos de inúmeros componentes tais como: fontes luminosas, fibras de alta qualidade, fotodetectores, acopladores óticos, entre outros dispositivos. O custo destes dispositivos vem caindo com o crescimento e desenvolvimento da indústria fotônica, isso facilita o acesso a estes componentes cada vez mais confiáveis, duradouros e sofisticados como diodos laser que no final da década de 1970 custavam aproximadamente US\$3 mil e hoje com a compra em quantidade custam próximo de algumas dezenas de dólares (VALENTE et al., 2002). Vários autores fazem uma revisão sobre as principais técnicas de interrogação de redes de Bragg e suas aplicações (VALENTE et al., 2002; LEE, 2003).

Martelli *et. al.* em 2004, apresentou um sistema para interrogação de redes de Bragg. Esse sistema caracterizava-se pelo baixo custo e facilidade de implementação em relação à outros dispositivos existentes e a adaptabilidade do uso de outras técnicas de demodulação de sensores óticos. Outra vantagem apresentada pelo método de Martelli *et. al.* é o uso de sistemas de aquisição de dados comerciais pois o sinal analógico de saída está na faixa de 0 V e 5V (MARTELLI et al., 2004). O sistema de Martelli *et. al.* baseia-se na detecção por intensidade ótica e permite a compensação por flutuações de potência ótica provenientes da fonte, das curvaturas da fibra e dos conectores devido ao uso de uma rede de referência. Pela razão do sinal fornecido pela rede referência com o sinal sem a rede de referência isso possibilita corrigir qualquer flutuação de potência ótica.

Nunes (NUNES et al., 2004) realizou a análise teórica e a implementação experimental de um sistema de demodulação para sensores de rede de Bragg em fibras óticas baseado em dois filtros espectrais fixos para diferentes configurações do sistema. Os quais foram analisados pela modificação da posição espectral dos filtros em relação ao nível de potência ótica.

Grabarski *et al.*, utilizaram um sistema de interrogação de FBG para a obtenção da velocidade média de escoamento através da termometria, usando redes de Bragg para o monitoramento de temperatura (GRABARSKI et al., 2007). A configuração do sistema de detecção do sinal das FBG's consistia de uma fonte ótica de banda larga para o sinal luminoso, o qual é en-

²⁰A sigla WDS vem de *Wavelength Demulation System*

viado via fibra ótica até duas redes de Bragg passando por um circulador ótico. O sinal refletido passa através de um acoplador (1 x 2) e finalmente por dois filtros sintonizáveis, onde o sinal final é a convolução do filtro com o espectro refletido da rede. A faixa de medição fornecida por esta técnica de demodulação é determinada pelas características do filtro sintonizável e pela faixa de detecção do sinal medido pelo sistema de detecção.

O presente trabalho utilizará um sistema de interrogação de redes de Bragg semelhante ao usado por Grabarski, variando a fonte ótica e o sistema de aquisição de dados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como apresentado no primeiro capítulo, este trabalho de pesquisa procura medir a vazão de um fluido que passa por um tubo de forma não-intrusiva através da termometria. A técnica consiste em medir a temperatura na parede externa do tubo através de dois sensores fixos, em posições afastadas por uma distância d na direção axial do tubo. Uma das limitações do método é que a medida da temperatura é realizada na parede externa do tubo e não diretamente no fluido. Neste capítulo serão apresentados conhecimentos necessários para a realização e compreensão da técnica não intrusiva de medida de vazão através da termometria usando sensores em fibras óticas baseados em redes de Bragg.

3.1 INTRODUÇÃO À MEDIÇÃO DE VAZÃO

Medição de vazão consiste na medida do fluxo de um fluido que escoar através de uma tubulação, ou seja, a medida de vazão relaciona uma quantidade de fluido que passa por uma seção transversal, por exemplo, em um tubo, durante um determinado intervalo de tempo (UPP; LANASA, 2002). Num escoamento permanente, a vazão Q pode ser obtida pela medida da quantidade total de fluido que é coletado em determinado intervalo de tempo. Essa quantidade total pode ser obtida pela medida do peso ou do volume do fluido coletado, tendo-se respectivamente a vazão mássica ou a vazão volumétrica (DELMÉE, 1995), mas esse processo de medição de quantidade não é viável na maioria de casos industriais. Na revolução industrial desenvolveram-se inúmeras descobertas científicas no campo da mecânica de fluidos, entre elas a medida de pressão diferencial que mantém a lei de conservação de energia dada por Bernoulli. Isso possibilitou o desenvolvimento de novos medidores de vazão.

Podemos representar um sistema de medição de vazão através da figura 2 que mostra um modelo esquemático para um sistema geral de medida. Para realizarmos uma medida de vazão devemos ter primeiro uma grandeza física primária a qual de algum modo conseguiremos extrair informação. Para o nosso caso usaremos a temperatura do fluido. Essa grandeza física primária é interpretada por um sensor ou elemento primário, o qual, devido à ação dessa grandeza física, gera um sinal. No nosso caso o sensor é um sensor de temperatura, a rede de Bragg escrita na fibra ótica. A interação do sensor com a grandeza primária gera uma grandeza

física secundária ou sinal, no caso uma mudança no espectro refletido pela rede de Bragg. Muitas vezes o sinal gerado possui muito ruído, ou pouca intensidade ou necessita de mudança de grandeza física necessitando de tratamento e amplificação, e deste modo a grandeza física secundária passa por um condicionador ou elemento secundário que servirá para alimentar o sensor e amplificar o sinal gerado. O sinal gerado pelo amplificador é tratado tornando-se um sinal secundário o qual é coletado e apresentado por um sistema de monitoramento de sinal (DELMÉE, 1995; WEBSTER, 2000a).



Figura 2: Representação simplificada das etapas necessárias na construção de um sistema de medição geral.

Uma pergunta que surge é: qual medidor de vazão é o melhor? ou, qual o melhor tipo de medidor de vazão para minha aplicação? A medição de vazão pode ser dividida em vários métodos, e cada método requer uma consideração específica, mas temos duas considerações iniciais importantes:

- O conhecimento das propriedades ou natureza do fluido, se ele adere ou condensa nas paredes do tubo; se ele tem relações de pressão, volume e temperatura bem definidas ou densidade; se tem o regime de escoamento bem definido segundo o número de Reynolds; se ele é um fluido Newtoniano; se ele não possui impurezas que possam comprometer o desempenho do medidor de vazão; e principalmente se a medida analisada sofre mudanças com o tempo.
- O conhecimento das características do fluxo do fluido, verificando se ele tem um escoamento razoavelmente constante ou uma vazão que não excede a variação no fluxo comportada pela resposta do sistema de medida; se ele não possui um padrão de turbilhão entrando no medidor; se ele não apresenta outras fases para medir; se ele é não pulsado; se ele preenche completamente o tubo; os tipo de pré-tratamento para para remover qualquer resíduo antes da medição. Com posse destes dados podemos escolher o tipo de medidor.

Existem muitos métodos de medir a vazão, mas fatores como precisão¹ e custo, e também o uso da informação do fluxo para obtenção do resultado final, devem ser levados em conta quando se escolhe o medidor. A questão de quanto deve-se investir na compra do medidor de vazão depende muito da quantidade de fluido a ser medida, do ponto de distribuição,

¹Precisão é definida como a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro expresso como uma porcentagem(UPP; LANASA, 2002).

das propriedades do material, de requerimentos governamentais e também do valor do fluido. Podemos resumir isso supondo que a nossa estação de medição trabalha com um fluxo de R\$ 1 milhão por dia, com uma precisão de $\pm 0,2\%$, que representa uma perda de R\$ 2.000 por dia, ou, a perda em um ano de R\$ 730.000, isso justifica um investimento razoável para melhorar a precisão da medida de vazão. Agora para uma mesma estação de medição com precisão de 2% , mas com um fluxo diário de R\$ 1.000, isso representa uma perda de R\$ 2,00 por dia, o que não justificaria um investimento para melhorar a precisão de medição.

Hoje em dia existem inúmeras referências padrão utilizadas em laboratórios e universidades para a medida de fluxo, as quais foram estabelecidas por organizações como (UPP; LANASA, 2002):

- *American Petroleum Institute* (API), <www.api.org>, mantém um manual com capítulos pertinentes à medição de fluxo em produtos derivados de petróleo. Este manual é revisto e organizado periodicamente, sendo que o capítulo 12 trata justamente de procedimentos para o medidas de escoamento (API, 2010).
- *American Gas Association* (AGA), <www.aga.org>, esta organização trabalha com padrões para a medição de gás natural, utilizando referências estabelecida pela API.
- *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), <www.asme.org>, a organização estipula trabalhos de padronização de termos técnicos; determinação de incertezas em circuitos fechados; medidas de vazão usando medidores tipo venturi, orifício e bocal, ultrassônicos, turbinas, vortex, entre outros.
- *Gas Processors Association* (GPA), <ppeast@gasprocessors.com>, estabelece padrões para a análise de misturas em gás natural através da cromatografia.
- *Instrument Society of America* (ISA), <www.iso.org>, desenvolve livros técnicos como *Fundamentals of Flow Measurement*, o qual fornece o conhecimento básico para a medição de escoamento ou o livro *Industrial Flow Measurement* o qual dispõe da compreensão das técnicas de medição de vazão e como o fluido será medido. A ISA ainda fornece livros técnicos com recomendações práticas.
- *American National Standards Institute* (ANSI)
- *American Society of Testing Materials* (ASTM), estabelece padrões para medidas de propriedades de combustíveis gasosos.
- *Institute of Petroleum* (IP).
- *British Standards Institute* (BSI)

- *International Organization for Legal Metrology (OIML).*
- *European Community (EC).*

As organizações citadas acima, além de fornecerem dados sobre medidores de vazão e padronizarem as linhas de medição de vazão, fornecem ainda dados relativos às características de fluidos como pressão, volume e temperatura (API, 2010). Os dados são sempre obtidos com parâmetros específicos limitados pela pressão, temperatura e faixa de composição, e o principal comprometimento dessas organizações é a medição das incertezas. Por isso esse dados podem ser utilizados para produtos similares ou de acordo com os limites das incertezas podem não serem aceitos. Com trabalho adicional há melhora na qualidade e limitação desses resultados, o que ajuda em um planejamento de um bom sistema de medição de vazão.

Um fluido como a água nas condições ambientes pode ser usado como referência para a calibração da vazão de líquidos, a qual pode facilmente ser medida para conhecimento das características e obtenção de dados para o medidor. Entretanto, se possuir impurezas ou o fluido estiver próximo da temperatura e pressão críticas, os dados obtidos nestas condições deverão levar em conta a mudança de volume e pressão, pois essas considerações são importantes para obtenção da precisão na medição de vazão (API, 2010). Mesmo que os líquidos tenham comportamento semelhante à água em temperatura ambiente, certos cuidados devem ser tomados para uma melhor medida de vazão de um determinado líquido. No caso do óleo cru, assim como para outros produtos, existem muitas pesquisas direcionadas à caracterização de valores para medições padronizadas mundialmente sobre a mudança de substância próximas. Em termos genéricos o óleo cru abrange uma quantidade de fluidos que podem ser caracterizados pelos seguintes termos: leves, doces, ácidos e cerosos. Todas essas condições afetam a medição de vazão (WEBSTER, 2000b).

Óleos crus leves são fluidos mais simples, que permitem uma visualização melhor da medida de vazão, possuem uma constituição de viscosidade e baixa concentração de parafina e ambas afetam a medição, o que torna interessante para o estudo da mudança de fluido. Alguns óleos pesados não podem ser medidos sem um devido aquecimento, a alta contenção de parafina produzirá a deposição de materiais nos dutos e medidores. O tratamento ou aquecimento da parafina é necessário antes da medição ser realizada. Em outra linha, escoamento com variação de temperatura é muito bem conhecido e usado para definir a magnitude dos problemas que poderão ocorrer nas medidas. Uma confirmação de que a medida em óleos leves é viável, pode propor um projeto de um sistema de medição de vazão.

Óleos doces e ácidos afetam os materiais constituintes dos medidores envolvendo impurezas introduzidas pela corrosão. O prévio conhecimento do fluido permite a seleção apropriada dos materiais dos medidores. Caso isso não seja possível, os produtos corrosivos podem

ser tratados ou filtrados antes da interação com o medidor. Óleo sujo, por exemplo, possui impurezas que serão coletadas no medidor e irão afetar seu desempenho e integridade. Na medição de vazão, na saída do medidor é desejado medir grandezas físicas que relacionem unidades de volume ou de massa (API, 2010).

O escoamento de um determinado fluido é unicamente dependente das condições da linha de medição e das condições base do fluido. Não podemos comparar um fluido, com outros volumes os quais possuem condições base e linha de medição diferentes. Entretanto, a vazão volumétrica ou volume totalizado correto para a condição base é uma quantidade definida que pode ser combinada com outros valores, sempre retornando para a condição base. Valores para volume e massa para a condição base são relatados para cada substância através da densidade para a condição de linha de medição². O método mais comum usado para medir a vazão ou escoamento total é a medida volumétrica. Para medir a densidade do fluido usa-se densitometria ou cromatografia, sempre respeitando as condições base da linha de medição. O fluxo de massa ou massa total pode ser medida diretamente com um medidor de massa. Essas condições base são normalmente determinadas pela planta ou contrato de venda, ou requerimentos governamentais, ou de acordo com as condições de operação do medidor (API, 2010). Quando existe variação de densidade de fluido maior que $\pm 0,15\%$ durante o período de totalização, a conversão deverá ter um melhor desempenho para uma taxa de escoamento de peso base. A conversão é calculada mais freqüentemente para obter a incerteza desejada (ANSI; ASME, 1983).

3.1.1 Conceitos físicos para a medição de vazão

Primeiramente foi proposto por Bernoulli uma equação que estabelece uma relação entre a velocidade do fluido (v), a pressão do fluido (p) e a altura (h). Todas estas variáveis relacionadas a um ponto comum para um fluido escoando através de um tubo com seção transversal diferentes. A equação de Bernoulli é dada pela equação 1:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2}{2g} + h_2 \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do fluido. A equação 1 assume que o fluido é incompressível, tem densidade constante, e baixa viscosidade. Para simplificar os cálculos estabelecemos que o tubo está na horizontal $h_1 = h_2$, podemos usar a equação 1 para calcular a vazão do fluido, rearranjando a equação 1 obtemos 2 :

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad (2)$$

O princípio da conservação da massa, em regime permanente, requer que:

²Valor da massa dividido pela densidade base.

$$v_1 A_1 \rho = v_2 A_2 \rho \quad (3)$$

Reagrupando a equação 6 e substituindo v_2 na equação 1, temos:

$$Q = v_1 A_1 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (4)$$

Na equação 4, Q representa a vazão volumétrica para um fluido e pode ser determinada medindo a variação de pressão ($p_1 - p_2$).

A principal lei física usada na medição de vazão é a lei da continuidade, a qual leva em consideração a conservação da massa e que prediz que o fluxo de massa é constante. Essa lei é pode ser escrita pela equação 5, válida em regime permanente:

$$M_1 = M_2 \quad (5)$$

onde M_1 representa a massa que entra no sistema e M_2 é a massa que sai do sistema. Através da relação 5 pode-se concluir que a vazão mássica é igual densidade do fluido vezes a área do tubo vezes a velocidade do fluido, chegando na equação 6.

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (6)$$

Onde ρ é a densidade do fluido para o ponto designado no tubo, A representa a área do tubo, v é velocidade no ponto de medição e os índices 1, 2 as posições inicial e final.

Relacionando ainda a massa podemos medir a taxa de massa por unidade de tempo, obtendo assim a vazão mássica Q_m que é a quantidade em massa (m) de um fluido que escoar através da secção transversal de um tubo em um intervalo de tempo (t).

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (7)$$

Podemos relacionar a lei da continuidade em termos da taxa de volume através de:

$$Q_v = Av \quad (8)$$

onde Q_v é o volume por unidade de tempo no escoamento, A é a área do tubo e v é a velocidade.

A vazão volumétrica Q_v é o volume (V) que escoar através de certa secção em um intervalo de tempo (t).

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (9)$$

onde, Q_v representa a vazão volumétrica m^3/h , V o volume em m^3 e t o tempo dado em h .

Medidas volumétricas da vazão são levadas a efeito fazendo o fluido ingressar num recipiente de volume conhecido, medindo o crescimento da superfície líquida num intervalo de tempo, ou anotando o tempo necessário para encher o recipiente. A precisão da medida volumétrica não é tão boa quanto a precisão da medida de massa, onde Q_m é a vazão mássica em kg/h , m é a massa dada em kg e t o tempo dado em h . Quando realizamos uma medição de vazão com o volume devemos levar em consideração os efeitos de compressibilidade, pressão e temperatura. Usando um fator de correção, isso é possível através da relação:

$$Q_e F_{id} = Q_{id} \quad (10)$$

onde Q_e é a vazão volumétrica nas condições de escoamento, F_{id} é o fator de redução para escoamento nas condições ideais e Q_{id} é a vazão volumétrica nas condições ideais.

Podemos encontrar a vazão volumétrica em relação a vazão mássica usando a relação:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho_f} \quad (11)$$

onde Q_v é a vazão volumétrica, Q_m é a vazão mássica e ρ_f é a densidade do fluido.

Para o desenvolvimento de medidores de vazão necessitamos de recursos tecnológicos variados. O fluido a ser medido pode ser um líquido, gás ou vapor. Na maior parte dos casos a medida de vazão é realizada aproveitando uma interação entre o fluido e o medidor. O fluido também deve ser considerado, pois pode ser homogêneo ou heterogêneo³. Se o medidor de vazão for intrusivo, propriedades físicas como viscosidade e densidade são fatores decisivos na escolha do medidor. Algumas propriedades e características físicas dos fluidos são importantes para a realização da medida de vazão, entre elas estão (DELMÉE, 1995):

- Densidade: A densidade absoluta (ρ) ou massa específica dos líquidos é medida em massa por unidade de volume.
- Viscosidade: Pode ser definida como a resistência que o fluido oferece ao deslocamento de suas partículas
 - Distribuição de Velocidade em tubos: em regime de escoamento no interior de um tubo, a velocidade não será a mesma em todos os pontos. Será máxima no ponto central do tubo e mínima na parede do tubo. Quando se observa fluidos reais temos dois tipos básicos de movimento, ou regimes:

³Fluidos homogêneos apresentam uma única fase, enquanto os fluidos heterogêneos apresentam múltiplas fases.

- * Quando o movimento de superfície no qual os elementos fluidos ou partículas parecem deslizar um sobre os outros em camadas ou lâminas, este é conhecido como escoamento laminar. Dizemos neste caso que o fluido encontra-se em regime laminar.
 - * Quando o movimento que ocorre é caracterizado por um movimento desordenado ou caótico de partículas individuais, apresentando vórtices de vários tamanhos é conhecido como escoamento turbulento. Dizemos neste caso que o fluido encontra-se em regime turbulento.
- Número de Reynolds⁴: Como vimos o fluido pode escoar no regime turbulento, laminar ou de transição. Para determinar em que regime de escoamento o fluido encontra-se é utilizado um número adimensional conhecido como número de Reynolds R_e . O número de Reynolds R_e corresponde à razão entre as forças de inércia e as forças viscosas, sendo obtido através da relação:

$$R_e = \frac{\bar{v} \cdot D}{\nu} \quad (12)$$

onde \bar{v} é a velocidade do fluido em m/s , D é o diâmetro (em metros) interno do tubo no qual está escoando o fluido e ν a viscosidade do fluido em m^2/s . O número de Reynolds é válido para líquidos e gases permitindo definir três regimes de escoamento:

- Para o regime laminar $R_e \leq 2000$;
- Para um regime de transição $2000 < R_e < 4000$;
- Para o regime turbulento $R_e > 4000$;

Alguns autores ainda definem que na prática se $R_e > 2320$ o fluxo é turbulento, caso contrário é laminar. Nas indústrias, o regime de escoamento é na maioria dos casos turbulento com $R_e > 5000$.

- Número de Prandtl (Pr): O número de Prandtl é definido como a razão entre a difusividade de momento linear do fluido, ou viscosidade cinemática ν_f e a difusividade térmica α_f .

$$Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \quad (13)$$

O número de Prandtl de um fluido é uma função da temperatura e pressão. Na literatura encontra-se para a água em temperatura ambiente o valor de $Pr = 6,5$.

⁴Osborne Reynolds, 1842-1912, estudou as mudanças que um escoamento experimenta quando passa do regime laminar para o regime turbulento. Em 1883 introduziu o Número de Reynolds.

- Número de Nusselt Nu : O número de Nusselt representa o gradiente de temperatura adimensional numa dada superfície sólida em contato com um fluido.

$$Nu = \frac{h_i D_i}{k_f} \quad (14)$$

onde h_i é o coeficiente de transferência de calor por convecção. Como Nu é extremamente dependente do regime de escoamento, tem-se:

- Número de Nusselt Nu_{lam} , para escoamento laminar em uma tubulação de secção circular constante. Supondo o escoamento totalmente desenvolvido, tanto térmico como hidrodinâmico, e com o pressuposto de que as paredes internas do tubo possuem temperatura constante, o número de Nusselt para o regime laminar é:

$$Nu_{lam} = 3,66 \quad (15)$$

- Número de Nusselt Nu_{turb} , para escoamento turbulento em uma tubulação de secção circular constante. Para o regime turbulento em um tubo de secção circular usa-se a correlação de Dittus-Boelter:

$$Nu_{turb} = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad (16)$$

O coeficiente n varia conforme a direção do fluxo de calor (se é do fluido para a tubulação ou o oposto):

$$n = 0,3 \text{ para } T_f > T_{sol} \text{ e } n = 0,4 \text{ para } T_f < T_{sol}$$

Admite-se que as paredes internas do tubo são lisas eliminando a influência que a rugosidade exerce sobre o escoamento. Ainda para valer a correlação de Dittus-Boelter devem ser satisfeitas as seguintes restrições:

- * $Re > 10.000$
- * $0,7 \leq Pr \leq 160$
- * $\frac{L}{D_i} \geq 10$

3.2 MEDIDORES DE VAZÃO

Como visto na seção anterior os fluidos possuem inúmeras propriedades físicas que podem favorecer ou excluir a escolha de um medidor de vazão. Além das propriedades físicas ainda existem fatores decisivos na escolha de um medidor de vazão. Na hora de escolher um medidor de vazão devemos levar em conta:

- Temperatura.

- Pressão estática.
- Faixa de medição.
- Estado físico do fluido: monofásico líquido, monofásico gasoso, bifásico líquido, gasoso ou multifásico.
- Propriedades físicas do fluido: densidade, viscosidade, compressibilidade, peso molecular do gás ou do vapor, pressão de vapor e composição do fluido no caso de misturas bifásicas.
- Impurezas.
- Abrasividade e concentração de partículas carregadas pelo fluido.
- Compatibilidade química do fluido com o sensor, incluindo a deposição de partículas sobre o sensor, incrustação, corrosão e contaminação.
- Propriedades óticas do fluido para medição com laser.
- Condutividade elétrica do fluido para medição por indução magnética.
- Características do escoamento: velocidade do fluido e número de Reynolds (escoamento turbulento ou laminar).
- Dependência com o tempo: escoamento constante, pulsante ou transiente.
- Máxima perda de carga permissível associada ao sensor.
- Tempo de vida do sensor.
- Periodicidade de calibração.

Além dos fatores citados, os medidores de vazão devem satisfazer a exigências de desempenho, confiabilidade, facilidade de instalação, manutenção e manuseio. Adicionalmente, temos ainda, os custos de instalação e os custos operacionais que devem ser compatíveis com a aplicação e com as demais tecnologias disponíveis. Outras duas características são fundamentais para qualquer medidor independente da grandeza a ser medida, são elas, a precisão e a exatidão. A precisão está associada á reprodutibilidade da medida caracterizando os erros aleatórios do instrumento. A exatidão está relacionada aos erros sistemáticos. Os medidores de vazão devem ser escolhidos de acordo com as condições de trabalho a que serão submetidos.

Com isso eles podem ser divididos em duas categorias de acordo com o elemento primário: medidores de quantidade ou de volume e medidores de vazão instantânea. Os medidores de quantidade possuem câmaras de volumes conhecidos, sendo estas o elemento primário de medição. Cada vez que a câmara é preenchida completamente gera-se um pulso; o elemento secundário é um contador de pulsos. A vazão média é fornecida pelo quociente entre o volume e o tempo associado.

Nos medidores de vazão instantânea, o elemento primário detecta o valor instantâneo de uma das grandezas físicas seguintes:

- Vazão Mássica
- Vazão Volumétrica
- Velocidade Média do Fluido

A relação que estas grandezas possuem entre si são a massa específica do fluido e do perfil de velocidade na secção da tubulação. Os medidores de vazão instantânea são sub-classificados quanto a linearidade entre a grandeza primária medida e a grandeza física secundária gerada. Exemplos de medidores instantâneos lineares são: turbinas, medidores magnéticos de área variável e por efeito Corolis. Como exemplos de medidores de vazão instantânea não lineares tem-se placa de orifício, venturi e bocal. A placa de orifício e medidores afins têm seu funcionamento baseado no princípio da aceleração de uma corrente de fluido através de uma forma de bocal. A pressão diferencial gerada entre as secções transversais da tubulação e da restrição é, em primeira aproximação, proporcional ao quadrado da vazão, conforme a equação de Bernoulli.

3.2.1 Tipos de medidores de Vazão

Podemos dividir os medidores de vazão em três classes:

- Medidores indiretos, que utilizam fenômenos intimamente relacionados à quantidade de fluido passante;
 - Perda de carga variável (área constante)
 - * Tubo de Pitot
 - * Tubo Venturi
 - * Orifício
 - Área variável (perda de carga constante)
 - * Rotâmetro

- Medidores diretos de volume do fluido passante
 - Deslocamento positivo do fluido
 - * Disco Nutante
 - * Pistão flutuante
 - * Rodas ovais
 - * Roots
 - Velocidade pelo impacto do fluido
 - * Tipo Hélice
 - * Tipo turbina
- Medidores especiais
 - Cada medidor especial tem uma grandeza física diferente
 - * Eletromagnetismo
 - * Vortex
 - * Ultra-sônico
 - * Calhas de Parshall
 - * Coriolis
 - * Termométricos

3.3 TERMOMETRIA

O estudo da transferência de calor transitório do escoamento em tubos está presente em muitos processos na engenharia, como por exemplo o estudo da eficiência de trocadores de calor. Técnicas termométricas possuem uma enorme potencialidade de aplicação em escoamentos submetidos a uma variação de temperatura. Como visto anteriormente as medições não-intrusivas trazem inúmeras vantagens. O problema de seu uso está nas limitações econômicas ou técnicas dos medidores atualmente disponíveis no mercado, logo o estudo da viabilidade da medição de vazão empregando técnicas termométricas torna-se viável. Como dito anteriormente, o problema da medição de vazão por termometria é que a transferência de calor no escoamento em tubos está ligada ao fato que o experimento é realizado com a medida da temperatura na parede externa do tubo e não na temperatura do fluido que está escoando, logo a resposta obtida pelo sistema de aquisição de dados não representará o que acontece realmente com o fluido (MACHADO et al., 2005b).

Muitos pesquisadores trabalharam com o problema físico que envolve a convecção-condução conjugada em tubulações no regime transitório. Alguns buscaram os parâmetros

fundamentais para analisar o problema da transferência de calor (BILIR, 1995; BILIR; ATES, 2003), são eles:

- Número de Peclet (Pe): O número de Peclet permite comparar as parcelas de calor transferidas por advecção e por difusão em um fluido em escoamento;

$$Pe = \frac{UD_i}{\alpha_f} = Re \cdot Pr \quad (17)$$

onde U é a velocidade média na direção axial, D é o diâmetro, α é a difusividade térmica e os subscritos i e f se referem, respectivamente, à superfície interna do tubo e o domínio do fluido.

- Número de Biot externo (Bi_e): O número de Biot corresponde à razão entre a resistência térmica interna de um sólido e a resistência térmica por convecção, dado por:

$$Bi_e = \frac{h_e D_i}{2k_f} \quad (18)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, k é a condutividade térmica, e os subscritos i e s se referem, respectivamente, à superfície externa do tubo e ao domínio do sólido.

- Razão entre as Condutividades Térmicas do Sólido e do Fluido η , onde:

$$\eta = \frac{k_s}{k_f} \quad (19)$$

- Razão entre as Difusibilidades Térmicas do Sólido e do Fluido ξ ;

$$\xi = \frac{\alpha_s}{\alpha_f} \quad (20)$$

- Espessura adimensional da Parede E ;

$$E = \frac{\varepsilon}{D_i} \quad (21)$$

onde ε é a espessura da parede do tubo. Machado (MACHADO et al., 2005b) estudou a viabilidade de se medir vazão através da termometria. O principal problema é o estudo da transferência de calor entre escoamento e a superfície até um sensor térmico através da parede externa do tubo. O problema físico já é conhecido na literatura e compreende a convecção-condução em tubulações operando em regime transitório. Para aplicação de um modelo matemático simplificado, algumas considerações devem ser feitas, como:

- O escoamento é incompressível;
- A espessura do tubo é pequena quando comparada com o seu diâmetro e portanto a resistência térmica por condução radial é desprezada;
- O escoamento é desenvolvido e unidimensional pois o interesse é na temperatura média na seção transversal;
- O número de Peclet é muito maior que 1,0, portanto a difusão axial no escoamento pode ser desprezada;
- A difusão axial no tubo é pequena quando comparada à advecção no escoamento.

A equação de conservação da energia para o escoamento pode então ser escrita como a equação (22):

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta_f}{\partial \chi} + B_1(\theta_f - \theta_s) = 0 \quad (22)$$

E a conservação da energia na tubulação equação (23):

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} - B_2(\theta_f - \theta_s) + B_3\theta_s = 0 \quad (23)$$

onde, $\theta_f = (T_f - T_0)/(T_i - T_0)$; $\theta_s = (T_s - T_0)/(T_i - T_0)$; $B_1 = 4(Nu/RePr)$; $B_2 = 4(Nu/RePr)\beta(N^2/1 - N^2)$; $B_3 = 4(Bi/RePr)\xi(N^2/1 - N^2)$; $\xi = \alpha_s/\alpha_f$; $\beta = \rho_f c_{pf}/\rho_s c_{ps}$; $N = D_i/D_0$. Nu é o número de Nusselt, Bi é o número de Biot, Re é o número de Reynolds, Pr é o número de Prandtl. T é a temperatura, U é a velocidade média do escoamento, h é o coeficiente de película, D é o diâmetro de tubulação, k é a condutividade térmica, ρ é a massa específica, c_p é o calor específico, ν é a viscosidade cinemática e α é a difusividade térmica. Os índices i , o , f e s representam respectivamente, o interior do tubo, o exterior do tubo, o fluido e o sólido. A coordenada χ é definida por x/D_i e a coordenada τ por tU/D_i . Os índices x e t representam a coordenada axial do tubo e o tempo respectivamente.

Uma solução analítica-numérica é proposta para solucionar as equações 22 e 23 através da transformada de Laplace (KIWAN; AL-NIMR, 2002; MACHADO et al., 2005b). No trabalho realizado por Machado (MACHADO et al., 2005b), de inferir a vazão de escoamento através de dois pontos fixos na superfície externa da tubulação, a qual sofre uma mudança brusca de temperatura, foram identificados os parâmetros de influência tais como: número de Nusselt, número de Reynolds, razões entre capacidades e difusidades térmicas do fluido e do sólido.

3.4 SENSORES EM FIBRA ÓTICA

A vantagem de se usar cabos de fibra ótica em relação aos fios metálicos, está no fato do sinal transmitido ser um espectro eletromagnético, frequências no espectro luminoso, em vez de elétrons, viabilizando o uso de sistemas que não sofrem interferências eletromagnéticas. O fato do sinal ser um sinal luminoso permite um alcance maior, uma maior velocidade de transmissão das informações e a possibilidade de serem utilizada em locais nos quais existe a impossibilidade do uso dos sensores elétricos, como em ambientes: com elevados campos eletromagnéticos; de alta tensão e com alto níveis de contaminação de substâncias explosivas. Essas vantagens das fibras óticas em relação aos cabos metálicos estão relacionadas com a sua composição estrutural a qual é constituída de material inerte, como: óxido de silício, SiO₂; ou polímeros.

3.4.1 Fibra Ótica

As fibras óticas se encaixam num subconjunto de estruturas conhecidas como guias de ondas óticas dielétricas. Essas guias de ondas dielétricas são extremamente finas, da ordem de dezenas de micrometros (μm) e podem ser comparadas a um filamento, geralmente possuem o formato cilíndrico e são flexíveis. As fibras óticas são constituídas por um cilindro de material dielétrico transparente para frequências óticas, com um índice de refração n_1 , conhecido como núcleo. O núcleo é envolvido por um material dielétrico de índice de refração n_2 , onde $n_1 > n_2$, conhecido como casca. A luz propagada ao longo do núcleo é conhecida como luz guiada e dá-se por meio de reflexões sucessivas na interface entre o núcleo e a casca. A luz que não é refletida pela interface núcleo-casca é conhecida como luz evanescente. O núcleo da fibra ótica envolto por ar pode ser um guia de onda, mas qualquer impureza que aderir na superfície do núcleo provocará perdas. Como solução o núcleo é envolto por um mesmo material só que com um índice de refração menor, casca. A estrutura de uma fibra ótica consiste em três partes, como mostrado na figura (3):

- Núcleo: Serve para o guiamento de ondas eletromagnéticas, ou seja, os sinais transmitidos estão na forma de luz. O seu índice de refração é ligeiramente maior que o índice de refração da casca. O guiamento de onda dá-se então pelo processo de reflexão interna. É constituído basicamente de vidro ótico extremamente puro, podendo ser flexível.
- Casca: É um cilindro concêntrico ao núcleo e com a mesma constituição, vidro ótico extremamente puro. A casca envolve o núcleo e sua principal função é evitar que a luz escape do guia de onda formado pelo núcleo. O índice de refração é levemente menor que o do núcleo. Serve para dar proteção a fibra ótica como sustentação mecânica e

amortecimento de impactos.

- Revestimento: Com a finalidade de proteção mecânica da fibra ótica.

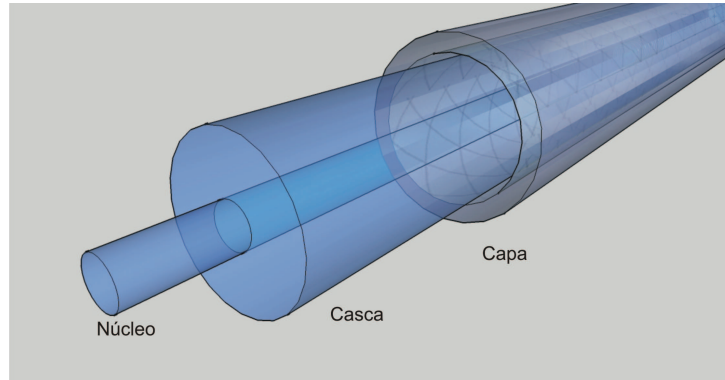


Figura 3: Desenho esquemático das partes constituintes de uma fibra ótica.

Neste tópico abordamos como a luz interage com a fibra ótica, sabemos que ondas de rádio e a luz são ondas eletromagnéticas. A taxa pela qual elas alternam sua polaridade é chamada frequência (f) e sua unidade é dada em Hertz (Hz)⁵. A velocidade das ondas eletromagnéticas (v_{el}) no espaço livre é aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s. A distância que ela viaja durante cada ciclo é chamado de comprimento de onda (λ) pode ser calculado pela relação (24):

$$\lambda = \frac{v_{el}}{f} \quad (24)$$

Quando falamos de espectro eletromagnético devemos lembrar que nas primeiras transmissões de informações foram usadas ondas de rádio, que eram restritas a código Morse e fala, pois eram usadas ondas longas de frequência relativamente baixa em torno dos MHz. A faixa de frequência que pode ser utilizada para a transmissão é chamada de largura de banda, mas é muito pequena quando comparada a faixa de largura de banda ótica. É inevitável restringir o uso de ondas de rádio para transmissão de dados de baixa velocidade e transmissões com pouca complexidade de codificação de dados. O uso de transmissões de dados através de cabos óticos, proporcionou uma enorme revolução. Experimentos mostraram que a transmissão com luz visível era possível e exploraram o espectro para a melhor frequência a ser usada nas fibras óticas. Isso permitiu o ganho de uma maior largura de banda, um aumento na velocidade de transmissão e principalmente transmissão de informações mais complexas. O problema real era a atenuação das transmissões que aumentavam rapidamente (uma potência a quarta), conforme dobrava-se a frequência luminosa, as perdas aumentavam 16 vezes. Com isso era necessário

⁵Um Hertz equivale a um ciclo por segundo.

trabalhar com frequências mais altas para se obter maiores larguras de banda, mas somente para transmitir dados a distâncias muito curtas. A largura de banda para a luz foi explorado para frequências no final do espectro do vermelho e depois no infravermelho.

A luz no espectro do infravermelho cobre toda a faixa de comprimentos de onda e é geralmente usada para comunicação em fibra ótica. Com isso houve a necessidade de se desenvolver fontes para os sistemas de comunicações óticas, além do desenvolvimento de receptores. O problema da escolha do espectro no infravermelho está no comprimento de onda de 1380 nm, que proporciona uma grande perda de informação, que pode ser provocada pela presença de água na fibra. Por isso estabeleceu-se comprimentos de onda padrão, chamados janelas, mostradas na figura (4), com isso otimizou-se o desempenho da fibra e de fontes luminosas para o uso nestas janelas. As janelas com 1300nm e 1550nm têm baixa perda e são usadas para comunicações a longa distância. A janela de comprimento de onda curta centrada em 850nm tem perdas mais altas e é usada para uma faixa mais curta de transmissão de dados e redes locais⁶, próximo de 10 km. Os sistemas de 850nm só permanecem até hoje devido ao baixo preço e a facilidade de instalação (CRISP, 2001; HECHT, 1987, 2001; DECUSATS; DECUSATS, 2007).

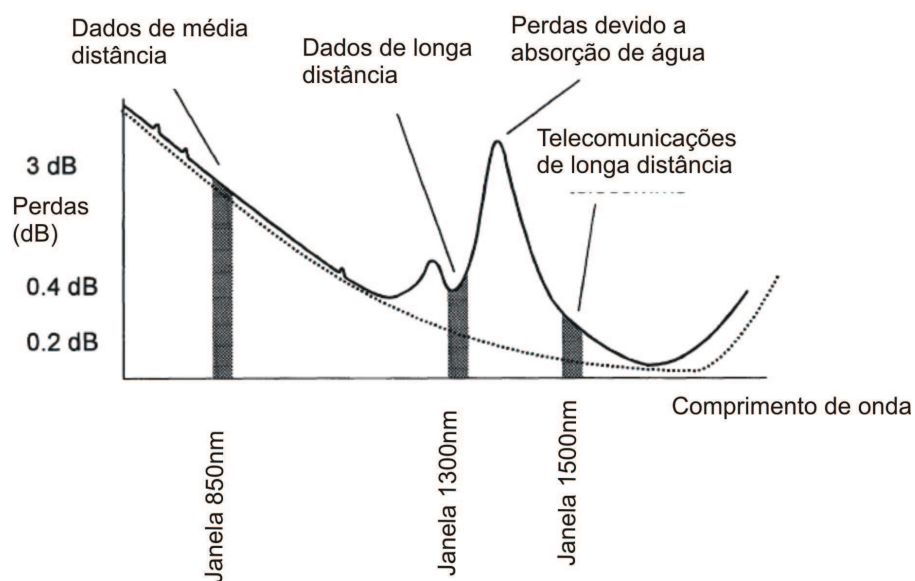


Figura 4: Gráfico das janelas de transmissão via fibras óticas.

O índice de refração da luz em um meio material é uma relação entre a velocidade da luz em um determinado material com a velocidade da luz no vácuo. A luz viaja com velocidade mais baixa através de sólidos e líquidos transparentes do que através do vácuo, ou seja a luz viaja com diferentes velocidades através de diferentes materiais. A velocidade da luz no vácuo é de

⁶LANs, local Area Networks

aproximadamente $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$. A comparação da velocidade da luz dentro de um material em relação a luz no vácuo é conhecido como índice de refração n , para um dado material. Quando dizemos que o índice de refração de um material é 1,4 dizemos que a luz irá viajar através desse material com velocidade 1,4 vezes menor do que ela viaja através do vácuo. Quando um feixe de luz passa de um meio para o outro sofre um fenômeno chamado refração, e isso é causado pela mudança do índice de refração do material entre os dois materiais, o índice de refração do material é diferente para diferentes comprimentos de onda da luz. A reflexão interna total é descrita pela Lei de Snell e é dada pela equação (25) abaixo (CRISP, 2001):

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2 \quad (25)$$

Essa equação representa o índice de refração com o ângulo dos raios de luz incidentes na interface de dois meios com índice de refração diferente. Quando temos um meio material com índice de refração n_1 confinado por um outro meio material de índice de refração n_2 , onde $n_1 > n_2$, um feixe de luz que viaja pelo material com n_1 sofre reflexão total quando o ângulo de incidência é maior que o ângulo crítico⁷, é o que acontece no caso da fibra ótica. Quando o ângulo de incidência é menor que o ângulo crítico temos o processo de refração, parte da onda é refratada, penetrando na casca, como na figura 5 (DECUSATS; DECUSATS, 2007; CRISP,), ocasionando atenuações no sinal.

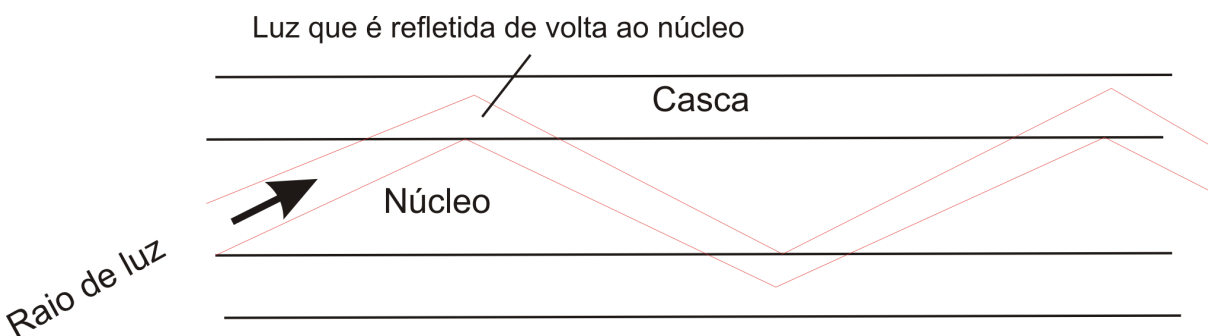


Figura 5: Representação esquemática do trajeto da luz dentro da fibra ótica, quando o ângulo de incidência é menor que o ângulo crítico, mostrando que parte da onda luminosa penetra na casca.

O índice de refração do ar é 1, isto é uma razão da velocidade da luz no vácuo com a velocidade da luz no meio. O índice de refração do núcleo da fibra ótica é aproximadamente 1,48 (DECUSATS; DECUSATS, 2007; CRISP,).

Outro parâmetro importante na fibra ótica é o ângulo máximo de entrada da luz em relação ao eixo de simetria, todos os raios luminosos dentro deste ângulo sofrerão a reflexão total dentro da fibra. Se desenharmos uma figura com o contorno do ângulo máximo em volta da

⁷É o maior ângulo de incidência de uma onda luminosa que ao atingir outro meio de índice de refração n menor, ainda sofre refração. A partir desse ângulo a onda é inteiramente refletida de volta ao primeiro meio de propagação.

face final do núcleo, conforme a figura (6), desenharemos um cone que determinará o caminho de entrada de luz na fibra, esse cone é conhecido como cone de aceitação (AC). Essa figura mostra cone de aceitação da entrada da luz, que pode ser relacionada com os índices de refração do núcleo e da casca da fibra através da abertura numérica (NA)⁸ a qual é expressa pela equação (26) como:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (26)$$

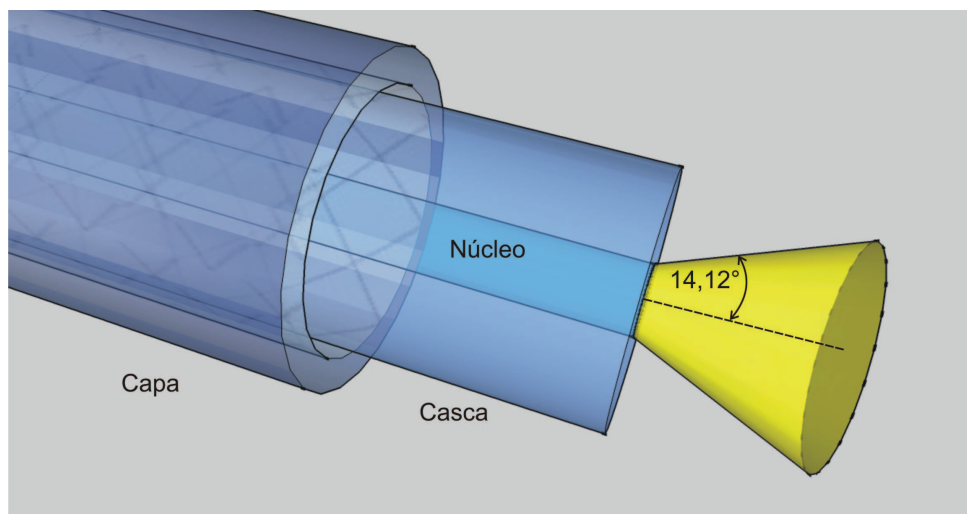


Figura 6: Representação esquemática da abertura numérica da luz saindo ou entrando na fibra.

A equação 26 não possui unidades e é relacionada com o ângulo de aceitação (AC) pela expressão:

$$AC = \sin^{-1} NA \quad (27)$$

As vantagens do uso de fibras óticas são:

- Imunidade de interferência elétrica: Fibras óticas podem atuar em áreas de altos níveis de ruído elétrico como próximo a máquinas e descargas elétricas.
- Sem diafonia: Quando cabos de cobre são colocados lado a lado por uma longa distância, a radiação eletromagnética de cada cabo pode ser afetar outros cabos, o sinal pode ser detectado pelos condutores circundantes. Este efeito é conhecido como diafonia. A diafonia é facilmente evitada nas fibras óticas com seu encapsulamento.
- As fibras de vidro são isolantes: Sendo um isolante, as fibras óticas são seguras para o uso em áreas de alta tensão, não provocarão curto circuito e podem ser conectadas entre dispositivos com diferentes potenciais elétricos.

⁸A sigla NA vem do termo em inglês *Numerical Aperture*.

- Aumento de largura de banda: Usando luz conseguimos maiores larguras de banda, na faixa de unidades de gigahertz, ao contrário dos cabos de cobre que são restritos a aproximadamente 500 MHz.
- Baixas perdas de sinal: As fibras atualmente possuem perdas menores que $0,2dBkm^{-1}$ na banda C, e para longas distâncias existe a possibilidade do uso de repetidores. Isto significa benefícios de custo em sistemas de telecomunicações de longa distância.
- Tamanho e peso: Quando comparadas aos cabos de cobre equivalentes as fibras óticas são muito menores e leves, isto trás benefícios como custo de transporte reduzido, maior número de cabos no mesmo tubo e a facilidade de instalação.
- Somente uma fibra simples é necessária: Uma única fibra pode mandar um sinal, enquanto que na transmissão de sinais via cabo de cobre é necessário dois cabos para que o circuito seja fechado ou cabo coaxial.

3.4.2 Sensores de Redes de Bragg

A rede de Bragg também conhecida como FBG, *Fiber Bragg Grating*, provém da modulação periódica do índice de refração, n_{nf} , no núcleo da fibra ótica. Essa variação no índice de refração ocorre no sentido perpendicular ao eixo longitudinal da fibra ótica e a repetição de cada plano da rede têm período Λ , conforme representado na figura (7). A luz guiada pelo núcleo da fibra de vidro, é refletida na interface de cada plano de diferente índice de refração. Os comprimentos de onda (λ) da luz guiada no núcleo da fibra que não satisfazem as condições de Bragg⁹ tornam-se fora de fase e se cancelam. Quando a luz refletida satisfaz a condição de Bragg, temos uma contribuição construtiva de ondas contra propagantes resultando na formação de uma banda de reflexão com comprimento de onda central, λ_{Bragg} (OTHONOS; KALLI, 1999), conforme a representação da figura (8).

Erdogam (ERDOGAN, 1997) demonstrou uma expressão para encontrar o perfil do índice de refração de uma rede de Bragg na direção de propagação z da fibra ótica:

$$n(z) = n_{nf} + \partial n = \partial(z) + h(z) \cos\left(\frac{2\phi z}{\Lambda} + \phi(z)\right) \quad (28)$$

A equação 28 pode nos fornecer inúmeras informações sobre a rede de Bragg em questão, o termo $h(z)$ representa a visibilidade de intensidade e quando sofre variação ao longo da fibra representa um perfil de índice apodizado¹⁰, $\phi(z)$ representa a periodicidade espacial

⁹A lei de Bragg refere-se a equação: $n\lambda = 2dsen\theta$ usada como explicação da reflexão de feixes de raio-X em certos ângulos de incidência nas faces crivadas de cristais. Essa Lei foi derivada em 1913 pelos físicos ingleses Sir W.H. Bragg e seu filho Sir W.L. Bragg.

¹⁰A apodização consiste em reduzir gradualmente a amplitude de modulação do índice de refração nas bordas da rede.

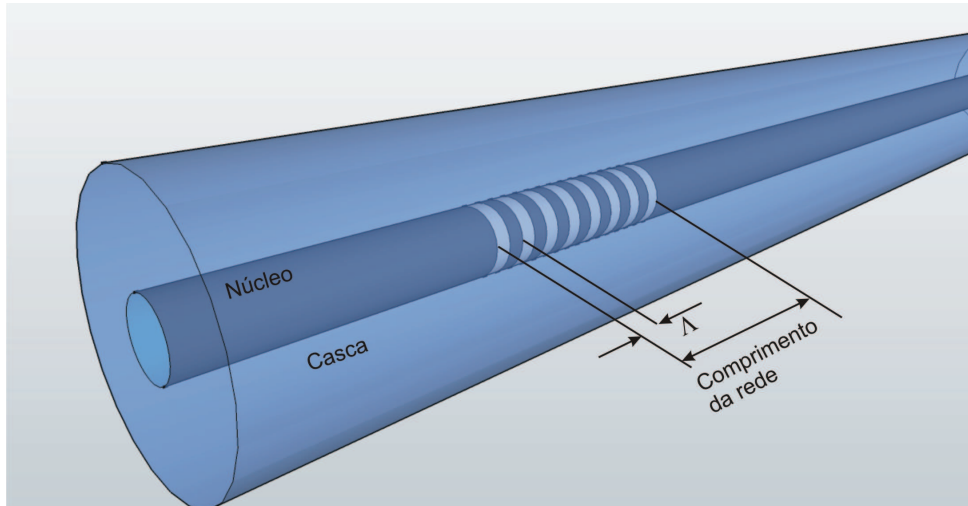


Figura 7: Representação esquemática de uma rede de Bragg escrita em fibra ótica.

de modulação e se $\phi(z)$ tiver dependência com z a rede de Bragg tem gorgeio. O termo $\partial n(z)$ da expressão (28) representa o valor médio da modulação do índice de refração ao longo do período espacial Λ .

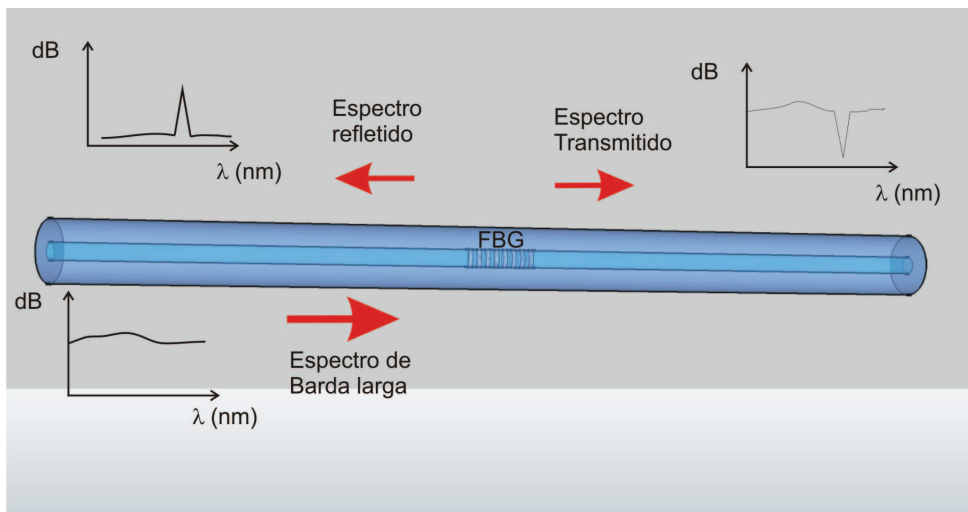


Figura 8: Representação esquemática do espectro refletido e transmitido numa rede de Bragg em fibra ótica.

Nas FBG's o comprimento de onda de Bragg λ_B , ou o comprimento de onda luminosa que é refletida, é dada por(LEE, 2003):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (29)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e Λ é o período da rede. Com a equação (29) podemos verificar que o comprimento de Bragg é modificado com a mudança do período da rede ou com o índice de refração efetivo. Podemos imaginar que a mudança de período da rede possa ser gerada com uma deformação e com a mudança do índice de refração

efetivo devido à temperatura. A obtenção do comprimento de onda de Bragg é demonstrada por Othonos (OTHONOS; KALLI, 1999) através das relações de conservação de energia e conservação de momento.

Além do comprimento de onda de Bragg no espectro de reflexão é importante conhecer a largura desse espectro e a largura de banda. Othonos fornece uma equação para a largura de banda máxima a meia altura (FWHM)¹¹:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \left[\left(\frac{\Delta n}{2n_{nf}} \right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

Na equação 30 l representa o comprimento da rede de Bragg; s é um parâmetro referente a reflexão da rede, onde assume o valor 1, para rede com reflexões próximas a 100% (redes fortes) e 0,5 para redes fracas. Pela equação 30 observamos que se aumentarmos l a largura de banda irá diminuir.

Sensibilidades das Redes de Bragg para Deformação e Temperatura

O comprimento de onda refletido pelas redes de Bragg é dependente do período de modulação (Λ) e do índice de refração efetivo (n_{eff}) e qualquer mudança nesses parâmetros provoca uma variação no comprimento de onda de Bragg (λ_B), isso torna-se interessante para a área de sensoriamento. Kersey (KERSEY et al., 1997) demonstrou que as características das fibras ótica podem ser afetadas por deformações mecânicas, temperatura ou por ambas simultaneamente. Qualquer mudança nos parâmetros da rede de Bragg irão provocar um deslocamento do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$), conhecido como deslocamento espectral:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (31)$$

Onde l é o comprimento da rede e T é a temperatura. Muita informação pode ser extraída da equação 31 analisando os dois termos da equação. O primeiro termo refere-se a deformação da rede, o segundo termo refere-se ao efeito da temperatura que devido a expansão da fibra altera o espaçamento da rede de Bragg. Othonos (OTHONOS; KALLI, 1999) fornece valores de sensibilidade para a deformação das redes de Bragg na terceira janela de comunicação, 1550 nm. Esses valores estão relacionados com a deformação relativa da rede de Bragg em 1,2 pm para cada 1 $\mu strain$ (1 $\mu m/m$) e para a temperatura, a sensibilidade em 13,7 pm/°C.

3.4.3 Sistema de Gravação dos Sensores de Bragg

Uma rede de Bragg consiste na modulação periódica do índice de refração na fibra, essa modulação tem uma periodicidade Λ da ordem de micrometros. Existem dois sistemas

¹¹A sigla FWHM vem da expressão em inglês *Full Width half Maximum*.

bases para a gravação de redes de Bragg: as interferométricas e as que não utilizam um interferômetro. Na técnica interferométrica assim como na técnica holográfica (MELTZ et al., 1999), a modulação do índice de refração é provocada pela interferência de dois feixes coerentes. A técnica de gravação de redes de Bragg por máscara de fase (LOH et al., 1995; HILL et al., 1993b) encontra-se entre as técnicas que não necessitam de um interferômetro. A figura (9) representa a interferência de um feixe laser ao atravessar a máscara de fase, a fibra ótica é posicionada do lado em que ocorre a interferência do feixe laser conforme a representação da figura (10). Essa técnica é a mais difundida devido a sua simplicidade e reprodutibilidade, outra vantagem do sistema de gravação por máscara de fase é que o laser não precisa ser de alta coerência. O processo de gravação utilizado para fazer os sensores de rede de Bragg foi o sistema de gravação por máscara de fase. A máscara de fase consiste numa rede de difração gravada na superfície de uma lâmina de sílica (KASHYAP, 1999). A máscara de fase funciona difratando o feixe incidente em várias ordens (m) de difração. Pode-se estabelecer uma relação entre o período da máscara de fase (Λ_{pm}), o comprimento de onda incidente (λ_{uv}) e o ângulo de incidência do laser UV (KASHYAP, 1999):

Quando o período da rede de Bragg está entre λ_{uv} e $\lambda_{uv}/2$ parte da onda incidente é difratada na ordem ± 1 e o restante da potência na ordem 0.

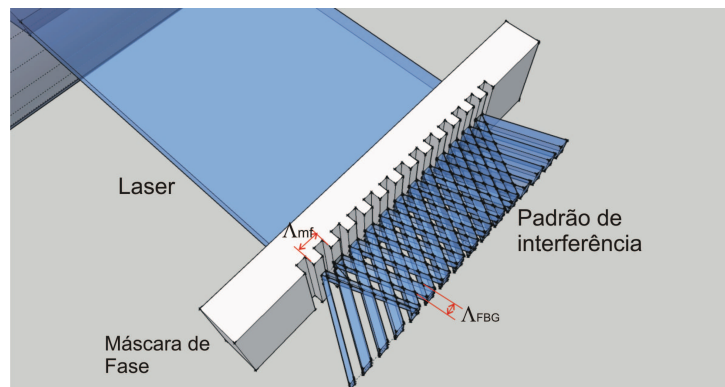


Figura 9: Representação esquemática da interferência provocada pela máscara de fase em um feixe de laser.

Se o ângulo de incidência do laser for normal à máscara de fase, $\theta_i = 0$, a radiação difratada é dividida nas ordens $m = 0$ e $m = \pm 1$, estes últimos produzem um padrão de interferência para a criação das redes de Bragg. O período (Λ) desta rede relaciona-se com o ângulo de difração, $\theta_m/2$:

$$\Lambda = \frac{m\lambda_{uv}}{2\text{sen}\frac{\theta_m}{2}} = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (32)$$

Com a equação 32 sabemos que o período da rede de Bragg, Λ , é metade do período da máscara de fase. Graças a esse fator, para uma mesma máscara de fase sempre teremos o mesmo

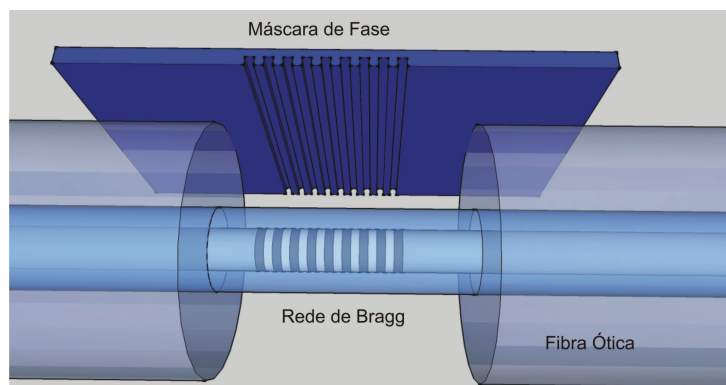


Figura 10: Representação esquemática da posição da rede de Bragg inscrita na fibra ótica pelo processo de gravação com máscara de fase.

comprimento de onda de Bragg, λ_B . O desempenho da máscara de fase pode ser prejudicado, devido a degradação, pelo uso direto do laser com potências elevadas (NGUYEN et al., 1997).

4 METODOLOGIA

4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento consiste em medir não-intrusivamente a velocidade de um fluido escoando internamente em um tubo cobre, através de dois sensores de temperatura previamente instalados na superfície externa do tubo. Os dois sensores de temperatura estão localizados em pontos diferentes do tubo com uma distância de separação conhecida (d) e a temperatura é monitorada em tempo real. Em um primeiro instante do experimento, o fluido estará escoando a uma temperatura inicial (T_1) e em um determinado momento, um pequeno volume de fluido com uma temperatura T_2 , onde $T_2 > T_1$, é introduzido no sistema. Esse pequeno volume de fluido com temperatura T_2 irá representar um pulso térmico ou um degrau de temperatura. Os valores de temperatura são registrados e monitorados instantaneamente e qualquer variação de temperatura na parede externa do tubo será observada. O pulso térmico gera uma variação de temperatura provocando uma mudança nos valores dos dados monitorados no primeiro sensor de temperatura, S_1 , num instante t_1 . Decorrido um tempo t da passagem do pulso térmico no primeiro sensor S_1 , o segundo sensor de temperatura, S_2 , sofrerá a influência da passagem do fluido com temperatura T_2 , em um instante t_2 . Como a distância entre os sensores é d e o tempo t é o tempo que o pulso térmico leva para percorrer a distância entre os dois sensores, podemos obter indiretamente a velocidade média de escoamento do fluido através da relação $\bar{v} = d/t$, o valor de t é obtido da diferença entre t_2 e t_1 . De posse da velocidade média \bar{v} de escoamento do fluido podemos calcular a vazão conhecendo a área interna do tubo e a velocidade média de escoamento.

A montagem do sistema experimental está representada na figura 11 e consiste em sistemas isolados, cíclicos e simétricos de tubos com fluidos frios e de tubos com fluidos quentes, que em determinada região do sistema forneçam as mesmas condições de pressão e de caminho percorrido pelo fluido até um ponto de medição. Isso é possível graças à simetria da montagem experimental de um reservatório de nível constante, até a linha de medição. Para o abastecimento do reservatório de nível constante temos um sistema que é diferenciado pela temperatura do fluido. O fluido que escoará na linha de teste é selecionado por um sistema de válvulas operadas por solenóides, dando controle total do sistema de escoamento da bancada de medição

experimental.

Para uma melhor compreensão do sistema de medição não-intrusivo de vazão por termometria, a montagem experimental é dividida nas seguintes partes:

- Reservatório de Nível Constante;
- Sistema de Fluido Frio;
- Sistema de Fluido Quente;
- Sistema de Válvulas Solenóides;
- Linha de Testes, bancada experimental ou linha de medição;
- Sistema de Controle;
- Sistema de Aquisição de Dados.

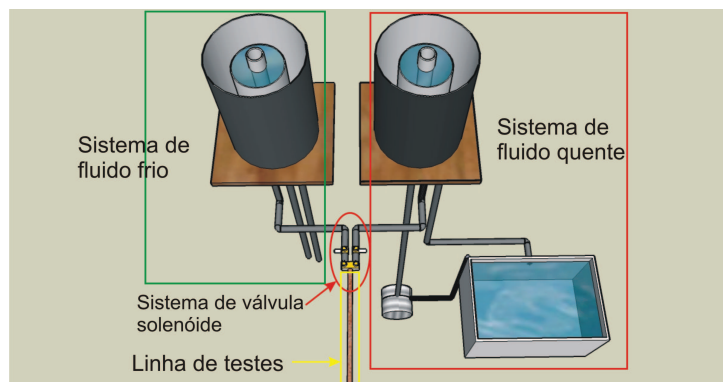


Figura 11: Representação esquemática do sistema de medição de vazão não-intrusiva através da termometria mostrando os sistemas secundários.

4.1.1 Reservatório de Nível Constante

O Reservatório de Nível Constante, representado na figura 12, está fixo à uma altura de 4m, o que fornece energia potencial para o fluido escoar até a linha de testes. Ele servirá para manter uma condição estável do fluido que escoará no tubo da bancada de medição. O reservatório de nível constante possui dois reservatórios idênticos: um para a água fria e outro para água quente. Cada reservatório consiste de três reservatórios concêntricos com diâmetros e alturas diferentes, constituídos de PVC:

- O reservatório de abastecimento: É um reservatório interno concêntrico ao reservatório externo e possui diâmetro de 50mm. Esse reservatório serve para abastecer o reservatório intermediário. É por esse reservatório que o fluido do sistema de abastecimento irá escoar,

e sua função é justamente abastecer o reservatório intermediário mantendo-o sempre com nível constante.

- O reservatório intermediário ou reservatório principal: Está localizado dentro do Reservatório Externo e contém em seu interior o reservatório de abastecimento. O Reservatório Intermediário tem um volume constante e servirá para fornecer o fluido que será utilizado para a bancada de testes. A sua altura é menor que a altura do reservatório de abastecimento. O fluido escoo pelo reservatório de abastecimento até completar o reservatório intermediário. O fluido excedente é coletado pelo reservatório externo. A entrada do tubo que fornece o fluido para a bancada de medição está localizado na base inferior do reservatório principal.
- O reservatório externo tem como função o isolamento térmico do reservatório principal, e também coletar e drenar o excedente de fluido do reservatório principal. O fluxo excedente é escoado por uma linha de dreno¹ constituída por tubo situado na da base do reservatório externo.

A figura 12 representa o Reservatório de Nível Constante.

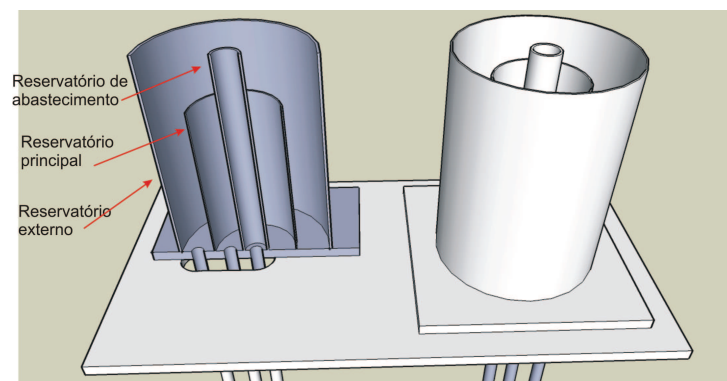


Figura 12: Representação esquemática do reservatório de nível constante. Um dos reservatórios está com um corte para mostrar os reservatórios internos.

O sistema de abastecimento do reservatório de nível constante deve ter vazão suficiente para manter sempre o reservatório intermediário no seu volume máximo para proporcionar uma medida do escoamento confiável. Isso é possível, verificando se há escoamento de água pelo dreno do reservatório externo.

¹A linha de dreno, além de escoar o excedente de fluido, possui uma janela para visualização do escoamento do fluido, esta janela serve para verificar se a linha de abastecimento está suprindo a necessidade de escoamento da linha de testes.

4.1.2 Sistema de Fluido Frio

O sistema de fluido frio representado na figura (11) é a parte mais simples do sistema experimental de medida de escoamento, consistindo unicamente de tubos que levam um fluido com temperatura T_1 até um reservatório suspenso de nível constante e deste até o sistema de válvulas solenóides, linha principal representada na figura (13). Do reservatório suspenso há um tubo que conduz o fluido frio até um ponto onde estão localizadas um conjunto de válvulas solenóides as quais comutam o caminho do fluido frio para a linha de medição ou para uma segunda linha de dreno. Os tubos deste sistema são constituídos de tubos de PVC com diâmetro nominal de 25mm . O fluido utilizado é a água à temperatura ambiente (API, 2010) e o mecanismo de abastecimento do Reservatório Suspenso de Nível Constante é a própria pressão de água da rede de abastecimento UTFPR, que escoa pela linha de abastecimento representada na figura (13). Quando iniciada a sessão de testes, o fluido frio escoa diretamente pela linha de testes², o valor da temperatura é registrado pelo sistema de aquisição e anotado em uma planilha de medições.

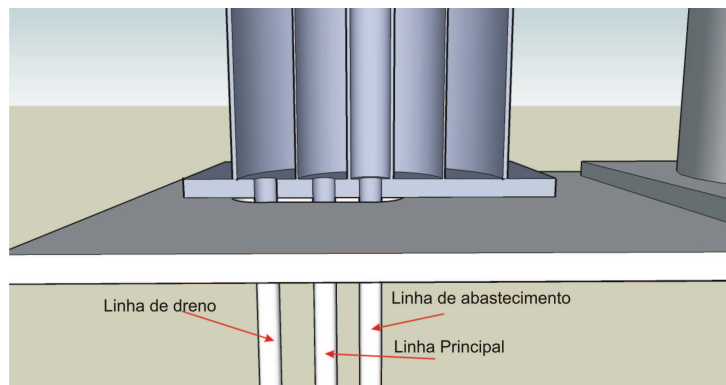


Figura 13: Representação esquemática do sistema de abastecimento de reservatório de nível constante usado no sistema de medição de vazão não-intrusiva através da termometria.

4.1.3 Sistema de Fluido Quente

O sistema de fluido quente serve para fornecer o pequeno volume de fluido a uma temperatura T_2 ($T_2 > T_1$) que simulará o pulso térmico. Este sistema é mais complexo que o sistema de fluido frio. As condições de escoamento de pulso térmico deverão ser idênticas às do fluido frio, com exceção da temperatura, deverão ser as mesmas nos pontos de medição. A configuração do reservatório superior é representada na figura (14) e o seu sistema de reservatório suspenso é espelhado na figura 13 para manter a simetria do sistema.

²Para simplificação do sistema de controle de válvulas, optou-se por deixar o fluido frio escoando diretamente pela linha de testes; quando comutadas as válvulas solenóides, trocamos o fluido que escoava.

O sistema de fluido quente é um pouco mais complexo que o sistema de fluido frio, consistindo de dois reservatórios, um sistema de abastecimento e duas linhas de dreno.

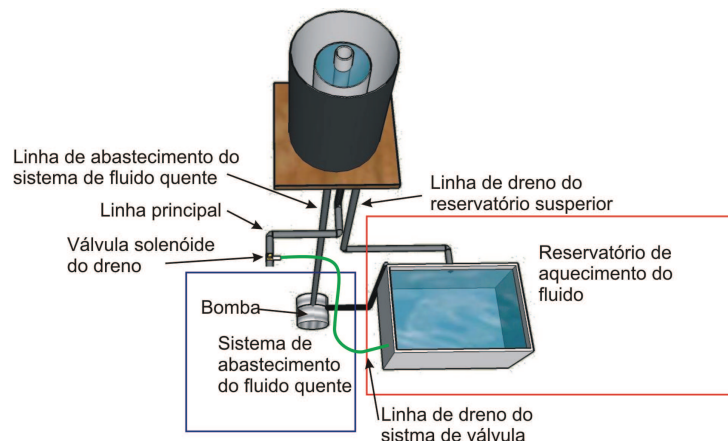


Figura 14: Representação do sistema de fluido quente usado no sistema de medição de vazão não-intrusiva através da termometria..

- Reservatório de aquecimento do Fluido: Este reservatório serve para aquecer e manter o fluido a uma temperatura T_2 . O aquecimento é feito por meio de resistências elétricas e é controlado manualmente pelo operador do experimento. Esse reservatório é mantido isolado termicamente do meio ambiente. Esse reservatório é abastecido com o fluido até um nível previamente estabelecido. O reservatório de aquecimento possui várias linhas de escoamento:
 - Linha de abastecimento do reservatório.
 - Linha de dreno do fluido quente, quando este não está escoando na linha de testes. Essa linha de dreno é importante para manter sempre o fluido com temperatura constante na entrada da linha principal, devido a circulação do fluido. O ponto de dreno desta linha fica próximo do sistema de válvulas solenóides evitando assim que a temperatura do fluido seja diferente da temperatura do reservatório de aquecimento.
 - Linha da válvula de controle de escoamento da bomba, que serve para controlar a quantidade de fluido que escoar pelo dreno do reservatório de nível constante.
 - Linha de dreno do reservatório suspenso de nível constante.
- Sistema de Abastecimento do reservatório de nível constante: O sistema de abastecimento consiste de tubos que levam o fluido do reservatório de aquecimento até uma bomba, por gravidade, e desta até o reservatório suspenso de nível constante de fluido quente. A tubulação que sai da bomba até o reservatório suspenso é direta e não possui nenhuma curva.

- Dreno do reservatório suspenso externo: serve para não desperdiçar o fluido com temperatura T_2 , o qual retorna para o reservatório de aquecimento. Neste dreno temos, como no sistema de fluido frio, uma janela para o monitoramento visual do fluido.

O fluido é escoado do reservatório de aquecimento para o reservatório suspenso de nível constante através de uma bomba hidráulica³. A necessidade de sangria do sistema para evitar bolhas de ar foi eliminada. Esta bomba é aterrada para evitar ruído nas aquisições de dados.

4.1.4 Sistema de Válvulas Solenóides

O Sistema de Válvulas Solenóides, esquematizado pela figura (15), é essencial para o experimento devido ao controle total do fluido que escoará pela linha de testes. O sistema consiste de três válvulas solenóides:

- Duas válvulas solenóides com uma entrada e uma saída, nomeadas no trabalho como válvulas de drenagem. Estas válvulas têm como função fazer a circulação do fluido quando este não está escoando pela linha de medição ou linha de testes. Isso é importante para manter a temperatura do fluido constante, através da circulação do fluido pelo seu respectivo sistema.
- Uma válvula com duas entradas e uma saída⁴. Esta válvula seleciona o fluido com temperatura T_1 ou T_2 que escoará pela linha de medição. Quando um determinado fluido estiver escoando por esta válvula a válvula de drenagem do fluido oposto estará acionada. É importante salientear que esta válvula sempre permitirá o escoamento de um fluido pela linha de testes.

O sistema de controle das válvulas solenóides é realizado por meio de um painel e o acionamento delas é realizado por meio de relês. Quando as válvulas encontram-se fechadas é porque o solenóide está desligado. A válvula de duas entradas e uma saída possui dois solenóides: um acoplado ao sistema de fluido com temperatura T_1 , solenóide *A*, e o outro acoplado ao fluido com temperatura T_2 , solenóide *B*. Quando o solenóide *A* está ligado, o solenóide *B* está desligado, permitindo a escolha do fluido que escoar na linha de medição. Para que o fluido que não esteja escoando na linha de medição continue circulando para manter a temperatura desejada, a válvula de uma entrada é ligada. Para o fluido frio, usamos o solenóide *C* e para o fluido quente o solenóide *D*. Então, quando o solenóide *A* está ligado, o solenóide *B*

³Foi usada uma bomba hidráulica de 1/3 cv, marca Schneider, série 57.07.07827-00250.

⁴As válvulas solenóides utilizadas, tanto a de uma ou a de duas entradas são válvulas solenóides usadas em máquinas de lavar roupas. Não possuíam nenhuma especificação unicamente a origem, que era chinesa.

está desligado. No caso da liberação do fluido com temperatura T_2 , o solenóide B estará ligado e o solenóide A desligado. A válvula de uma entrada serve para realizar a circulação do fluido que não estará escoando pela linha de medição. Quando o fluido com temperatura T_1 estiver sendo drenado o solenóide C estará ligado. Quando o fluido com temperatura T_2 for drenado, o solenóide D estará ligado. Essas válvulas são acionadas quando o fluido de sua linha não estiver escoando na linha de medição, realizando a circulação do fluido. Quando a chave está na posição 0 os solenóides A e D estão energizados, isto é o fluido frio estará escoando na linha de medição e o fluido quente estará circulando no sistema de fluido quente. Quando a chave está na posição 1, os solenóides B e C estarão energizados, isto é, o fluido quente estará escoando na linha de medição e o fluido frio estará circulando no sistema de fluido frio.

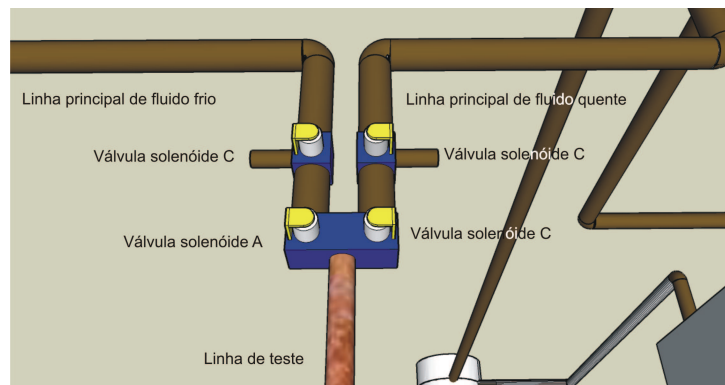


Figura 15: Representação esquemática do sistema de de válvulas solenóides usado no sistema de medição de vazão não-intrusiva através da termometria.

4.1.5 Linha de Testes

A seção de testes, está localizada depois do sistema de válvulas solenóides, figura (15) e consiste de um tubo de cobre com cinco metros de comprimento. Na parede externa do tubo estão localizados os sensores de temperatura. A um metro e meio da entrada do tubo de cobre está localizado o primeiro sensor, que irá registrar a mudança de temperatura devido à ação do pulso térmico. Esse ponto é chamado de P_0 . O segundo sensor estará localizado a um metro e meio do primeiro sensor, isto é, a três metros da entrada do tubo de cobre e será chamado de ponto $P_{1,5}$. O fluido que escoar pela linha de medição é controlado por um sistema de válvulas solenóides, esse registro possui duas entradas e uma saída. Em uma das entradas está conectado a saída do Sistema de Fluido frio e na outra entrada o Sistema de Fluido Quente. Na saída da linha de teste o fluido é escoado para um reservatório ou quando necessário é descartado no sistema de água pluvial da UTFPR. Além das linhas sensoras externas foi colocada uma linha sensora interna. Esta linha sensora interna é idêntica a linha sensora ótica externa. O sensor interno é introduzido no tubo de cobre por meio de uma entrada lateral. Para melhor

compreensão a figura 16 mostra um desenho esquemático da posição dos sensores.

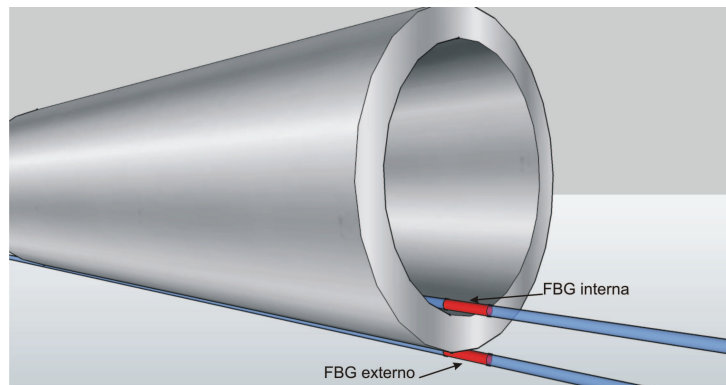


Figura 16: Representação esquemática dos sensores óticos interno e externo colocados em um ponto de medição.

4.1.6 Sistema de Controle

O sistema de controle ou painel central, figura 17 tem as seguintes funções:



Figura 17: Painel de controle do sistema de medição não-intrusivo de vazão através de termometria.

- Ligar e desligar a bomba hidráulica;
- Ligar e desligar as resistências elétricas para aquecimento do reservatório.
- Ligar e desligar o sistema de válvulas solenóides de controle do pulso térmico. Quando a chave está na posição 0, o fluido frio escoar na linha de medição. Ao comutar a chave para a posição 1, o fluido que irá escoar pela linha de teste será o fluido quente. Por enquanto, o tempo de escoamento do fluido quente é realizado manualmente.

4.2 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO POR TERMOMETRIA

Antes de iniciar as medidas de vazão por termometria são realizados alguns procedimentos experimentais para auxiliar na comparação dos resultados que serão obtidos. Precisamos conhecer a vazão do sistema de medida para comparar com os resultados obtidos, ou precisamos conhecer a vazão para saber em que regime de escoamento estamos lidando. Os equipamentos de medidas de vazão comerciais disponíveis no LACIT são somente para número de Reynolds maiores que 10.000 ou seja para regime de escoamento turbulento. Em nosso experimento iremos testar os três regimes variando o número de Reynolds de 1.500 a 18.000. Como a vazão é a quantidade de fluido que passa pela seção transversal do tubo, ou em outras palavras o volume de fluido que escoar por segundo (m^3/s), o primeiro passo foi obter o valor mais próximo possível da área da seção transversal da linha de teste. Como ela é feita de um cano de cobre, apresentava um perfil levemente oval e para facilitar os cálculos o perfil da seção transversal foi considerado circular. O valor do raio foi encontrado com o seguinte procedimento: o comprimento total do tubo foi medido e seu interior foi preenchido com água. Com todo o cuidado foi retirada a água e seu volume foi obtido. Com isso obtivemos o volume interno total do tubo, sabemos que o volume (V) é igual a área da seção transversal (A) vezes a altura (h), $V = A \cdot h$. A altura é o comprimento do tubo e a área é a área de uma circunferência, é $A_c = \pi \cdot r^2$. Através deste método obtemos o raio interno r_i do tubo da bancada de teste. Com o sistema ligado é realizada a verificação do escoamento da linha de drenagem do reservatório de nível constante, tanto do fluido quente quanto de fluido frio. Isso é fundamental para saber se o reservatório principal de fluido quente e fluido frio estão preenchidos. Se isto não acontecer devemos aumentar a vazão da linha de abastecimento. Após checar o escoamento da linha de abastecimento deve-se escolher a vazão da linha de teste através de uma válvula situada no final do tubo de testes. Esta válvula permitirá escolher o regime de escoamento. O valor da vazão é obtido com um béquer, um cronômetro e uma balança. Com o béquer e um cronometro podemos obter a vazão volumétrica, mas como o nosso trabalho envolve o uso da termometria, as medidas de vazão para diferentes temperaturas terá diferentes valores e como comentado nos capítulos anteriores a vazão mássica é a mais precisa. Antes de começar a medida, o béquer é pesado e seu valor é descontado no valor da balança. Logo após com o béquer e o cronômetro, é coletada uma quantidade do fluido em determinado intervalo de tempo. O intervalo tempo varia muito com a vazão, de aproximadamente 10s para altas vazões a 80s para baixas vazões. Após a coleta, o béquer com o fluido coletado é pesado, e o valor da massa do fluido e o respectivo tempo de coleta é anotado. Esse processo de coleta é repetido cinco vezes e com isso podemos tirar uma vazão média. Com o valor da vazão média podemos relacionar o regime de escoamento através do número de Reynolds.

4.2.1 Número de Reynolds R_e

O número de Reynolds (R_e), fornece um número adimensional referente ao regime de escoamento, conforme a equação 12, que relaciona a velocidade média (\bar{v}), o diâmetro interno do tubo (d_i) e a viscosidade cinemática do fluido (ν). Como o nosso trabalho envolve fluidos com diferentes temperaturas, o problema de usar a equação (12) é que o valor da viscosidade (ν) é extremamente dependente da temperatura do fluido (WEAST, 1998; FOX et al., 2003). A relação da viscosidade cinemática com a temperatura é obtida empiricamente e é fornecida pela equação 33:

$$\nu(T) = (T^4 \cdot 0,7599 \cdot 10^{-13} - T^3 \cdot 0,1389 \cdot 10^{-10} + T^2 \cdot 0,1121 \cdot 10^{-8} - T \cdot 0,5481 \cdot 10^{-7} + 0,7599 \cdot 10^{-7}) \quad (33)$$

Além do valor da viscosidade cinemática (ν) em m^2/s , precisamos:

- Do diâmetro interno do tubo (d_i). No caso do nosso trabalho $d_i = 0,011 \text{ m}$.
- Da massa específica da água (m_e). O valor de $m_e = 994 \text{ kg/m}^3$ foi obtido na literatura (WEAST, 1998).
- Da temperatura do fluido T .
- Do valor da vazão mássica (Q_m) em kg/s .
- Do valor da vazão volumétrica (Q_v) em m^3/s , a conversão de Q_m em Q_v é dada pela equação 34:

$$Q_v = \frac{Q_m}{m_e} \quad (34)$$

- Da velocidade média (\bar{v}) em m/s , obtido por:

$$\bar{v} = \frac{Q_v}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} \quad (35)$$

Com os dados obtidos das equações (33) e (35) junto com o valor de d_i podemos encontrar o número de Reynolds (Re) para uma determinada temperatura:

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot d}{\nu_c} \quad (36)$$

4.3 SISTEMA DE INTERROGAÇÃO DAS FBG'S

A vantagem do uso de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg inscritas em fibras óticas é que o sinal de saída é dado pelas características da rede. Isso permite seu uso como auto referência. Como a informação codificada usada no sensor é um comprimento de onda (λ), constituindo um parâmetro absoluto, a saída do sinal não depende diretamente da intensidade do sinal, das atenuações provocadas por conectores das fibras óticas e acopladores ou da potência da fonte. Com base nesta característica dos sensores de redes de Bragg, podemos ter vários sensores com λ diferentes na mesma fibra ótica.

O sistema de interrogação utiliza uma fonte ótica que emite um espectro de banda larga o qual é guiado até os sensores de rede de Bragg por fibras óticas. Entre o caminho da fonte até os sensores óticos temos um circulador ótico. A função do circulador ótico é evitar que a luz refletida pelos sensores volte para a fonte, direcionando-a para outro caminho. A luz refletida pelas duas redes de Bragg é guiada através de um acoplador ótico de uma entrada e duas saídas. Cada saída terá um filtro ótico sintonizável previamente regulado para um determinado pico de reflexão. A intensidade luminosa final é direcionada para um fotodetector. O sinal amplificado é coletado por uma interface comercial da *National Instruments* a NI USB 6008, a qual possui quatro entradas analógicas independentes ou oito entradas analógicas usando o terra comum. Os dados obtidos por esta interface são armazenados e plotados em um laptop através do programa *LabView* 8.6. Através de uma interface gráfica é possível monitorar em tempo real cada sensor ótico junto com o respectivo termopar.

O diagrama de blocos do sistema de interrogação é mostrado na figura 18. Para a montagem do sistema de interrogação de sensores óticos baseados em redes de Bragg, necessitamos de uma fonte luminosa, de um circulador ótico, conectores de fibra ótica, filtros óticos sintonizáveis e uma aparelhagem eletrônica de detecção. A fonte luminosa utilizada foi uma *ASE Broadband Light Source Module*, modelo ALS 10 M. Os filtros óticos de referência utilizados foram *JDS Fitel TB4500 1530 1560* e $\Delta\lambda = 2nm$. Para a detecção de sinal foi utilizado um fotodetector comercial *FGA04 InGaAs Photodiode*, junto com um sistema de amplificação de sinal (MARTELLI et al., 2004; GRABARSKI et al., 2007).

4.4 CONTRUÇÃO DOS SENSORES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS

Os sensores de rede de Bragg em fibra ótica (FBG) foram construídos no Laboratório de Nano Estruturas da UTFPR, pelo processo de gravação direta com máscara de fase. O laser utilizado foi o de Excímero, Xantos o qual opera no comprimento de onda de 248 nm. A montagem experimental de gravação das FBG's é mostrada na figura 19. A fibra ótica usada no processo foi a fibra padrão SMF28 da DRAKTEL. A fibra foi hidrogenada para o aumento da

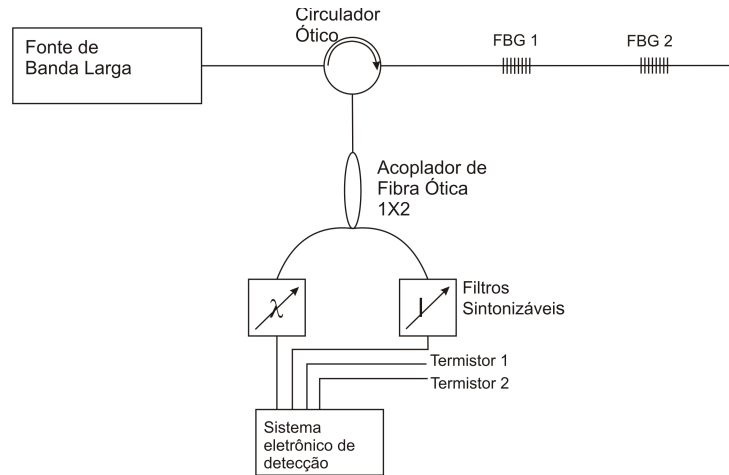


Figura 18: Diagrama de bloco do sistema de interrogação das FBG's usado no sistema de medição não-intrusiva de vazão através da termometria. Figura adaptada da referência (GRABARSKI et al., 2007)

fotosensibilidade. Primeiramente os comprimentos de onda foram escolhidos de acordo com os usados por Grabarski *et. al.* (GRABARSKI et al., 2007), $\lambda_{B1} = 1542nm$ e $\lambda_{B2} = 1555,8nm$. A máscara de fase para a obtenção das redes com o pico de reflexão em 1555nm era com gorgeio e isso provocava redes com maior largura de banda. Outro problema apresentado por esta rede de Bragg com o espectro de reflexão em 1555 nm foi a resposta do interrogador ótico que não era linear com a potência de entrada, provocando outros problemas nas medidas como por exemplo a saturação do sinal. Para contornar este problema, foram testadas várias outras combinações de redes de Bragg com um afastamento dos picos de reflexão em aproximadamente 10nm. O conjunto de sensores que tiveram a melhor resposta linear foram para os picos de 1533nm e 1545nm. O processo de gravação de redes de Bragg consiste basicamente em manter a fibra ótica em contato com a máscara de fase, a posição da fibra ótica em relação aos sulcos da máscara de fase é transversal figura 10. O período da rede de Bragg será metade do período da máscara de fase (KASHYAP, 1999). Para gravar as rede de Bragg com 1533 nm e 1545nm foram usadas as máscaras com passo de 1060,0 nm e 1068,50 nm.

4.4.1 Encapsulamento dos sensores

No processo de gravação de redes de Bragg é retirada a camada de proteção (acrilato), da fibra ótica. Sem essa proteção a fibra torna-se mais frágil, e com a ação do laser a fibra torna-se mais frágil também a tensões mecânicas. Uma solução para minimizar este problema é realizar uma cobertura da fibra. Essa cobertura pode ser feita através de um polímero fotosensível ou com o uso de uma jaqueta metálica. Numa primeira tentativa de medição da vazão por termometria foram usados sensores de Bragg sem nenhuma proteção. Isso tornava o manuseio bastante delicado. Foi colocada uma linha sensora ótica dentro do tubo, para comparação com

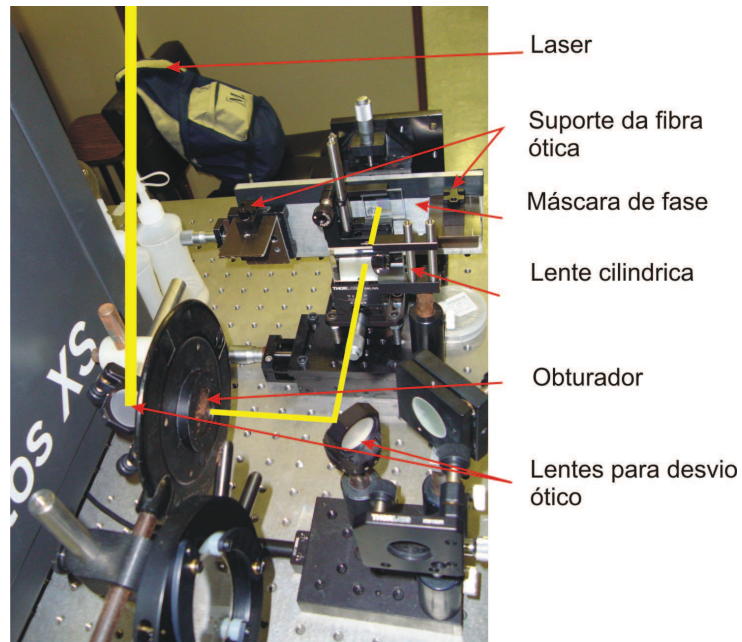


Figura 19: Montagem esquemática do sistema de gravação de FBG's com máscara de fase.

a linha sensora ótica externa. Para isso, as redes de Bragg foram encapsuladas com uma jaqueta metálica, baseado no experimento de Kiwan(KIWAN; AL-NIMR, 2002). Mas no nosso trabalho, optou-se por encapsular somente o local da rede de Bragg. O capilar metálico usado no encapsulamento foi retirado de catéter hospitalar e na região central do capilar foi desbastado para que a rede de Bragg estivesse em contato com o fluido de acordo com a figura (20).

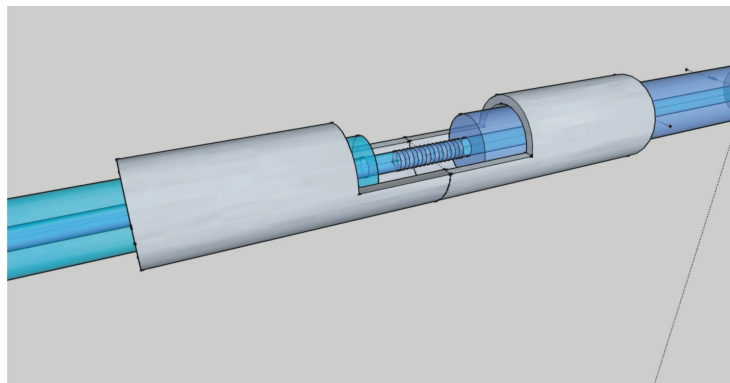


Figura 20: Desenho esquemático do encapsulamento metálico usado nos sensores óticos.

Foram montadas outras versões de encapsulamento como usar uma linha de nylon de espessura $0,30\text{mm}$ como sustentação da linha ótica sensora. Para a adesão da linha de nylon com a linha sensora ótica foram usados vários materiais:

- Cola de silicone;
- Adesivo epoxi;

- Cola quente ou silicone em bastão.

Essas novas tentativas de encapsulamento não foram testadas experimentalmente devido à dificuldade de colocar a linha sensora interna. Essa dificuldade foi atribuída ao atrito do silicone e do adesivo epoxi com a parede interna do tubo de cobre. Como a linha não deslizava facilmente, era necessário aplicar uma força de maior intensidade, a qual danificava o sensor ótico.

4.4.2 Calibração dos Sensores Óticos

Foram verificadas as respostas dos sensores à variação de temperatura, de 15°C a 53°C , por um interrogador comercial⁵ conforme mostrado nas figuras (21) e (23) para os sensores com o pico de reflexão em 1533nm e 1545nm respectivamente. Percebe-se um comportamento linear com uma pequena variação entre 23°C e 40°C . Em conjunto com as medições da variação do comprimento de onda com a variação de temperatura foram realizadas medições com o interrogador com filtro sintonizável para os mesmos sensores óticos, obtendo a resposta em tensão (V) à mudança a temperatura conforme os gráficos mostrados nas figuras (22) e (24) para os sensores com o pico de reflexão em 1533nm e 1545nm respectivamente.

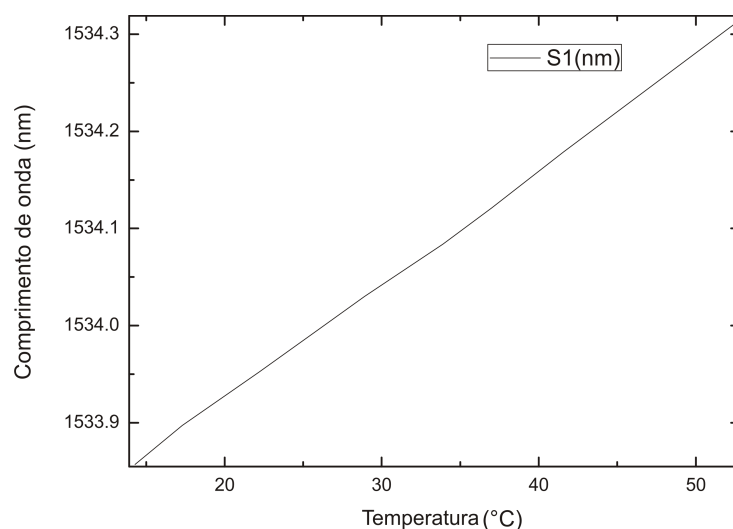


Figura 21: Gráfico da resposta do sensor ótico com o pico de reflexão em 1533nm com variação de temperatura, resposta obtida pelo interrogador comercial mine OSA.

Quando observado os gráficos plotados com os dados de comprimento de onda observamos uma pequena irregularidade em 24°C e em 39°C . Essa mudança provavelmente é devido a oscilações na fonte e perdas nas conexões da fibra ótica. Essa descontinuidade é bem visível nos sistemas de interrogação por filtros sintonizáveis já que sua resposta é fornecida pela conversão da intensidade do sinal luminoso em intensidade elétrica.

⁵FOSS Spectraleye, o qual fornece o valor do comprimento de onda do pico de reflexão do sensor ótico.

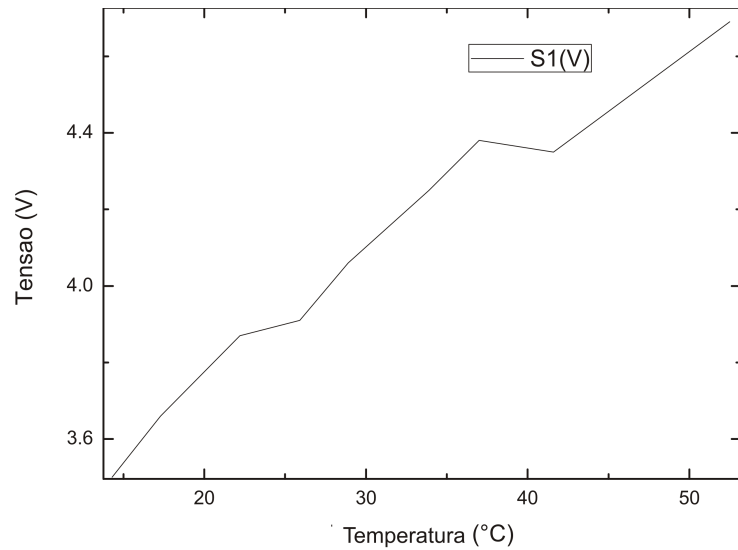


Figura 22: Gráfico da resposta do sensor óptico com o pico de reflexão em 1533nm com variação de temperatura, resposta obtida pelo interrogador de filtro sintonizável.

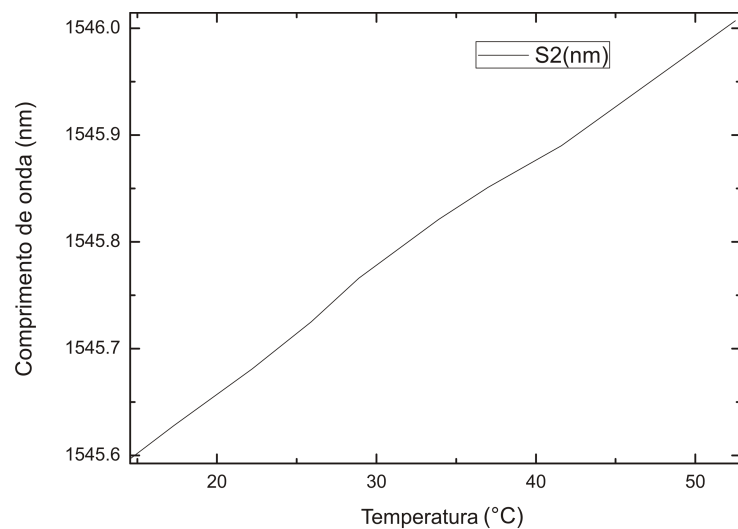


Figura 23: Gráfico da resposta do sensor óptico com o pico de reflexão em 1545nm com variação de temperatura, resposta obtida pelo interrogador comercial mine OSA.

4.5 METODOLOGIA

Depois do sistema de interrogação e monitoramento serem ligados, do sistema do fluido quente atingir a temperatura desejada⁶ e do sistema de fluido frio estar abastecido e escoando pela linha de teste, foram feitas as medidas de vazão mássica com a balança e o cronômetro e finalmente calculamos o número de Reynolds, para verificar o regime de escoamento. Se o número de Reynolds não é o desejado, altera-se a posição do registro instalado no final da linha de testes e verificamos novamente a vazão mássica até conseguir o número de Reynolds

⁶No começo foi utilizado 30°C a mais que a temperatura do fluido frio, e depois foi estipulado em 53°C devido à enorme variação de temperatura do fluido frio entre um dia e outro.

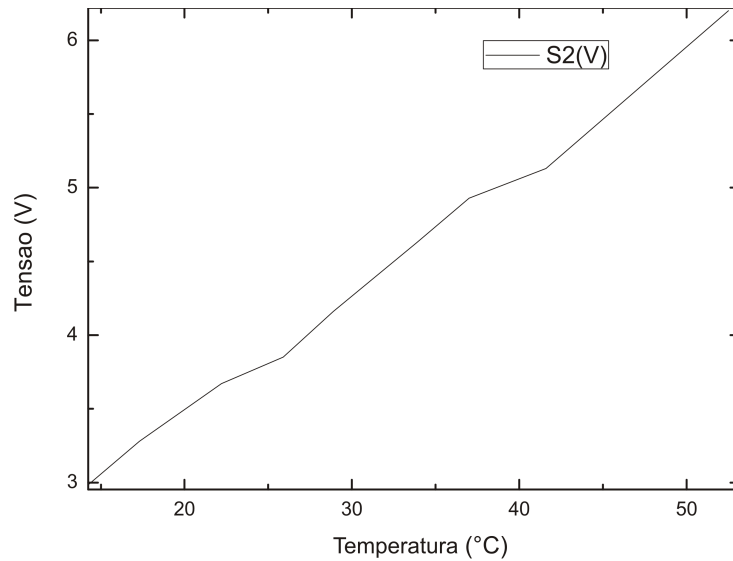


Figura 24: Gráfico da resposta do sensor óptico com o pico de reflexão em $1545nm$ com variação de temperatura, resposta obtida pelo interrogador de filtro sintonizável.

adequado. Depois de definir o regime de escoamento realizamos uma bateria de medidas:

- A primeira medida é realizada para conhecer o tempo necessário para a temperatura da parede externa no ponto onde está localizado o sensor atingir o equilíbrio. Essa medida é importante para definir o tempo do pulso térmico e verificar se o sistema de interrogação não satura o sinal. Depois de se estabelecer o tempo de equilíbrio térmico do sensor com o fluido quente realizamos mais quatro medidas para verificar a reprodutibilidade e repetibilidade do sistema.
- Na medida seguinte é realizada uma variação pulsada de temperatura em forma de degrau para avaliar a resposta do sistema. O nome degrau é devido à forma com que é liberado o pulso térmico, pois é realizado na sequência um pulso de 10s seguido de um intervalo de 10s, repetida esta sequência cinco vezes consecutivas.
- Finalmente são realizados pulsos com durações diferentes. São testados pulsos com 1s, 3s, 5s, 10s, 15s, 30s e 50s após o término do pulso espera-se o sistema entrar em equilíbrio com o fluido de temperatura T_1 e aplica-se o pulso seguinte. Estes pulsos ajudam a estabelecer um valor mínimo para o tempo do pulso.

Este padrão de medidas citado acima é realizado duas vezes, pelo fato que instalamos sensores de Bragg na parede externa e interna do tubo. Como o sistema de interrogação só permite a leitura de dois sensores óticos alternamos as medidas das linhas sensoras óticas com o uso de um analisador de espectro ótico (OSA⁷). Em um conjunto de medições, temos sempre

⁷A sigla OSA vem do termo em inglês *Optical Spectrum Analyzer*.

três linhas sensoras medidas:

- Linha sensora com os termopares separados de uma distância de $1,5m$;
- Linha sensora ótica externa com as redes de Bragg separadas de $1,5m$;
- Linha sensora ótica interna com as redes de Bragg separadas de $1,5m$.

Os dados obtidos nas medidas são gravados em uma pasta e posteriormente são tratados.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na bancada experimental de medidas não-intrusivas de vazão através da termometria, assim como a discussão destes resultados. Serão comparados os sensores de rede de Bragg fabricados no Laboratório de Nanoestruturas-LANOE da UTFPR através do processo de gravação de redes de Bragg por máscara de fase com os termopares comerciais (OMEGA SA1-T Series). Nas próximas seções serão discutidos os resultados em conjunto com a análise dos resultados obtidos pelos sensores óticos e pelos termopares.

5.1 SENSORES DE REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS

Conforme descrito anteriormente, para o experimento de medição não-intrusiva da vazão através da termometria, necessitamos de dois sensores de temperatura. Os sensores utilizados neste experimento foram feitos no Laboratório de Nanoestruturas-LANOE da UTFPR pelo processo de escrita de redes de Bragg através da exposição direta com máscara de fase. Foram gravadas duas redes com o pico de reflexão nos comprimentos de onda de $\lambda_1 = 1534nm$ e $\lambda_2 = 1545,49nm$. Para o experimento foram montadas duas linhas sensoras: uma linha sensora interna e uma linha sensora externa. A linha sensora interna, cujos picos de reflexão das redes de Bragg são apresentados na figura (25), foi colocada dentro do tubo de cobre através de duas entradas laterais, levemente esticada e descansada na parede interna inferior do tubo para evitar o curvamento da linha sensora, devido à falta de suportes internos. A vantagem de se ter uma linha sensora interna está em conhecer as condições de temperatura na parede interna do tubo de cobre.

A linha sensora externa, cujos picos de reflexão das redes de Bragg, é mostrado na figura (26), foi colocada na parede externa do tubo de cobre na parte inferior, aderida ao tubo através de fita adesiva. A posição de seus sensores é aproximadamente a mesma dos sensores da linha sensora interna.

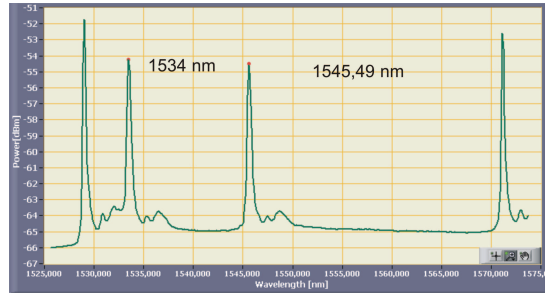


Figura 25: gráfico do espectro refletido dos sensores óticos da linha sensora interna, o primeiro e último picos representam os picos de referência do sistema de interrogação comercial.

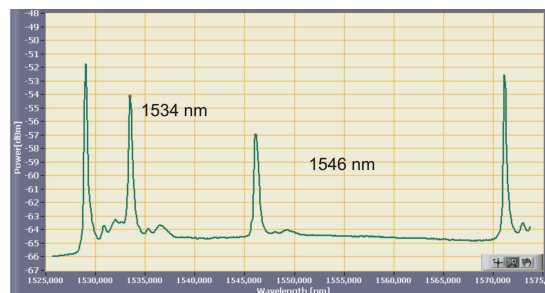


Figura 26: Gráfico do espectro refletido dos sensores óticos da linha sensora externa, o primeiro e último picos representam os picos de referência do sistema de interrogação comercial.

5.2 GERAÇÃO DOS GRÁFICOS DE TENSÃO VERSUS TEMPO DE EVOLUÇÃO

Com os dados obtidos pelo experimento de medição não-intrusiva de vazão através da termometria, podemos graficar a tensão gerada no interrogador como função do tempo de evolução da medida do pulso térmico. No caso dos termopares a própria placa de aquisição de dados amplifica e converte o sinal de tensão em temperatura. No caso dos sensores óticos baseados em redes de Bragg não é realizada uma aproximação do sinal com a temperatura devido ao ajuste do filtro sintonizável com o pico de reflexão da rede de Bragg, que é feito na primeira calibração do equipamento. Para a comparação dos quatro sensores é realizada a normalização dos gráficos, devido à resposta linear de ambos os sensores. Para uma melhor visualização dos gráficos gerados com os dados obtidos no experimento, nesta seção serão mostrados individualmente os gráficos dos sensores sem nenhum tratamento. Primeiro vamos apresentar os dados referentes aos termopares. A figura (27) e a figura (28) representam os gráficos da resposta dos termopares para o tempo de evolução do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ respectivamente¹. Nesses gráficos devido à interface de aquisição do sinal temos uma aproximação do valor da temperatura medida com a tensão fornecida, $10^\circ C$ equivalem a $0,1V$. Os dados obtidos representam a passagem do pulso térmico. Nesta medida foi deixado

¹Lembrando que o ponto P_0 corresponde a um ponto distante $1,5m$ do início do tubo metálico e o ponto $P_{1,5}$ corresponde a uma distância de $3m$ metros do início do tubo de cobre, mantendo assim uma distância (d) entre os sensores de $1,5m$.

o tempo do pulso térmico suficiente para a parede externa do tubo atingir o equilíbrio térmico com a temperatura T_2 e após a passagem deste é deixado atingir o equilíbrio térmico com a temperatura T_1 .

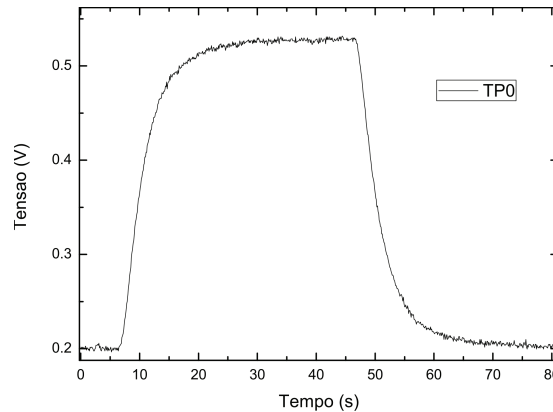


Figura 27: Gráfico da evolução temporal da resposta do termopar ao pulso térmico no ponto P_0 , onde está localizado o sensor 1, $TP0$.

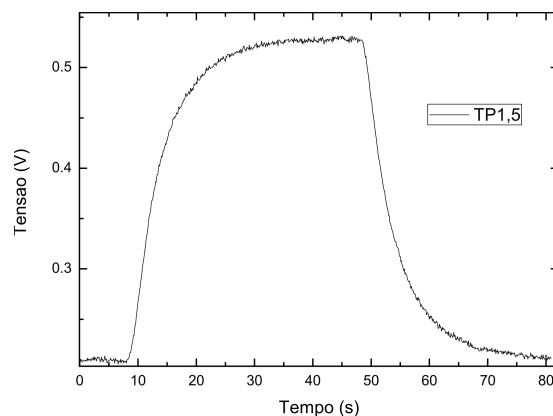


Figura 28: Gráfico da evolução temporal da resposta do termopar ao pulso térmico no ponto $P_{1,5}$, onde está localizado o sensor 2, $TP1,5$.

Os dados referentes aos sensores óticos baseados em redes de Bragg gravados no núcleo da fibra ótica são mostrados nas figuras (29) e (30) e representam os gráficos da resposta dos sensores óticos para a evolução do pulso térmico para os pontos P_0 e $P_{1,5}$ respectivamente. A calibração do sistema é realizada a cada troca de linha sensora ótica, interna ou externa, e para isso é deixado o fluido com temperatura T_2 escoando no tubo de cobre e realizado o ajuste da tensão no interrogador de FBG's através dos filtros sintonizáveis, adotou-se o valor do sinal em aproximadamente 6V.

Para podermos comparar os sensores devemos normalizar os dados obtidos conforme a figura (31). Neste gráfico temos os sensores comerciais (T) e óticos (SO) no ponto P_0 e $P_{1,5}$, $TP0$, $TP1,5$ e $SOP0$ e $SO1,5$ respectivamente. Com esses podemos achar o tempo que o pulso térmico levou para passar pelos sensores separados pela distância de 1,5m. Para isso

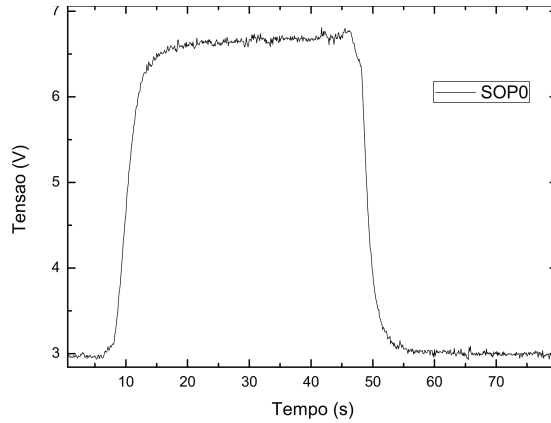


Figura 29: Gráfico da evolução temporal da resposta do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto P_0 , onde está localizado o sensor 1, SOP_0 .

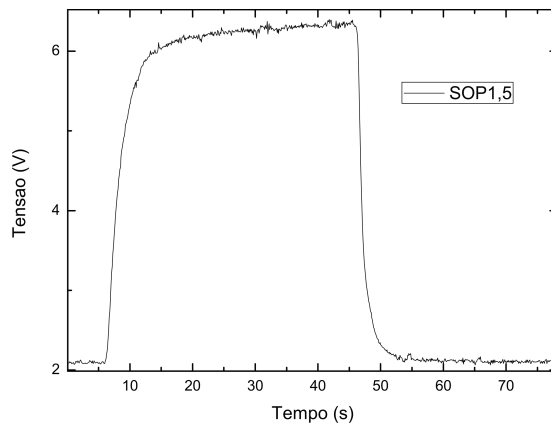


Figura 30: Gráfico da evolução temporal da resposta do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto $P_{1,5}$, onde está localizado o sensor 2, $SOP_{1,5}$.

escolhemos um valor de temperatura entre T_1 e T_2 . No caso do gráfico normalizado foram escolhidos valores para 20%, 50% e 80% do valor de intensidade normalizada máxima.

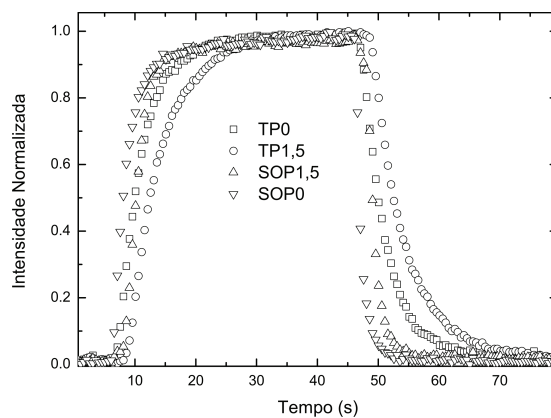


Figura 31: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos e comerciais, na evolução do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$.

Ainda foram obtidos dados referentes a medidas dos sensores óticos através de um

interrogador comercial². O sistema de aquisição de dados pelo interrogador com filtro sintonizável só permite a coleta de dados de dois sensores óticos e a interface de aquisição de dados só permite coletar o sinal de quatro sensores, os dois convencionais e dois de uma linha sensora ótica, ou a externa ou a interna. Como uma linha sensora estava livre, o processo de medida era otimizado com o uso de um interrogador comercial que forneceu os gráficos das figuras 32 e 33. A figura 34 mostra o gráfico normalizado da resposta dos sensores óticos de temperatura na evolução do pulso térmico com dados obtidos por um interrogador comercial nos pontos P_0 e $P_{1,5}$.

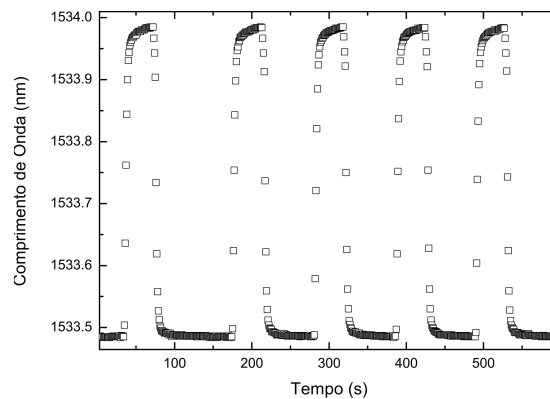


Figura 32: Gráfico da evolução da resposta em variação de comprimento de onda do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto P_0 .

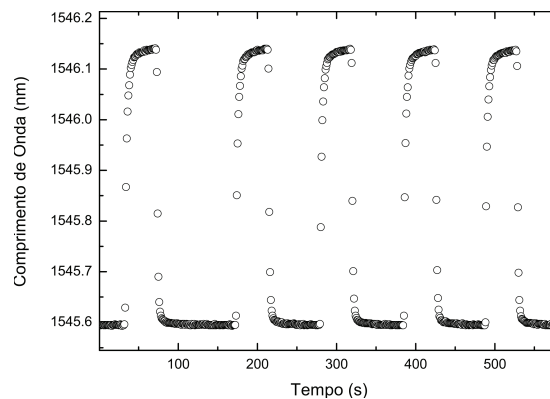


Figura 33: Gráfico da evolução da resposta em variação de comprimento de onda do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto $P_{1,5}$.

Os gráficos apresentados nesta seção foram feitos com dados referentes à vazão mássica (Q_M) de $0,0816\text{kg/s}$ o que equivale a um número de Reynolds de 9984, a uma temperatura de 22°C . A temperatura T_2 do pulso térmico é de 53°C , as discussões sobre os dados serão abordados na seção dos resultados para o sistema turbulento.

²FOSS Spectraleye 400. Esse interrogador comercial tem a taxa de aquisição de dados de 1Hz.

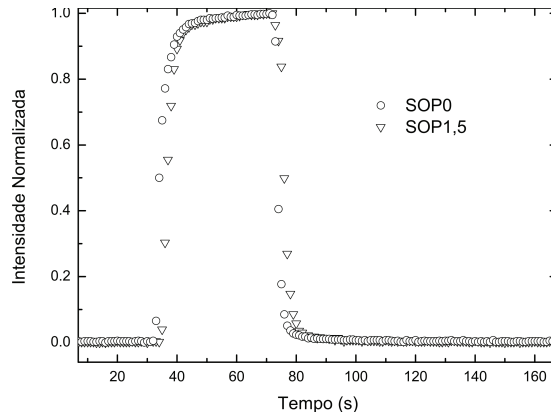


Figura 34: Gráfico normalizado da resposta dos sensores óticos de temperatura na evolução do pulso térmico com dados obtidos por um interrogador comercial ótico, nos pontos P_0 e $P_{1,5}$.

5.2.1 Sistema de Interrogação dos Sensores Óticos

Antes de começarmos com os resultados para a obtenção da velocidade média de escoamento (\bar{v}), foram realizadas diversas medidas para verificar a repetibilidade das medições com os sensores óticos e da montagem experimental de medição não-intrusiva da vazão através da termometria. Todas as medidas foram realizadas na mesma condição de medição. A figura (35) mostra o resultado da resposta ao pulso térmico do sensor ótico aderido à superfície externa do tubo de cobre. Para a construção deste gráfico foi necessário agrupar todas as medidas em um ponto escolhido em $4,25V$, referente ao ponto central entre a tensão máxima e a tensão mínima. Esse procedimento foi necessário devido ao fato de que a liberação do pulso térmico e o começo da coleta de dados dependem da sensibilidade do operador do sistema de medição. Após encontrado o ponto central de cada medida foram agrupados o conjunto de 120 pontos experimentais antes e 120 pontos experimentais depois do ponto central para cada curva. Essas primeiras medidas apresentaram muito ruído o que dificultou o deslocamento das curvas para a mesma posição. Para retirar este ruído foram substituídos todos os cabos elétricos, e revisadas todas as conexões óticas do sistema, além do uso de um fluido casador de índice³. A figura (36) mostra um gráfico obtido da reprodutibilidade do sistema após a retirada do ruído do sistema de interrogação de FBG's, com uma significativa melhora em relação a figura 35.

5.3 RESULTADOS PARA O REGIME TURBULENTO

Como vimos nos capítulos anteriores, teremos um regime de escoamento turbulento para valores do número de Reynolds maiores que 4000. Adotamos para nossas medidas de regime turbulento um valor próximo de 10000 (experimentalmente o valor obtido pela equação (36), foi de 9984 para a temperatura de $22^{\circ}C$). O número de Reynolds varia bruscamente com

³Index matching.

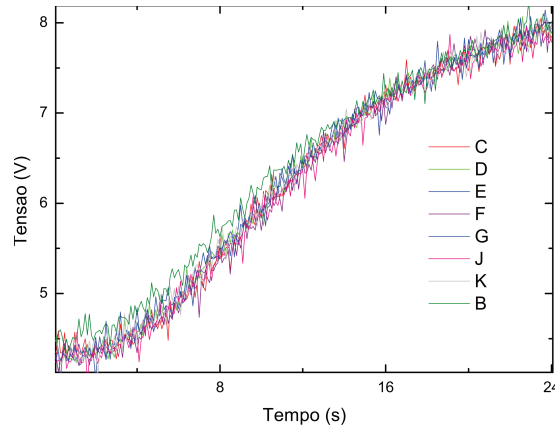


Figura 35: Gráfico da evolução temporal da resposta do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto P_0 para diversas medidas, na subida da temperatura.

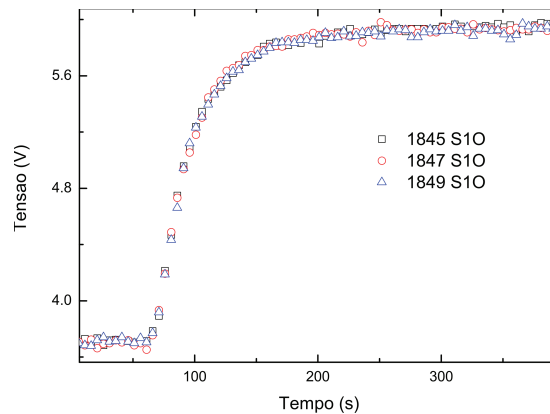


Figura 36: Gráfico da evolução temporal da resposta do sensor ótico à evolução do pulso térmico no ponto P_0 para diversas medidas na subida da temperatura.

a temperatura para um mesmo fluido escoando nas mesmas condições. Variando unicamente a temperatura, o número de Reynolds de 9984 a 22°C é alterado para 18500 a 53°C . A velocidade média de escoamento (\bar{v}) é fornecida pela equação (35). Para obtenção de valores experimentais de \bar{v} e um pré conhecimento das características de escoamento do fluido na linha de testes é realizada a medida da vazão mássica (Q_M), e sua conversão em vazão volumétrica (Q_V) dada pela equação (34). O valor encontrado para $Q_M = 0,0816\text{kg/s}$ foi de $0,864\text{m/s}$.

5.3.1 Determinação do Tempo de Equilíbrio Térmico para o Regime Turbulento

Foi estabelecido um procedimento de coleta de dados. A primeira medida realizada serve para obter as características do pulso térmico, principalmente o tempo que a temperatura da parede externa no ponto onde estão localizados os sensores de temperatura leva para atingir o equilíbrio térmico com o fluido do pulso térmico. Através dessa medida definimos a duração mais adequada do pulso térmico e verificamos se o sistema de interrogação não é saturado pelo sinal. Ainda com esta medida podemos definir o tempo que leva para o sistema atingir

as condições iniciais, ou seja, quando o tubo de cobre atinge o equilíbrio térmico com o fluido com temperatura T_1 novamente após a passagem do pulso térmico. Depois de se estabelecer o tempo de equilíbrio térmico do sensor com o fluido quente e após com o fluido frio, realizamos mais quatro medidas para verificar a reprodutibilidade ou repetibilidade do sistema. A figura (37) mostra um desses ciclos para a linha sensora externa, com a duração do pulso térmico de aproximadamente 50s. A figura (38) mostra os dados da linha sensora interna para as mesmas condições da linha externa. Para encontrar o tempo em que o pulso térmico leva para percorrer os dois sensores, escolhemos três pontos correspondentes a 20%, 50% e 80% da intensidade normalizada. De posse do valor do tempo da passagem do pulso térmico (t) encontramos a velocidade média (\bar{v}) fazendo a distância entre sensores (d) divididos por (t), ou seja $\bar{v} = d/t$.

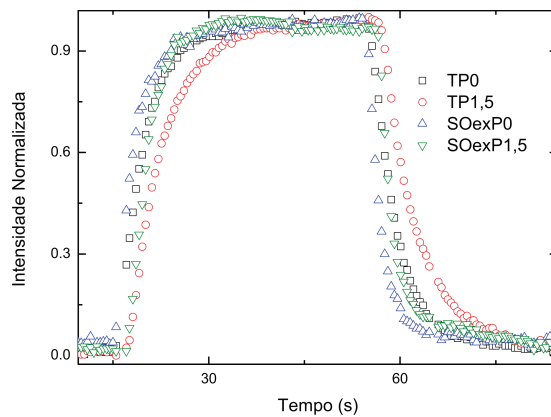


Figura 37: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento.

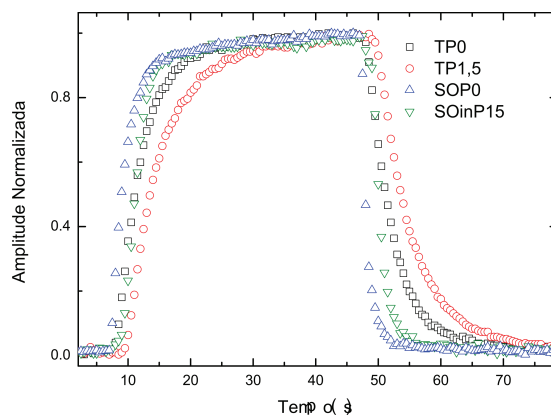


Figura 38: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos internos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento.

Os dados coletados das figuras (37) e (38), são apresentados na tabela (1) e (2) respectivamente. Foram escolhidos pontos referentes a 20%, 50% e 80% dos gráficos para cada sensor para as curvas de subida e descida. A figura (37) apresenta o gráfico da evolução temporal do pulso térmico, e seus pontos de análise na obtenção do tempo de trânsito do pulso térmico entre

Tabela 1: Tabela comparativa das linhas sensoras ótica externa e dos termopares para o regime turbulento.

Dados para Regime Turbulento na Subida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	2,298	0,653	20%	2,042	0,735
50%	2,357	0,636	50%	2,507	0,598
80%	2,248	0,667	80%	4,094	0,366
Média	2,301	0,652	Média	2,881	0,521
Dados para Regime Turbulento na Descida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	2,136	0,702	20%	4,351	0,345
50%	1,790	0,838	50%	2,557	0,587
80%	1,790	0,838	80%	1,998	0,750
Média	1,905	0,787	Média	2,969	0,505

os sensores externos são mostrados na tabela (1). O valor encontrado para a velocidade média na caracterização do sistema de medição não intrusiva de vazão através da medição de Q_m foi de $\bar{v} = 0,864m/s$, e os valores médios calculados para os sensores óticos externos e termopares foram $\bar{v} = 0,652m/s$ e $\bar{v} = 0,521m/s$, correspondendo a uma razão entre o valor medido e o valor real de 0,72 e 0,60 respectivamente, quando avaliada a subida da curva da figura (37), e para a descida da curva na mesma figura temos a razão de 0,91 para a linha sensora ótica e 0,58 para os termopares. Quando analisamos os dados referentes à linha sensora ótica interna, figura (38), cujos dados para análise estão na tabela (2), os dados da subida da curva apresentaram uma razão de 0,67 e 0,57 para os sensores óticos e termopares respectivamente. Para os dados referentes à descida da curva da figura (38) conseguimos uma razão da medida de 0,82 e 0,62 para os sensores óticos e termopares respectivamente.

Outro ponto interessante sobre esta medida é a visualização da evolução da temperatura de subida ou descida, tanto nos sensores óticos interno e externo, quanto nos termopares. No caso dos sensores óticos, eles atingem o mesmo valor de temperatura em aproximadamente 9s enquanto os termopares levam aproximadamente 20s, ambos os sensores levam aproximadamente 40s para atingir o equilíbrio térmico da parede do tubo com o fluido. Machado *et al* (MACHADO et al., 2005b) mostraram que a parede metálica do tubo não entra em equilíbrio térmico imediatamente com o fluido devido a condução de calor do fluido na superfície da parede interna até a superfície externa do tubo. Esse é um dos pontos cruciais para a realização de medidas não-intrusivas de vazão através da termometria.

Tabela 2: Tabela comparativa das linhas sensoras ótica interna e dos termopares para o regime turbulento.

Dados para Regime Turbulento na Subida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	2,07	0,725	20%	1,986	0,755
50%	2,184	0,687	50%	2,484	0,603
80%	1,472	1,019	80%	4,616	0,325
Média	2,597	0,577	Média	3,029	0,495
Dados para Regime Turbulento na Descida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	2,453	0,611	20%	4,185	0,358
50%	2,083	0,720	50%	2,328	0,644
80%	1,824	0,822	80%	1,866	0,804
Média	2,212	0,708	Média	2,793	0,537

5.3.2 Determinação da Resposta do Sistema para o Regime Turbulento

Na próxima medida é realizada uma variação pulsada de temperatura em forma de degraus consecutivos. Isso possibilita a visualização da resposta do sistema. O nome degrau foi dado devido a forma de como é liberado o pulso térmico numa única medida. Quando iniciado o processo de aquisição de dados espera-se 10s para a liberação de um pulso térmico de 10s. Após o encerramento do pulso térmico aguarda-se novamente 10s e libera-se outro pulso térmico de 10s e assim por diante 5 vezes⁴. A figura (39) mostra a evolução sistemática do pulso térmico. A figura (40) apresenta uma ampliação dos dois primeiros pulsos térmicos consecutivos, mostrando que o sistema quase entra em equilíbrio térmico com os pulsos térmicos de temperatura T_2 e T_1 evidenciando um limite de aquisição de dados na aplicação do sistema de medição não-intrusivo de vazão através de termometria no caso de monitoramento em tempo real.

5.3.3 Determinação da Duração Mínima do Pulso Térmico para o Regime Turbulento

Finalmente são verificadas as características do sistema de medição não-intrusiva de vazão através da termometria avaliando pulsos térmicos com intervalos de tempo diferentes. São testados pulsos com 3s, 5s, 10s, 20s, 30s e 50s de duração e após o término do pulso espera-se o sistema entrar em equilíbrio com o fluido de temperatura T_1 e aplica-se o pulso seguinte. Os dados obtidos foram graficados na figura (41). Podemos notar que o pulso térmico com 3s de duração já ultrapassa 50% do valor da temperatura T_2 e com 20s já entra em equilíbrio térmico

⁴Lembrando que na linha de medição sempre teremos um fluido escoando, quando interrompemos um o outro automaticamente começa a escoar.

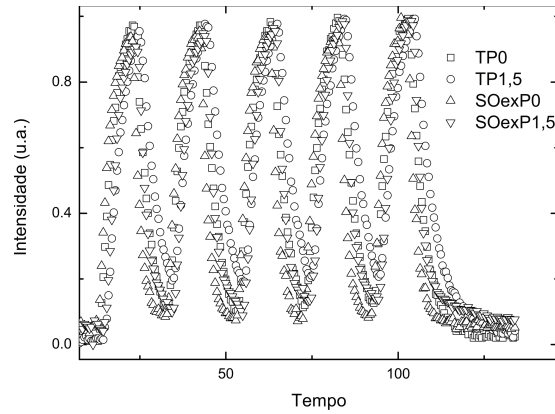


Figura 39: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento, através de pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.

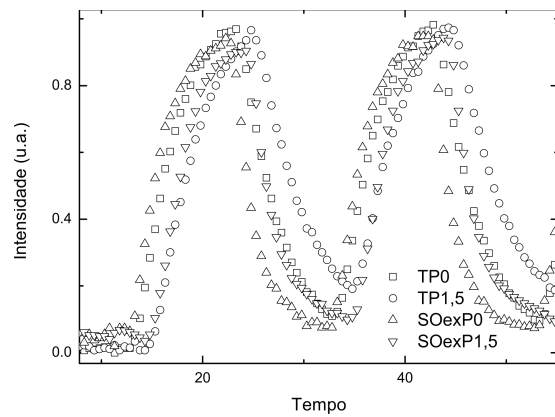


Figura 40: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento, através de pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.

com o fluido de temperatura T_2 . Para uma melhor visualização é realizada uma amplificação da figura (41) referente aos pulsos térmicos de 5s e 10s mostradas na figura (42). Com esse gráfico podemos ter uma referência do valor de temperatura do pulso térmico com sua duração. Estes pulsos ajudam a estabelecer um valor mínimo para a duração do pulso.

5.4 RESULTADOS PARA O REGIME DE TRANSIÇÃO

Temos um regime de escoamento em transição quando o fluido escoar com valores do número de Reynolds (Re) entre $2500 < Re < 4000$, no experimento foi utilizado $Re = 2880$ para a temperatura T_1 de $22^\circ C$. Como comentado anteriormente o número de Reynolds varia com a temperatura, e para um fluido escoando nas mesmas condições e variando somente a temperatura em aproximadamente $30^\circ C$, o número de Reynolds fica em 5279, correspondente a temperatura T_2 que é de $53^\circ C$, isso torna-se um problema pois o fluido com T_2 encontra-se em outro regime de escoamento, mais precisamente no regime turbulento. Uma maneira

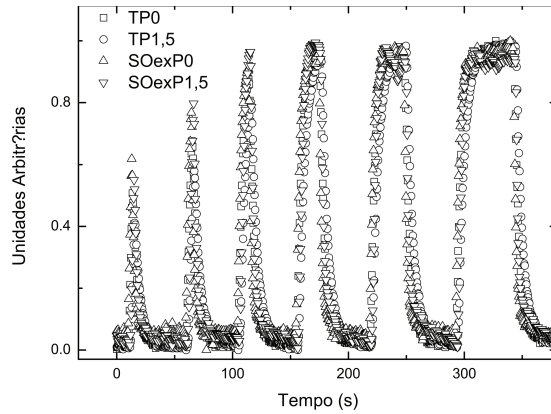


Figura 41: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento, através de pulsos térmicos duração de 3s, 5s, 10s, 20s, 30s e 50s.

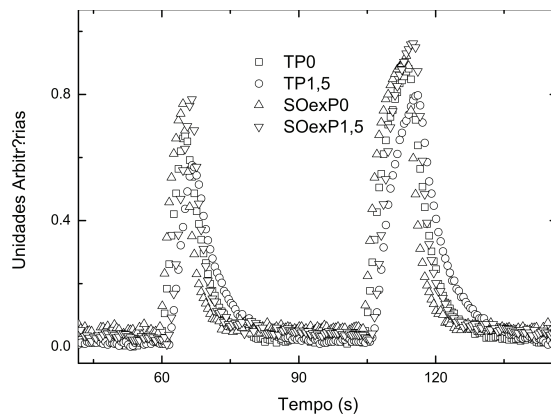


Figura 42: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime turbulento, através de pulsos térmicos duração de 5s e 10s com 30s de descanso.

de contornar este problema, caso seja extremo, é considerar somente a descida da curva da evolução da temperatura do pulso em função do tempo, pois o pulso térmico estará com temperatura T_1 enquadrando-se no regime de escoamento desejado. Podemos calcular previamente a velocidade média de escoamento (\bar{v}) usando a equação (35). Para obtenção de valores experimentais da montagem experimental e um pré conhecimento das características de escoamento do fluido na linha de testes é realizada a medida da vazão mássica (Q_M), e sua conversão em vazão volumétrica (Q_V) através da equação (34). O valor encontrado para \bar{v} é $0,256m/s$ e para $Q_M = 0,0242kg/s$.

5.4.1 Determinação do Tempo de Equilíbrio Térmico para o Regime Transitório

Seguimos a mesma metodologia usada para a obtenção dos dados do regime turbulento, começando com a medida do tempo que o sistema leva para atingir o equilíbrio térmico da parede externa do tubo no ponto onde estão localizados os sensores com o fluido que está

escoando. Esta primeira medida serve para verificar se não há saturação no sinal do interrogador da linha sensora ótica, e como comentado anteriormente, para encontrar o intervalo de tempo em que o sistema atinge o equilíbrio térmico. Após a realização desta medida, repetimos o processo mais quatro vezes para verificar a repetibilidade das medidas. A figura (43) apresenta o gráfico da evolução temporal do pulso térmico medido em dois diferentes pontos por duas linhas sensoras diferentes. Os pontos para a análise do tempo de trânsito do pulso térmico entre os sensores externos, da mesma linha sensora, foram obtidos em diferentes intensidades de temperatura e estão apresentados na tabela (3). O valor encontrado na caracterização do sistema de medição não-intrusiva de vazão através da termometria para a velocidade média é $\bar{v} = 0,256m/s$, e os valores medidos para os sensores ótico externo e termopares foram $\bar{v} = 0,231m/s$ e $\bar{v} = 0,176m/s$, correspondendo a uma razão de 0,90 e 0,69 respectivamente, quando avaliada a subida da curva da figura (43) e para a descida da mesma figura temos a razão de 0,88 para a linha sensora ótica e 0,69 para os termopares. Quando analisamos os dados referentes a linha sensora ótica interna, figura (44), cujos dados para análise estão na tabela (4), os dados da subida da curva apresentaram uma razão de 0,91 e 0,714 para os sensores ótico e termopares respectivamente. Para os dados referentes à descida da curva da figura (44) temos a razão da medida de 0,82 e 0,66 respectivamente para os sensores óticos e termopares.

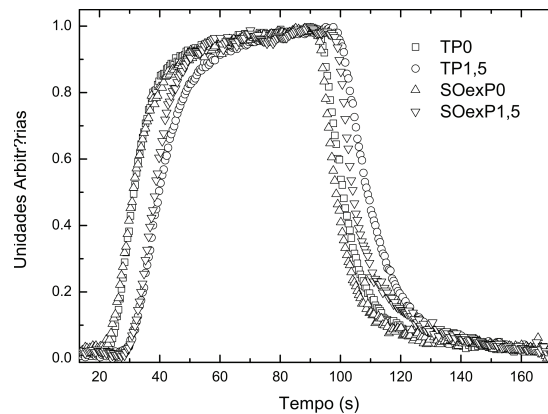


Figura 43: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime transitório.

5.4.2 Determinação da Resposta do Sistema para o Regime de Transição

Seguindo as etapas sugeridas no regime de escoamento turbulento, realizamos uma variação pulsada de temperatura com uma sequência de pulsos térmicos idênticos, possibilitando a visualização da resposta do sistema. Essa medida é realizada na forma de pulsos quadrados com intervalos regulares de 10s. Iniciando o processo de aquisição de dados espera-se 10s para a liberação de um pulso térmico de 10s, após o encerramento do pulso térmico aguarda-se novamente 10s e libera-se outro pulso térmico de 10s e assim por diante 5 vezes

Tabela 3: Tabela comparativa das linhas sensoras ótica externa e dos termopares para os dados obtidos no regime transitório.

Dados para Regime de Transição na Subida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	7,272	0,206	20%	7,175	0,1935
50%	7,166	0,209	50%	8,405	0,178
80%	5,007	0,299	80%	9,967	0,15
Média	6,48	0,231	Média	8,516	0,176
Dados para Regime de Transição na Descida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	5,896	0,254	20%	6,900	0,217
50%	5,629	0,266	50%	8,097	0,167
80%	8,417	0,178	80%	10,600	0,141
Média	6,647	0,226	Média	8,530	0,176

Tabela 4: Tabela comparativa das linhas sensoras ótica interna e dos termopares para os dados obtidos no regime transitório.

Dados para Regime de Transição na Subida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	7,131	0,210	20%	7,002	0,214
50%	7,219	0,208	50%	8,121	0,175
80%	4,953	0,303	80%	9,645	0,155
Média	6,434	0,233	Média	8,256	0,182
Dados para Regime de Transição na Descida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	6,223	0,241	20%	6,976	0,215
50%	7,504	0,200	50%	8,553	0,175
80%	7,703	0,195	80%	11,248	0,133
Média	7,143	0,210	Média	8,929	0,168

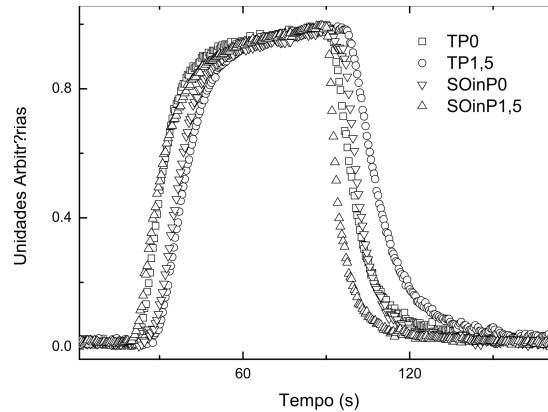


Figura 44: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos internos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime transitório.

consecutivas. A figura (45) mostra a evolução temporal do sistema pulsado. O acionamento das válvulas de seleção do fluido que escoará na linha de testes depende da sensibilidade do operador. Podemos notar que o terceiro pulso com fluido frio, da figura (45), teve a duração maior que de 15s. A figura (46) envolve o sensor ótico interno, mas permite visualizar o que aconteceria com a figura (45) pois o termopar está localizado na parede externa e pode servir como referência para a discussão da figura (45). Para este sistema pulsado percebemos que o escoamento é lento, e o volume de fluido contido no pulso térmico não é suficiente para que a parede do tubo de cobre entre em equilíbrio térmico com o fluido que está escoando. Podemos ver que, para o sensor ótico interno, na figura (46), temos uma variação maior de temperatura para o mesmo pulso térmico. Já começamos a notar uma pequena diferença entre os gráfico do regime turbulento com o regime de transição, figura (39) e (46) respectivamente, no primeiro os picos de temperatura permanecem praticamente num mesmo patamar, enquanto no caso de transição temos uma elevação do valor do pico para os pulsos térmicos sucessivos.

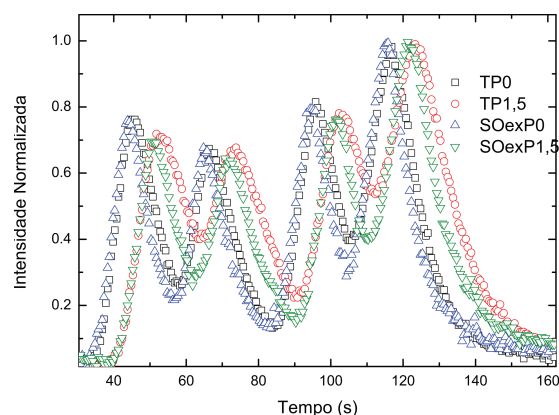


Figura 45: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime de transição, através de consecutivos pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.

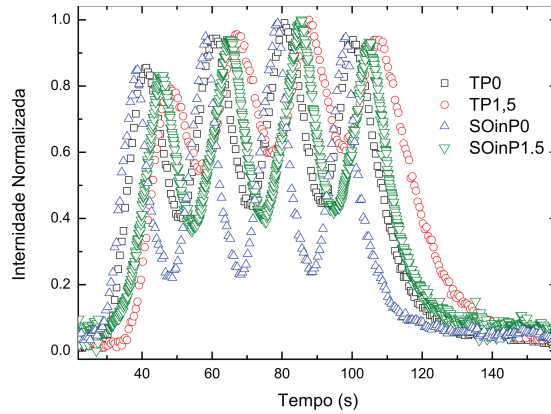


Figura 46: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura , óticos interno e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime de transição, através de consecutivos pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.

5.4.3 Determinação da Duração Mínima do Pulso Térmico para o Regime de Transição

Por fim, verificamos as características do sistema de medição não-intrusiva de vazão através da termometria avaliando pulsos térmicos com duração de tempo diferentes. São testados pulsos com duração de 3s, 5s, 10s, 20s, 30s e 50s em sequência cujo intervalo entre eles é o tempo que o sistema leva para entrar em equilíbrio térmico com o fluido de temperatura T_1 . Os dados obtidos foram graficados na figura (47), podemos notar que o pulso térmico com 3s de duração não ultrapassa 50% do valor da temperatura T_2 e o pulso térmico com 50s ainda não entra em equilíbrio térmico com o fluido de temperatura T_2 . Para uma melhor visualização é realizada uma amplificação da figura (47) referentes aos pulsos térmicos de 5s e 10s mostradas na figura (48). Com esse gráfico podemos ter uma referência do valor de temperatura do pulso térmico com sua duração. Estes pulsos ajudam a estabelecer um valor mínimo para a duração do pulso.

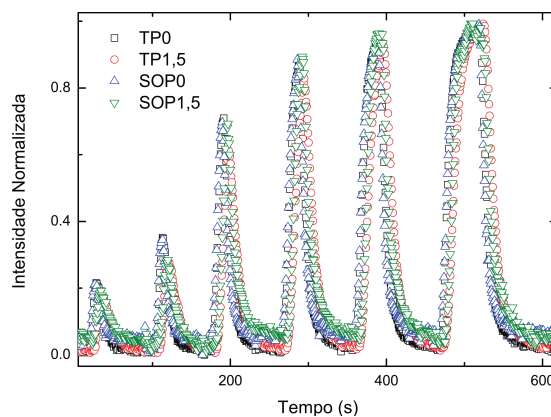


Figura 47: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime de transição, através de pulsos térmicos duração de 3s, 5s, 10s, 20s, 30s e 50s.

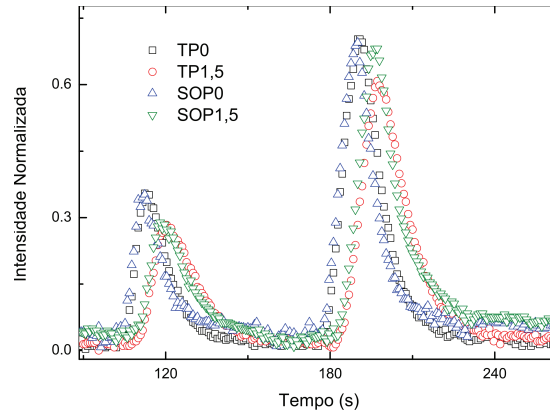


Figura 48: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime de transição, através de pulsos térmicos duração de 3s e 10s com 80s de descanso.

5.5 RESULTADOS PARA O REGIME LAMINAR

Encontramos o fluido em regime de escoamento laminar quando temos um fluido escoando com número de Reynolds (Re) menores que 2500. No experimento foi utilizado o valor de $Re = 1182$ para a temperatura de $22^\circ C$. Comentamos anteriormente que o número de Reynolds varia bruscamente com a temperatura para um mesmo fluido, e não é diferente para um fluido escoando nas mesmas condições, variando somente a temperatura em aproximadamente $30^\circ C$, teremos o número de Reynolds $Re = 2153$. A velocidade média de escoamento (\bar{v}) foi calculada como nos outros regimes de escoamento, com posse do valor da vazão mássica (Q_M), o valor obtido foi $Q_M = 0,0097 kg/s$, e depois usada a equação (34) para converter (Q_M) em vazão volumétrica (Q_V), e finalmente a velocidade média de escoamento (\bar{v}) pela equação (35). O valor calculado para \bar{v} é $0,103 m/s$.

5.5.1 Determinação do Tempo de Equilíbrio Térmico para o Regime Laminar

Continuando com a sequência utilizada nas seções anteriores começamos com a obtenção da medida do tempo necessário para a temperatura da parede externa atingir o equilíbrio térmico com o fluido que está escoando no interior do tubo de cobre, no ponto onde estão localizados os sensores. Esta medida é necessária para verificar se não há saturação no sinal fornecido pelo interrogador da linha sensora ótica e também para encontrar o tempo em que o sistema atinge o equilíbrio térmico com o fluido com temperatura T_2 . Após a aquisição do tempo que a parede externa atinge o equilíbrio térmico e do ajuste do interrogador ótico, repetimos o processo mais quatro vezes. A figura (49) apresenta o gráfico da evolução temporal do pulso térmico. Os pontos utilizados na obtenção do tempo de trânsito do pulso térmico entre os sensores de temperatura são apresentados na tabela (5). O valor encontrado da velocidade média de escoamento na caracterização do sistema de medição não-intrusiva de vazão através da termometria é

$\bar{v} = 0,103m/s$, e os valores medidos com os dados experimentais, para os sensores ótico externo e termopares, foram $\bar{v} = 0,0868m/s$ e $\bar{v} = 0,077m/s$ correspondendo a uma exatidão de 0,84 e 0,75 respectivamente, esses valores foram obtidos na avaliação da subida da curva da evolução temporal do pulso térmico da figura (49). Para a descida da curva de evolução temporal do pulso térmico para a mesma figura temos a exatidão de 0,98 para a linha sensora ótica externa e 0,76 para os termopares. Quando analisamos os dados referentes à linha sensora ótica interna, figura (50), cujos dados para análise estão na tabela (6), os dados da subida da curva apresentaram uma exatidão de 0,92 e 0,77 para os sensores ótico e termopares respectivamente. Para os dados referentes a descida da curva da figura (50) conseguimos uma exatidão na medida de 0,81 para os sensores ótico e 0,74 para os termopares.

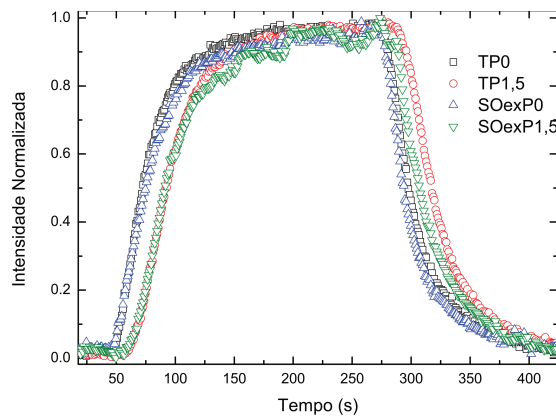


Figura 49: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar.

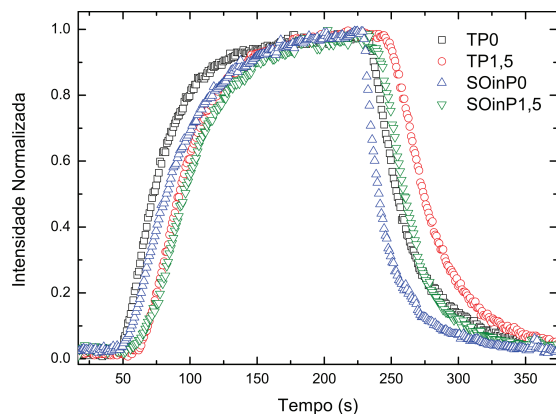


Figura 50: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos internos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar.

5.5.2 Determinação da Resposta do Sistema para o Regime Laminar

A próxima medida é uma variação pulsada de temperatura em forma de onda quadrada com pulsos térmicos idênticos consecutivos, possibilitando a visualização da resposta do sis-

Tabela 5: Tabela comparativa das linhas sensoras ótica externa e dos termopares para os dados obtidos no regime laminar.

Dados para Regime laminar na Subida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	17,324	0,0866	20%	16,978	0,0883
50%	16,385	0,0915	50%	19,693	0,0762
80%	18,144	0,0827	80%	21,42	0,0700
Média	17,284	0,0868	Média	19,364	0,0770
Dados para Regime laminar na Descida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	9,266	0,162	20%	17,023	0,088
50%	13,556	0,111	50%	19,307	0,078
80%	19,795	0,0758	80%	21,516	0,070
Média	14,205	0,105	Média	19,282	0,078

Tabela 6: Tabela comparativa das linhas sensoras ótica interno e dos termopares para os dados obtidos no regime laminar.

Dados para Regime de Transição na Subida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	14,500	0,1030	20%	16,682	0,0899
50%	13,974	0,107	50%	19,535	0,0768
80%	11,721	0,128	80%	20,651	0,0726
Média	13,398	0,112	Média	18,956	0,0790
Dados para Regime de Transição na Descida da Curva					
Sensor Ótico			Termopar		
	Tempo (s)	\bar{v} (m/s)		Tempo (s)	\bar{v} (m/s)
20%	13,954	0,107	20%	17,546	0,0854
50%	19,330	0,0770	50%	20,374	0,074
80%	20,487	0,0732	80%	21,478	0,0698
Média	17,923	0,0837	Média	19,799	0,0758

tema. Essa medida é realizada com a alternância de pulsos térmicos em intervalos regulares de 10s. No processo de aquisição de dados espera-se 10s para a liberação de um pulso térmico de duração de 10s e após o encerramento do pulso térmico aguarda-se novamente 10s e libera-se outro pulso térmico de 10s e assim por diante 5 vezes consecutivas. A figura (51) mostra a evolução sistemática do sistema pulsado, para os sensores óticos externo e termopares. A figura (52) apresenta o gráfico dos dados relativos aos sensores ótico interno e termopares.

Para este sistema pulsado percebemos que o escoamento é lento, $\bar{v} = 0,103m/s$, o volume do fluido que escoar durante o pulso térmico não é suficiente para que a troca térmica da parede do tubo de cobre entre em equilíbrio térmico com o fluido que está escoando. Podemos ver que, para o sensor ótico interno, na figura (52), temos uma variação maior de temperatura para o mesmo pulso térmico e uma maior troca térmica do fluido com o sensor. Comparando os gráficos do regime turbulento figura (39) e do regime de transição (46) com a figura (51), percebemos que no caso de regime turbulento a temperatura dos picos praticamente permanece num mesmo valor, no caso do regime de transição temos uma elevação do valor dos máximos do pico e no caso do regime de escoamento laminar não é visualizado a distinção dos máximos dos picos.

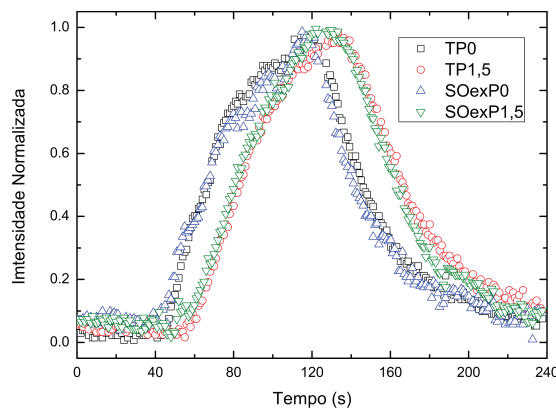


Figura 51: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar, através de consecutivos pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.

5.5.3 Determinação da Duração Mínima do Pulso Térmico para o Regime Laminar

Verificamos as características do sistema de medição não-intrusiva de vazão através da termometria avaliando pulsos térmicos com intervalos de tempo diferentes. São testados pulsos com 3s, 5s, 10s, 20s, 30s e 50s de duração. É dado um pulso, espera-se o tempo necessário para que o sistema entre em equilíbrio térmico com o fluido de temperatura T_1 e em seguida é dado outro pulso, assim sucessivamente. Os dados obtidos foram plotados em um gráfico apresentados na figura (53). Notamos que o pulso térmico com duração de 3s não ultrapassa 50% do

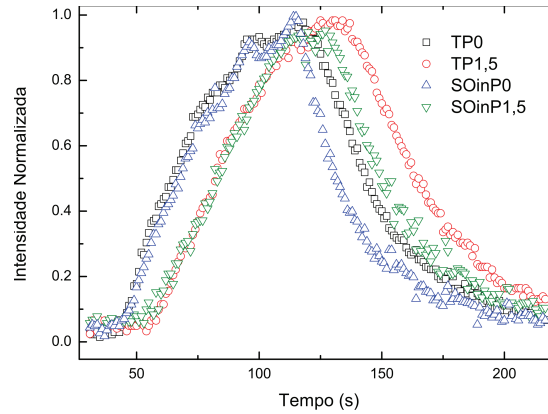


Figura 52: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura , óticos interno e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar, através de consecutivos pulsos térmicos com 10s de duração e 10s de espera.

valor da intensidade normalizada da temperatura final T_2 e o pulso térmico com duração de 50s ainda não entrou em equilíbrio térmico com o fluido de temperatura T_2 . Para uma melhor visualização é realizada uma amplificação da figura (53) referentes aos pulsos térmicos de 15s e 7s mostradas na figura (54). Com esse gráfico podemos ter uma referência do valor de temperatura que o sistema atinge com um pulso térmico com temperatura T_2 em um determinado tempo de duração. Estes pulsos ajudam a estabelecer um valor mínimo para a duração do pulso.

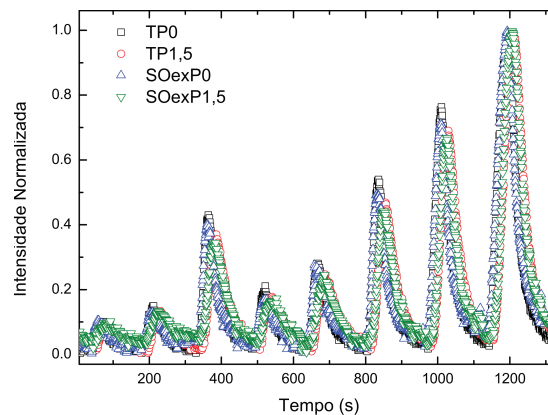


Figura 53: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar, através de pulsos térmicos duração de 3s, 5s, 15s, 10s, 7s, 20s, 30s e 50s.

5.6 DISCUSSÃO FINAL

Um ponto importante a ser comentado é a influência da temperatura no número de Reynolds para uma mesma vazão. Isso foi evidenciado principalmente no regime de transição, no qual a água com temperatura $T_1 = 22^\circ\text{C}$ escoava no regime de transição e com temperatura $T_2 = 53^\circ\text{C}$ escoava no regime de turbulento. Este é um dos motivos da diferença na subida e na

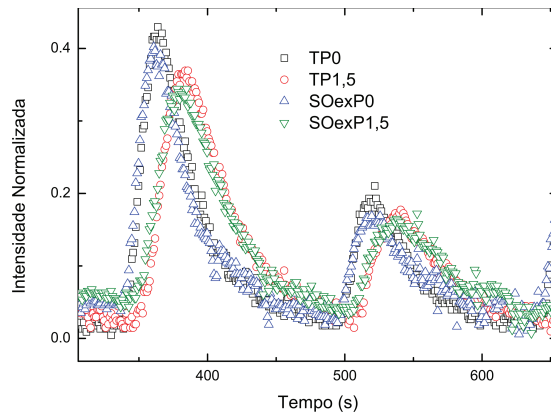


Figura 54: Gráfico normalizado da resposta dos sensores de temperatura, óticos externos e comerciais, na evolução temporal do pulso térmico nos pontos P_0 e $P_{1,5}$ no regime laminar, através de pulsos térmicos duração de 15s e 7s com 80s de descanso.

Tabela 7: Tabela comparativa da relação do número de Reynolds com o regime de escoamento e com a temperatura.

Comparação da vazão para diferentes temperaturas				
	Temperatura 22°C		Temperatura 53°C	
Regime de escoamento	Q_M kg/s	Re	Q_M kg/s	Re
Laminar ($Re < 2500$)	0,0097	1182	0,0093	2153
Transitório ($2500 < Re < 4000$)	0,0241	2880	0,2380	5279
Turbulento ($Re > 4000$)	0,0819	9984	0,0833	18499

descida das curvas dos gráficos da evolução temporal do pulso térmico. O sistema de medição não intrusivo foi ajustado para ter a mesma vazão tanto para o fluido frio quanto para o fluido quente. Este ajuste foi realizado com a abertura das galerias internas das válvulas controladas por solenóides. Mas o controle real do escoamento durante a coleta de dados é efetuado por um registro localizado na parte final do tubo de cobre. O problema é que, para cada mudança do regime de escoamento teríamos que fazer um novo ajuste na cavidade da válvula solenóide. A tabela (8) mostra o regime de escoamento com seu respectivo número de Reynolds em função da temperatura e a vazão mássica. Com os dados da tabela (8) podemos comparar as vazões mássicas (Q_M) para um mesmo regime de escoamento e ver a mudança quando aplicado um degrau de temperatura. Para o regime laminar a vazão mássica (Q_M) é menor para temperaturas maiores e no regime turbulento a vazão mássica (Q_M) é maior para maiores temperaturas, isso provavelmente por que o sistema foi inicialmente calibrado para a vazão mássica de 0,178 à 21°C e 0,176 à 52°C o que equivale aos números de Reynolds de 2181 e 3972 respectivamente.

Uma das maneiras de evitar erros devido à influência do número de Reynolds com a temperatura é analisar os dados da descida da curva do gráfico da evolução da temperatura em função do tempo de escoamento. Isso é possível porque na linha de testes sempre estará escoando um fluido. Quando cessamos o escoamento de um fluido o outro imediatamente começa

Tabela 8: Tabela comparativa da velocidade de escoamento \bar{v} e a exatidão da medida experimental. A aquisição de dados do termopar ocorreu somente na parede externa do tubo, os dados referentes a medida **Externo 2** são para o mesmo conjunto das medidas do sensor ótico interno.

Tabela da relação da exatidão de medição para diferentes sensores								
	Sensor ótico				Termopar			
	Externo		Interno		Externo 1		Externo 2	
	\bar{v} <i>m/s</i>	Exatidão	\bar{v} <i>m/s</i>	Exatidão	\bar{v} <i>m/s</i>	Exatidão	\bar{v} <i>m/s</i>	Exatidão
Laminar	0,0868	0,98	0,112	0,92	0,077	0,75	0,079	0,77
Transitório	0,231	0,90	0,233	0,91	0,176	0,69	0,182	0,71
Turbulento	0,652	0,75	0,577	0,67	0,521	0,60	0,495	0,57

a escoar e a descida da curva de evolução temporal pode ser considerada como um pulso térmico com uma temperatura menor T_1 . Um ponto a ser melhorado no experimento de medição não-intrusiva de vazão através da termometria é o fator sensibilidade do operador, pois depende dele a liberação do pulso térmico e seu respectivo tempo de duração junto com o início da aquisição de dados. Isso torna-se importante para a avaliação da resposta de sistemas térmicos pulsados e melhoraria os dados referentes aos pulsos consecutivos iguais e aos pulsos com diferentes tempos de duração consecutivos.

Quanto ao valor comparativo da velocidade média de escoamento obtida no experimento vemos, com base na tabela (8), que os sensores óticos são mais precisos que os termopares principalmente em regimes de escoamento como laminar e o transitório.

Outro dado interessante a ser avaliado é o tempo que a parede externa do tubo de cobre leva para entrar em equilíbrio térmico com o fluido: para o regime de escoamento turbulento.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONCLUSÃO

O experimento de medição não-intrusiva de vazão através da termometria usando sensores óticos baseados em redes de Bragg gravadas no núcleo fibra ótica mostrou-se mais eficiente que o mesmo experimento empregando os sensores comerciais *Thermocouple OMEGA SAI-T Series*. Foram estudados a aplicação da técnica em diferentes regimes de escoamento. Para o regime turbulento, a razão da medida da velocidade de escoamento do fluido experimental com a medida real foi de 0,75 para os sensores óticos e 0,60 para os sensores comerciais. No caso do regime de transição, a razão da medida da velocidade de escoamento do fluido experimental com a medida real foi de 0,90 para os sensores óticos e 0,69 para os sensores comerciais. Finalmente, para o regime laminar a exatidão nas medidas foram de 0,98 para os sensores ótico e 0,76 para os sensores comerciais. No gráfico de evolução temporal do pulso térmico apresentou diferenças entre a chegada e a saída, o que representa a influência da temperatura no número de Reynolds, pois na chegada do pulso térmico temos um fluido com temperatura T_2 e na saída podemos supor a entrada de um pulso térmico com um fluido com temperatura T_1 , sendo que o sistema de válvulas solenóides de controle do fluido que escoava pela linha de testes foi calibrado para o regime de escoamento laminar com o número de Reynolds 2181 para o fluido com temperatura T_1 de 21°C com a vazão mássica de e 3972 para 52°C, o que equivale aos números de Reynolds de 9984 e 18500 respectivamente, no caso do regime turbulento. A vazão mássica apresentou valores de 0,0819 kg/s e 0,0833 kg/s para as temperaturas 22°C e de 53°C respectivamente.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Otimizar o sistema de medição não-intrusivo de vazão através da termometria com a implantação de dispositivos que permitam programar uma sequência de operações como: início da coleta de dados, temporizador para a liberação do pulso térmico, duração do pulso térmico, número de pulsos, tempo de espera para liberar o pulso térmico, visualização em tempo real da evolução do pulso térmico com a visualização da temperatura Avaliar os erros e incertezas associadas aos resultados e ao sistema de medição não-intrusivo de vazão através da termometria.

Avaliar a medida de vazão através das curvas de evolução temporal do pulso térmico em vez da escolha de alguns pontos da mesma.

REFERÊNCIAS

- ANSI; ASME. **Measurement Uncertainty for Fluid Flow in Closed Conduits**. [S.l.]: NSI/ASME MFC-2M-1983, 1983.
- API. **API Manual of Petroleum Measurements Standards**. 2010. Disponível em: <<http://www.api.org>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2010.
- BAROZZI, G. S.; PAGLIARINI, G. Experimental investigation of coupled conduction and laminar convection in a circular tube. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 27, p. 2321–2329, 1984.
- BASSALO, J. M. F. A crônica do calor: Termometria. **Revista de Ensino de Física**, v. 13, p. 135–161, 1991.
- BILIR, S. Laminar flow heat transfer in pipes including two-dimensional wall and fluid axial conduction. **Int. Journal of Heat and Mass transfer**, v. 38, p. 1619–1625, 1995.
- BILIR, S.; ATES, A. Transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with convective boundary conditions. **Int. Journal of Heat and Mass transfer**, v. 46, p. 2701–2709, 2003.
- BRASILIENSE, C. **Petrobrás tem Crescimento de 5% na Produção de Petróleo e Gás de 2009**. 2009. Disponível em: <<http://www.correiobraziliense.com.br>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2010.
- BROPHY, L. A. W.; HALL, D. G. Analysis of waveguide gratings: Application of round method. **Journal of the Optical Society of America B**, v. 2, p. 863–871, 1985.
- CAMPO, A.; SCHULER, C. Heat transfer in laminar flow through circular tubes accounting for two-dimensional wall conduction. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 31, p. 2251–2259, 1988.
- CRISP, J. **Introduction to Fiber Optics**. 2 edição. ed. [S.l.]: Newnes.
- CRISP, J. **Introduction to Fiber Optics**. 2 edição. ed. [S.l.]: Newnes, 2001.
- CULSHAW, B. Fiber optics in sensing and measurement. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 6, p. 1014–1021, 2000.
- DECUSATS, C.; DECUSATS, C. J. S. **Fiber Optical Essentials**. [S.l.]: Elsevier, 2007.
- DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. [S.l.]: Editora Edgard Blucher, 1995.
- ERDOGAN, T. Fiber grating spectra. **Journal of lightwave technology**, v. 15, p. 1277–1294, 1997.
- FINANCEIRA, A. **Procura mundial de petróleo vai crescer 2% este ano**. 2010. Disponível em: <<http://www.agenciafinanceira.iol.pt>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2010.
- FOX, R. W.; MACDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **INTRODUÇÃO A MECÂNICA DE FLUIDOS**. 5. ed. [S.l.]: LTC, 2003.

GILES, C. R. Lightwave applications of fiber bragg gratings. **Journal of lightwave technology**, v. 15, p. 1391–1404, 1997.

GRABARSKI, L.; SILVA, J. C. C.; CAÇÃO, E.; KALINOWSKI, H. J. Fiber bragg grating temperature sensors used to measure flow in a pipeline. **2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC 2007)**, 2007.

GYSLING, D. L. **Changing Paradigms in Oil and Gas Reservoir Monitoring-The Introduction and Commercialization of In-well Optical Sensing Systems**. Portland-USA: Proceedings of the 15th Optical Fiber Sensors Conference, 2002.

GYSLING, D. L. **Changing Paradigms in Oil and Gas Reservoir Monitoring - The Introduction and Commercialization of In-Well Optical Sensing Systems**. 2009. Disponível em: <<http://http://www.cidra.com>>. Acesso em: 12 de novembro de 2009.

HECHT, E. **Optics**. New York: Editora Wesley Publishing Company, 1987.

HECHT, J. **City of Light: The Story of Fiber Optics**. [S.l.]: Oxford University Press, 2001.

HECHT, J. **A Short History of Fiber Optics**. 2009. Disponível em: <<http://www.sff.net/people/Jeff.Hecht/history.html>>. Acesso em: 10 de outubro de 2009.

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

HILL, K.; MALO, B.; JOHNSON, F. B. D. C. Photosensitivity in optical fibers. **Annual. Review Matter Science**, v. 23, p. 125–157, 1993.

HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitivity optical fiber by u.v. exposure through a phase mask. **Applied Physics Letters**, v. 62, p. 1035–1037, 1993.

HILL, K. O.; MELTZ, G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, p. 1263–1276, 1997.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings**. United Kingdom: Academic Press, 1999.

KERSEY, A. D.; DAVIS, M. A.; PATRICK, H. J.; LEBLANC, M.; KOO, K. P.; ASKINS, C. G.; PUTNAN, M. A.; FRIEBELE, E. J. Fiber grating sensor. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, p. 1442–1462, 1997.

KIWAN, S. M.; AL-NIMR, M. A. Analytical solution for conjugated heat transfer in pipes and ducts. **Heat and Mass Transfers**, v. 38, p. 513–5164, 2002.

KUSTERS, R.; ROOYEN, A.; HANDEL, A.; FRANZEN, A. Flow velocity tracking using fiber bragg gratings. **Proc. Int. Conf. Optics and Optoelectronics**, Warsaw - PL, 2002.

LAM, D. K. W.; GARSIDE, B. K. Characterization of single-mode optical fibre filters. **Applied Optics**, v. 20, p. 440–445, 1981.

LEE, B. Review of the present status of optical fiber sensors. **Optical Fiber Technology**, v. 9, p. 57–79, 2003.

LEMAIRE, P. J.; ATKINS, R. M.; MIZRAHI, V. W.; REED, A. High pressure h₂ loading as a technique for achieving ultraviolet sensitivity in geo₂ doped optical fibres. **Electronics Letters**, v. 29, p. 1191–1193, 1993.

LÄHDENIEMI, M.; KOPPEL, T.; AINOLA, L.; EKAOLM, A. **IR technology an image processing applied to flow investigation**. [S.l.]: Machine Vision News, 2000.

LOH, W. H.; COLE, M. J.; ZERVAS, M. N.; BARCELOS, S.; LAMING, R. I. Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber scanning beam technique. **Optic Letters**, v. 20, p. 2051–2053, 1995.

MACHADO, J. F. B.; CORDEIRO, G. J.; MIYASAKI, L. I.; NEGRÃO, C. O. R.; JUNQUEIRA, S. L. M.; MAZZA, R. A.; MORALES, R. E. M. R. E. M. **Viabilidade de Medição de vazão por meio de termometria**. Bahia: Anais do 3º Congresso Brasileiro de P& D em Petróleo e Gás(BA), 2005.

MACHADO, J. F. B.; NEGRÃO, C. O. R.; JUNQUEIRA, S. L. M.; MAZZA, R. A.; MORALES, R. E. M. **Measurement of Mass Flow by Employing Thermometry**. [S.l.]: 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and ExpositionC, 2005.

MARTELLI, C.; SILVA, J. C. C.; NOVAES, P. J. D.; KALINOWSKI, H. J. Sistema de leitura de redes de bragg para medidas estática e dinâmicas. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 17, 2004.

MATA, R. S. da. Instrumentação básica -parte 1- medição de tempertura. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação.**, v. 17, p. 22–27, 2004.

MELLE, S. M.; LIU, K.; MEASURES, R. M. A passive wavelength demodulation system for guided-wave bragg grating sensors. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 4, 1992.

MELTZ, G.; MOREY, W.; GLENN, H. Formation of bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method. **Optics Letters**, v. 14, p. 823–825, 1999.

NGUYEN, H. T.; SHORE, B. W.; BRITTEN, S. J.; BOYD, R. D.; PERRY, M. D. High-efficiency fused-silica transmission gratings. **Optic Letters**, v. 22, p. 142–144, 1997.

NUNES, L. C. S.; VALENTE, L. C. G.; BRAGA, A. M. B. Analisis of a demodulation system for fiber bragg grating sensor using two fixed filters. **Optics and Lasers in Engineerig**, v. 42, p. 529–542, 2004.

OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. [S.l.]: Artech House, 1999.

PIVA, S. An analytical approach to fully developed heating of laminar flows in circular pipes. **Int. Comm.Heat Mass Transfer**, v. 22, p. 815–824, 1995.

SENSORS, G. **Gavea Sensors**. 2009. Disponível em: <[http://www.gaveasensors.com.br/instalacoes_ petroleo_ monitoramento.html](http://www.gaveasensors.com.br/instalacoes_petroleo_monitoramento.html)>. Acesso em: 12 de novembro de 2009.

STONE, J. Photorefractivity in geo₂ doped silica fibers. **Journal of Applied Physics**, v. 62, p. 4371–4374, 1987.

SUCEC, J. Unsteady forced convection with sinusoidal duct wall generation: the conjugate heat transfer problem. **Int. Journal of Heat and Mass transfer**, v. 45, p. 1631–1642, 2002.

UPP, E. L.; LANASA, P. L. **Fluid Flow Measurement - A Practical Guide to Accurate Flow Measurement**. 2 edição. ed. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 2002.

VALENTE, L. C. G.; SILVA, L. C. N.; RIBEIRO, A. S.; TRIQUES, A.; REGAZZI, R. D.; BRAGA, A. M. B. **Técnicas de leitura para sensores a fibra óptica baseados em redes de Bragg**. Salvador-Br: 6^a Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, 2002.

WEAST, R. C. **HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS**. 75. ed. [S.l.]: CRC Press LLC, 1998.

WEBSTER, J. G. **The measurement, Instrumentation and Sensor Handbook**. [S.l.]: CRC Press LCC, 2000.

WEBSTER, J. G. **Measurement Instrumentation Sensors**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.

YAMADA, M.; SAKODA, K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach. **Applied Optics**, v. 26, p. 3474–3478, 1987.

YAPICI, H.; ALBAYRAK, B. Numerical solutions of conjugated heat transfer and thermal stresses in a circular pipe externally heated with non-uniform heat flux. **Energy conversion and management**, v. 45, p. 927–937, 2004.

YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. S. **Fiber Optics Sensors**. 2 edição. ed. [S.l.]: CRC Press, 2001.

ZYTEMP. **The History of Temperature and Thermometry**. 2009. Disponível em: <http://www.zytemp.com/tutorial/History_Of_Thermometry.htm>. Acesso em: 13 de novembro de 2009.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)