

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

**Anemometria Térmica Aplicada à Hidrometria em
Regime de Submedição**

Tony Carlos Moura Cavalcanti

Campina Grande - Paraíba - Brasil

©Tony Carlos Moura Cavalcanti, 30 de novembro de 2016.

Tony Carlos Moura Cavalcanti

Anemometria Térmica Aplicada à Hidrometria em Regime de Submedição

Dissertação de mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Instrumentação Eletrônica

Orientador

Prof. DSc. José Sérgio da Rocha Neto

Campina Grande - Paraíba - Brasil

©Tony Carlos Moura Cavalcanti, 30 de novembro de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- C376a Cavalcanti, Tony Carlos Moura.
Anemometria térmica aplicada à hidrometria em regime de submedição / Tony Carlos Moura Cavalcanti. – Campina Grande, 2017.
65 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. José Sérgio da Rocha Neto".
Referências.
1. Medição de Vazão - Anemometria Térmica. 2. CTA (Constant Temperature Anemometer). 3. Compensação de Temperatura. I. Rocha Neto, José Sérgio. II. Título.
- CDU 551.508.54(043)

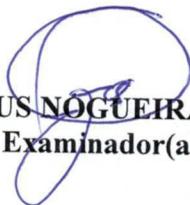
**"ANEMOMETRIA TÉRMICA APLICADA A HIDROMETRIA EM REGIME DE
SUBMEDIÇÃO"**

TONY CARLOS MOURA CAVALCANTI

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 12/12/2016



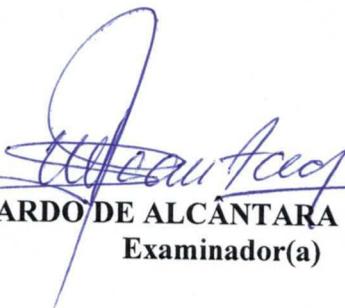
JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG
Examinador(a)



JAIDILSON JO DA SILVA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



MARCOS RICARDO DE ALCÂNTARA MORAIS, D.Sc, UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

“When you are not happy,
you need to be strong to change,
resisting the temptation of turning back.

The weak goes nowhere.”

Ayrton Senna da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pela compreensão em todos os momentos.

Aos Professores que tive durante toda minha vida escolar e acadêmica, que com grande capacidade, me mostraram que a busca pelo conhecimento é algo a ser buscado a cada dia.

Agradeço aos professores, José Sérgio da Rocha Neto e Antonio Marcus Nogueira Lima, pela orientação e colaboração. Agradeço pelos conselhos e ensinamentos e principalmente a confiança depositada na minha pessoa para a conclusão desta importante etapa.

Ao professor Jaidilson Jó pelas conversas, que apontavam questionamentos sempre pertinentes e foram de enorme valia para a condução do trabalho.

Ao professor Marcos Morais.

Aos amigos que compartilharam momentos de descontração, fazendo com que a vida tenha o seu lado de leveza valorizado, e, assim poder aliviar o estresse advindo de pequenos problemas do dia a dia.

Aos colegas de LIEC de hoje e de sempre.

As meninas Bia, Bruna e Clara, por me escutarem sempre quando eu falava dos estudos da minha pesquisa e auxílio em alguns experimentos.

Ao amigo Simões, por estar sempre disposto a oferecer a sua, sempre confiável, ajuda.

A Thamiles pela ajuda crucial para a aquisição de todas as informações referentes aos experimentos.

Ao grande amigo José Maurício, que mesmo estando longe em muitos momentos, sempre foi uma das pessoas que mais me passaram energia positiva e conselhos pertinentes na busca de solucionar os pequenos e grandes obstáculos que tive durante essa caminhada.

Agradeço a Daphne, por todos os momentos vividos, por todas as palavras de ânimo, por cada detalhe que fez essa caminhada menos dolorosa. Agradeço por sempre acreditar em mim e ter sempre palavras de estímulo e de apoio que sempre usei para refletir nas minhas decisões. Agradeço todo o amor e carinho recebidos. E claro, toda a ajuda ofertada a mim por ela, para a melhoria do texto, de figuras e da formatação dessa dissertação.

A Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo suporte dado ao longo do mestrado.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Tony Carlos Moura Cavalcanti

Sumário

	Sumário	6
	Lista de ilustrações	8
	Lista de tabelas	9
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos e contribuições	13
1.3	Revisão bibliográfica	14
1.4	Organização da dissertação	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Medição de vazão	18
2.2	Sistemas térmicos aplicados a medição de velocidade de fluidos	20
2.3	Equações de Navier-Stokes e de convecção-difusão	22
2.4	Sensores termo-resistivos	23
2.4.1	Equações que descrevem os sensores termo-resistivos	23
2.4.2	Tipos de sensores termo-resistivos	24
2.5	Coeficiente de transferência de calor (h)	25
2.6	Sensor termo-resistivo (<i>MEMS</i>)	26
3	SOLUÇÃO PROPOSTA E ANÁLISE DO REGIME DE FLUXO	28
3.1	Solução proposta	28
3.2	Simulações	30
3.2.1	Estruturas simuladas	30
3.2.2	Curvas de velocidade	33
3.3	Número de Reynolds	35
4	SENSORES TERMO-RESISTIVOS	37
4.1	Caracterização dos sensores termo-resistivos	37
4.1.1	Caracterização estática	37
4.1.2	Caracterização dinâmica	39
4.1.3	Estimação dos parâmetros	39
4.2	Aplicações de sensores termo-resistivos	41

4.2.1	Modos de operação	42
4.3	Modo de operação à temperatura constante (CTA)	43
4.4	Compensação da temperatura do fluido	44
5	PLATAFORMA DE TESTES	48
5.1	Plataforma de testes	48
5.2	Resultados experimentais	53
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	58
	Referências	60

Lista de ilustrações

Figura 1 – Curvas de erros de um hidrômetro (Vazões em l/h). [1]	20
Figura 2 – Imagem da estrutura do sensor e sua estrutura resistiva	27
Figura 3 – Representação da solução proposta para hidrometria em regime de submedição	28
Figura 4 – Representação da vista do Tubo em 3D (Vista sólida).	31
Figura 5 – Estrutura 1 - Representação do sensor posicionado no meio do tubo na direção perpendicular ao fluido	31
Figura 6 – Estrutura 2 - Representação do sensor posicionado no meio do tubo na direção do fluxo (sentido comprimento)	32
Figura 7 – Estrutura 3 - Representação do sensor posicionado no meio do tubo na direção do fluxo (sentido largura)	32
Figura 8 – Estrutura 4 - Representação do sensor posicionado no meio do tubo (parte superior) na direção do fluxo (sentido largura)	32
Figura 9 – Curva de velocidade, estrutura 1	33
Figura 10 – Curva de velocidade, estrutura 2	33
Figura 11 – Curva de velocidade, estrutura 3	34
Figura 12 – Curva de velocidade, estrutura 1	34
Figura 13 – Representação da estufa para caracterização estática	37
Figura 14 – Característica $R_s \times T_s$ do sensor termo-resistivo	38
Figura 15 – Representação do circuito de medição com sensor termo-resistivo	44
Figura 16 – Circuito de compensação da temperatura do fluido	45
Figura 17 – Imagem da bomba de porão.	49
Figura 18 – Imagem do sensor de efeito Hall utilizado como referência para os testes de vazão.	49
Figura 19 – Sinal quadrado do sensor referência.	50
Figura 20 – Imagem do dispositivo de aquisição de dados - NI USB-6212	50
Figura 21 – Interface para acompanhamento do experimento.	51
Figura 22 – PWM aplicado a bomba de porão.	52
Figura 23 – Estrutura para medição de vazão.	52
Figura 24 – Plataforma de testes	53
Figura 25 – Gráfico da tensão de saída (Tensão sobre a Ponte de Wheatstone) em função da vazão.	55
Figura 26 – Representação de uma solução para o desenvolvimento do medidor para a faixa de submedição.	59

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dimensões do sensor	26
Tabela 2 – Resistência do sensor e do aquecedor (Resistência à 0°C)	27
Tabela 3 – Número de Reynolds	35
Tabela 4 – Valores da caracterização do sensor termo-resistivo	38
Tabela 5 – Valores dos parâmetros a e b e n	41
Tabela 6 – Tensões de saída	54
Tabela 7 – Vazão calculada e erro percentual.	56

RESUMO

O objetivo neste trabalho é propor um sistema para a hidrometria na faixa de submedição utilizando a anemometria térmica. O objetivo de medir vazão está presente em muitos campos da ciência, sendo necessário sabermos quais os valores de um material foram consumidos com o menor erro possível. Na primeira parte da pesquisa foram realizadas simulações em ambiente multifísico para identificar as condições de trabalho e possíveis pontos de localização do sensor. Para poder usar o sensor, é necessário conhecer valores limítrofes de trabalho do mesmo, ou seja, a faixa de operação, indicando assim a vazão mínima e máxima de operação do sensor anemométrico. Portanto, na segunda etapa do trabalho, foi proposta uma plataforma com um sistema de bombeamento para testar o sistema de medição proposto. A plataforma foi construída de modo a permitir que um fluido flua através de uma tubulação e, assim, determinar qual é a velocidade do fluido e, portanto, a vazão.

Palavras-chave: Medição de vazão; anemometria térmica; CTA (*Constant Temperature Anemometer*); compensação de temperatura.

ABSTRACT

The objective of this work is to propose a system for the hydrometry in the sub-measurement range using thermal anemometry. The objective of measuring flow is present in many fields of science, it is necessary to know what values of a material were consumed with the smallest possible error. In the first part of the research, simulations were performed using COMSOL software to identify working conditions and possible sensor localization points. In order to be able to use the sensor, it is necessary to know the boundary values of the sensor, ie the operating range, thus indicating the minimum and maximum flow rate of the anemometric sensor. Therefore, in the second stage of the work, a platform with a pumping system was proposed in order to test the proposed measurement system. The platform was constructed so as to allow a fluid to flow through a pipeline, and thereby determine what the velocity of the fluid, and hence the flow, is.

Keywords: Flow measurement; anemometry principle; CTA (*Constant Temperature Anemometer*); temperature compensation.

1 Introdução

Em processos industriais, a vazão é uma das principais grandezas envolvidas, de modo que sua medição é essencial para o controle do processo, análise de eficiência, análise e garantia de qualidade, entre outros aspectos. Não apenas para as indústrias, mas também para as empresas de abastecimento de água, na área de medicina, medição de fluidos biológicos e na infusão de drogas, a medição de fluxo é de grande importância. Em função das aplicações mais variadas, é possível encontrar um grande número de medidores de vazão no mercado, os quais se baseiam em diferentes princípios físicos. A escolha do sistema de medição mais adequado para uma dada aplicação deve ser feita considerando uma série de aspectos, como o tipo de fluido, a faixa de operação, a exatidão exigida, o custo, entre outros [2].

Um dos princípios físicos utilizados para medição de fluxo é o princípio de condução de calor, que se baseia nas leis da termodinâmica. Os dois principais tipos de sensores que utilizam esse princípio são: sensores calorimétricos e anemômetros a fio quente e filme quente. Os sensores calorimétricos são utilizados para verificar a distribuição de calor na vizinhança de um elemento aquecido, em função da dissipação térmica que ocorre devido à passagem de fluido, para determinar a velocidade do fluido. Enquanto que os anemômetros a fio quente e filme quente são sensores que utilizam o princípio da transferência de calor [3]. O seu funcionamento ocorre pelo aquecimento de um fio ou filme metálico, de modo que quando o sensor é submetido a um fluido com uma determinada velocidade, ele perde calor e de acordo com essa perda pode-se obter informações acerca da velocidade do fluido [4].

Nos últimos anos houve um aumento na confecção de sistemas baseados em tecnologias de Microssistemas Eletromecânicos (*MEMS - Micro-Electromechanical Systems*), e o uso desses sistemas para medição de fluxo tem uma vantagem importante em relação aos medidores convencionais, que é a miniaturização dos sistemas por meio da aplicação da instrumentação eletrônica de precisão [5]. Dessa forma, equipamentos construídos com base nessa tecnologia apresentam alta sensibilidade, respostas rápidas, e principalmente, baixo consumo. Neste trabalho é proposto um sistema de medição de vazão baseada na tecnologia *MEMS*, utilizando o princípio da condução de calor.

1.1 Motivação

Um problema existente nos sistemas de medição de fluxo utilizados pelas empresas distribuidoras de água é quanto a não tarifação sobre determinados valores de vazão, devido à faixa limitada de operação dos medidores convencionais. Essa perda é originada, principalmente, em função de vazamentos que geram vazões muito pequenas, de modo que não podem ser aferidas pelos medidores à turbina. Os medidores que estão hoje no mercado são capazes de trabalhar em uma região em torno de $0,6 \text{ m}^3/h$ como vazão nominal e em uma temperatura inferior a $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Esses medidores de vazão, principalmente os medidores velocimétricos, não têm capacidade de medir vazões de ordem muito baixa (vazões menores que 15 l/h , para medidores velocimétricos da classe C), de modo que apresentam erros significativos de leitura. Isso acarreta desperdício e perdas de faturamento a concessionária, pois ela está tratando água que não está sendo tarifada, reduzindo, assim, seus lucros. Uma alternativa para lidar com este problema de medição de baixas vazões é utilizar um medidor a base de elemento aquecido, como no princípio calorimétrico ou anemométrico, visto que sensores desse tipo apresentam alta sensibilidade [6]. Deste modo, é de grande importância o uso de técnicas que operem em um intervalo maior de medição e vazão. Portanto, a proposta do trabalho voltada para a investigação dessas técnicas é bastante relevante e necessária para o estudo e desenvolvimento de sistemas capazes de operar em uma maior faixa de medição de vazão.

1.2 Objetivos e contribuições

Nessa dissertação, o objetivo principal é avaliar o princípio da condução de calor aplicado à medição de vazão em regime de submedição. E os objetivos específicos neste trabalho são:

1. Avaliar o estado da arte sobre medição de vazão;
2. Avaliar as técnicas anemométricas na medição indireta da vazão;
3. Implementar modelos em ambientes de simulação;
4. Desenvolvimento de uma plataforma para realização de testes;
5. Avaliar circuitos eletrônicos para a compensação da temperatura do fluido;

6. Utilizar circuitos eletrônicos que promovam o aquecimento do sensor;

A principal contribuição do trabalho proposto é a implementação de uma técnica de medição de vazão utilizando a anemometria térmica de forma a obter a leitura de vazões na faixa de medição dos hidrômetros conhecida como submedição. Sensores baseados em elementos aquecidos apresentam alta sensibilidade, de modo que o desenvolvimento de um sistema de medição de vazão fundamentado nesses princípios pode ser uma solução para os problemas existentes com os medidores convencionais quanto à medição de pequenas vazões (poucos litros por hora). Portanto, é possível construir um medidor capaz de operar em uma maior faixa de vazão.

1.3 Revisão bibliográfica

O processo de mensurar o consumo de um fluido (líquido ou gás) é de grande importância para qualquer processo, seja ele residencial, comercial ou industrial. Uma medição errônea pode implicar em perdas consideráveis. Por essa razão, é importante que seja utilizado o medidor de vazão adequado para a aplicação desejada. A vazão nada mais é que a quantidade de massa ou de volume que atravessa uma área de secção transversal por unidade de tempo, o mais comum é representá-la em l/h ou em m^3/h , porém ainda há outras unidades internacionais que também são muito usadas como o gal/h . A vazão pode ser classificada de acordo com vários aspectos, mas os principais são: laminar e turbulento. A vazão laminar é caracterizada por um movimento suave e contínuo e pode ser obtida com baixas velocidades e com fluidos de baixa densidade. A vazão turbulenta é caracterizada por um movimento desorientado semelhante a redemoinhos e são mais comumente encontradas em regimes que apresentam grande velocidades [7].

Por condições, como as anteriormente mencionadas, os instrumentos utilizados para a medição de vazão dependem de vários fatores, segundo (Cassiolato, 2008) [8], destaca-se que a medição de vazão deve ser relacionada com:

1. exatidão a ser alcançada;
2. tipo de fluido - gás ou líquido;
3. condições termodinâmicas - temperatura e pressão;

4. custo.

Por meio desses fatores, é possível selecionar o tipo de medidor mais adequado.

Em aplicações de medição da vazão, é comum ter instalações em tubos para o transporte de fluidos, sendo mais comum o uso de tubulações circulares, pois o círculo fornece uma boa resistência estrutural e ainda apresenta uma maior área transversal por unidade. Assim, a palavra tubo é referida a uma tubulação de secção circular [1].

Para transferir o fluido de um local para outro é utilizada uma tubulação, e em uma das extremidades é ligada uma bomba, que irá impulsionar o fluido para a outra extremidade. Desta forma, é necessário que haja uma diferença de pressão para que o fluido possa escoar. A diferença de pressão garante que o fluido atinja equilíbrio ou fique em regime permanente. A tubulação circular acarreta perda de carga ao longo da estrutura. Essa perda de carga é atribuída a vários parâmetros como: material de fabricação do tubo; diâmetro do tubo; o tratamento da superfície interna do tubo; idade da tubulação, entre outros [8].

Para tubulações utilizadas para a medição e faturamento de água, segundo (Pereira, 2008), avalia-se que de 8% a 23% da água produzida é perdida por submedição, devido a sistemas que apresentam baixas vazões, proporcionada principalmente pelo uso de sistemas lentos de abastecimentos como: caixas d'água, tanques de abastecimento, etc [1].

A submedição é originada principalmente por causa do uso de medidores de turbina, que são denominados de monojatos e multijatos. Esses medidores são extensivamente utilizados em todo o mundo como o equipamento utilizado para mensurar o consumo de água fornecida a consumidores residenciais e não residenciais. No Brasil, esse tipo de medidor está presente em quase todas as de instalações residenciais hidrometradas. Para vazões mais baixas, o erro de indicação pode chegar a 100%. Nessas vazões, esses medidores são incapazes de proporcionar o movimento das turbinas, e conseqüentemente efetuar a tarifação da água consumida.

Com isso, percebe-se a importância de aplicar mecanismos ou dispositivos que possam mensurar essas vazões mínimas. Portanto, surge a necessidade do uso de tecnologias que não dependam do movimento de uma turbina, ou seja, que não necessitem de uma força mínima para proporcionar o seu movimento, e conseqüentemente a tarifação associada. As técnicas anemométrica e calorimétrica são algumas dessas técnicas alternativas que podem ser empregadas para lidar com esse problema existente nos medidores de turbina.

Segundo (Dalola, 2012), *MEMS* podem ser utilizados para medir vazões, atingindo alta sensibilidade e proporcionando também baixo consumo e baixo custo de produção. Além disso, permite a combinação desses circuitos com circuitos integrados, proporcionando uma ligação com sistemas inteligentes, e muitos desses sistemas se apoiam em técnicas de transdução térmica, como a calorimétrica e anemométrica [9].

Pesquisas apontam para um grande uso de *MEMS* na medição de fluxo, principalmente pelo uso de novas tecnologias de micro-usinagem. Os sensores de fluxo que medem a assimetria do perfil de temperatura em torno do aquecedor costumavam ser chamados de sensores calorimétricos, segundo (Nguyen, 2007) [10].

Para o uso da anemometria térmica, Segundo (Cerimovic, 2009), o pequeno tamanho do sensor resulta em baixos tempos de resposta. Esses sensores podem ser operados em dois modos diferentes: modo potência constante e modo de diferença de temperatura constante. Aplicando potência de aquecimento constante, uma alta sensibilidade só é viável dentro de uma faixa de fluxo limitado. Assim, para as velocidades mais elevadas, a característica de saída torna-se ambígua. A fim de evitar esta ambiguidade e, conseqüentemente, para se obter uma gama mais ampla de medição, a diferença de temperatura constante entre a membrana que recobre o elemento sensor e o fluido é desejável [11].

Para se usar uma estrutura calorimétrica é necessário ter um aquecedor e sensores de temperatura para medir a distribuição de temperatura na vizinhança do aquecedor. Segundo (Barreto, 2011), as distâncias a que os elementos irão se localizar fazem com que o dispositivo construído seja atribuído a uma margem específica de medição de vazão. Outro ponto importante é a distância que o elemento aquecedor deve ficar da superfície interna do tubo, pois o gradiente de velocidade na vizinhança da parede do tubo é praticamente nulo e se for colocado distante da parede do tubo pode influenciar no perfil de velocidade. Dessa forma, se torna necessário encontrar valores adequados para o posicionamento do elemento aquecedor e dos sensores de temperatura. Com a diferença de temperatura é possível calibrar o sensor em função da vazão ou da velocidade média do fluxo, bastando calcular a vazão de saída pela integral da velocidade de *outlet* [12].

Portanto, conforme apresentado, a aplicação de técnicas anemométricas ou calorimétricas associadas a tecnologia *MEMS* mostra-se como uma solução promissora para a construção de medidores para medição de pequenas vazões, visto que os medidores de turbinas, que são os medidores amplamente utilizados, não são capazes de medir pequenas vazões, implicando em perdas para as empresas de abastecimento de água. Neste trabalho é proposto que a anemometria térmica pode ser utilizada para medir a vazão de água em tubulações de abastecimento em regime de submedição, utilizando para isso um sensor aquecido (*Hot-film*) fabricado na tecnologia *MEMS*.

1.4 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório, da seguinte forma:

- no capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica do trabalho, abordando os princípios térmicos utilizados para medição de vazão, além das técnicas de medição de vazão encontradas na literatura. Também é apresentado um estudo sobre os sensores termo-resistivos;
- no capítulo 3 é apresentada a solução proposta para esse trabalho e também são apresentados os resultados de simulações realizadas no *software* COMSOL, que são utilizadas para compreender como o fluido se comporta com a presença do sensor. Sendo possível determinar o regime de escoamento e a melhor colocação do sensor na estrutura (plataforma de testes).
- no capítulo 4 é apresentado um estudo sobre anemômetros em circuito a temperatura constante. Comenta-se sobre a caracterização desses sensores e como os parâmetros da Lei de King podem ser determinados, ainda é apresentado a teoria sobre a compensação da temperatura do fluido para anemômetros a filme quente;
- no capítulo 5 é apresentada a plataforma de testes que foi construída para avaliar o desempenho do sistema de vazão proposto, e os demais componentes, como: sistemas de aquisição de dados; interface utilizada e características da montagem e são apresentados os resultados experimentais obtidos e a análise dos dados a fim de comprovar o uso da anemometria térmica na medição de vazão;
- por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros.

2 Fundamentação teórica

A medição adequada de vazão de fluidos é de grande importância nos processos industriais, pois tem implicações diretas na qualidade, produtividade, segurança e eficiência dos processos. Não somente nos processos industriais, mas a medição correta da vazão também é essencial ao tratar de volumes de produtos comercializados, como água e gás natural. Todos os medidores de vazão apresentam um erro inerente de leitura, e esse erro está diretamente associado ao tipo de fluido e aplicação a que se destina. Por esta razão, é possível encontrar diversos tipos de medidores, em que cada tipo é mais adequado para uma determinada aplicação. Por exemplo, o medidor utilizado para medir a vazão em um leito de rio não pode ser empregado para medir a vazão de água em residências, pois acarretaria erros de leitura, comprometendo o faturamento das concessionárias de água. Ao prestar um serviço de distribuição de algum fluido, a empresa quer ter a certeza de que perderá o mínimo possível desse fluido. Portanto, o estudo sobre a medição de vazão, bem como os métodos de medição, são necessários e de grande importância para as empresas. Neste trabalho é proposto um sistema de medição de vazão que se baseia na anemometria térmica, e utiliza a tecnologia *MEMS*.

Os principais aspectos sobre medição de vazão, anemometria térmica e a tecnologia *MEMS* são apresentados a seguir, e por fim é feita uma revisão bibliográfica acerca de medição de vazão baseada em elementos aquecidos, incluindo os sensores calorimétricos e os anemômetros a fio quente e filme quente.

2.1 Medição de vazão

A medição de vazão não está presente apenas nas indústrias, para controle e medição da quantidade de fluxo de fluidos nos processos, mas está também dentro das residências para realizar o faturamento do consumo de água [8]. A medição de vazão consiste em mensurar a quantidade de fluido que atravessa uma determinada seção plana em um dado intervalo de tempo. Vazão pode ser definida como a quantidade de massa ou líquido que escoar através de uma seção de uma

tubulação ou canal por unidade de tempo, podendo ser volumétrica ou mássica (kg/h). A vazão volumétrica corresponde à quantidade em volume de um fluido que escoar através de uma secção em um dado intervalo de tempo [2], [7], dada pela equação 2.1:

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (2.1)$$

onde: V é o volume (m^3) e t o tempo (s).

Enquanto que a vazão mássica pode ser definida como a quantidade em massa de um fluido que escoar em uma secção plana em um determinado intervalo de tempo, apresentada na equação 2.2:

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (2.2)$$

onde: m é a massa (kg) e t o tempo (s).

Na maioria das aplicações, a medição de vazão é feita indiretamente. Para medir a vazão de água emprega-se principalmente dois métodos: os volumétricos e os velocimétricos [13]. Os medidores volumétricos têm o princípio de funcionamento baseado na medida de volumes que são obtidas a partir do enchimento e esvaziamento de uma câmara. Isso o torna mais sensível que os demais, sendo possível medir vazões muito baixas, da ordem de $1l/h$. No entanto, o seu uso não é tão difundido, além disso, apresenta um custo mais elevado em relação aos outros tipos de medidores e uma maior perda de carga, que são perdas devido a viscosidade do fluido e o seu atrito com as paredes internas, comparada aos velocimétricos. Os medidores velocimétricos têm o princípio de funcionamento baseado nas revoluções de uma turbina, que é movimentada pela passagem do fluido. Esse sistema acarreta alguns problemas, pois é necessário vencer a inércia do sistema para que a medição seja iniciada. Esse tipo de sistema de medição é o mais difundido no Brasil, e tem como principais vantagens um menor custo e menor perda de carga comparado aos volumétricos, e ainda podem trabalhar em vazões extremas, caso seja necessário [1].

Existem vários problemas que afetam a medição correta dos valores consumidos de água. Esses problemas podem ser de origem humana, no que diz respeito às fraudes. Podem ainda estar relacionados com falhas do sistema, como a interrupção do fornecimento ou variações bruscas de pressão. E por fim, podem ser decorrentes da fabricação do medidor de vazão, como defeitos de fabricação, desgaste e submedição. A submedição está relacionada às pequenas vazões que não são cobradas pelas concessionárias em função das limitações de medição dos medidores instalados

nas residências. Na Figura 1, temos um gráfico mostrando as regiões de medição dos medidores velocimétricos.

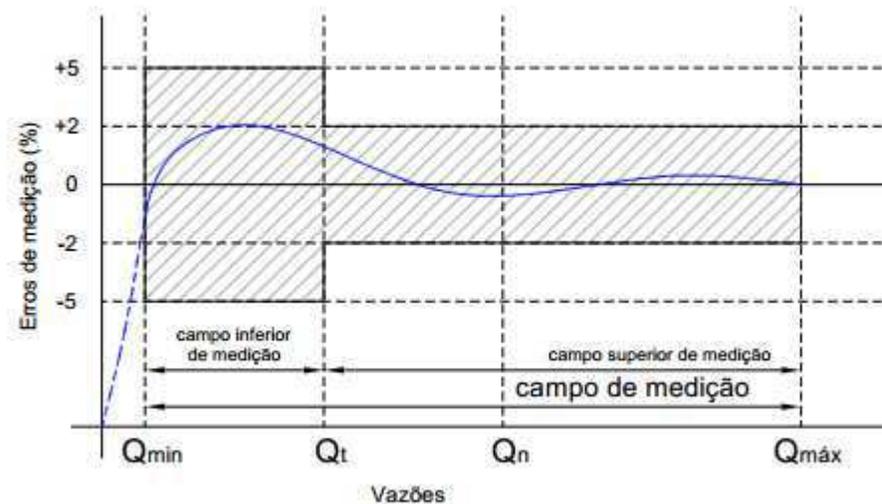


Figura 1 – Curvas de erros de um hidrômetro (Vazões em l/h). [1]

Conforme observado, os hidrômetros não são capazes de medir valores inferiores a Q_{min} . Então, com a aplicação da técnica de anemometria térmica, é possível implementar sistemas de medição capazes de medir valores muito baixos de vazão. Em alguns trabalhos são alcançados valores da ordem de $0,1 l/h$.

2.2 Sistemas térmicos aplicados a medição de velocidade de fluidos

Para a medição de vazão podem ser usadas quatro técnicas distintas usando um elemento aquecido [14]. São elas:

1. Anemometria térmica: um aquecedor é mantido a uma temperatura constante ou a uma potência constante e a velocidade do fluido é calculada a partir da perda de calor do elemento aquecedor;
2. Princípio Calorimétrico: um aquecedor é mantido sobre uma temperatura, e dois sensores distanciados da fonte de calor informam a variação de temperatura que é relacionada à

velocidade do fluido;

3. Princípio Micro Calorimétrico: É similar ao princípio calorimétrico, é diferente apenas pela distância entre o elemento aquecedor e os elementos sensores. Eles estão dispostos muito próximos, podendo estar a décimos de milímetros de distância entre o sensor aquecido e os sensores de temperatura;
4. *Time of Flight*: Um aquecedor insere um pulso de calor no fluido e depois de alguns milissegundos é sentido por um sensor de temperatura colocado a uma distância conhecida e com o tempo e a distância conhecidos encontra-se a velocidade.

Cada técnica evidencia uma forma de aplicação. O princípio anemométrico (anemometria térmica) utilizado para medição de vazão (princípio adotado neste trabalho) se baseia na perda de calor de um elemento aquecido para o meio, de modo que um sensor de temperatura aquecido é refrigerado a partir do escoamento do fluido. Essa transferência de calor depende da velocidade do fluido e da diferença de temperatura. Deste modo, quanto maior for a velocidade do fluido, maior será a refrigeração do sensor de temperatura.

O princípio anemométrico pode ser utilizado em dois modos: modo de potência constante e o modo de diferença de temperatura constante. No modo de potência constante, a potência usada para aquecer o elemento aquecedor é mantida constante, e a informação da velocidade do fluido é relacionada à queda de temperatura do aquecedor. Enquanto que no modo de temperatura constante, a temperatura do aquecedor é mantida constante em alguns graus acima da temperatura do fluido, e por meio de um equacionamento adequado pode-se determinar a velocidade do fluido, e conseqüentemente a vazão. Para que isso ocorra deve-se fazer o sensor operar em um ponto de trabalho de modo a obter uma diferença de tensão em um circuito, essa variação de tensão é relacionada à velocidade do fluido [15]. Dependendo da fabricação eles podem ser termoresistores ou termoeletricos. Termoresistores são sensores cuja resistência elétrica é alterada em função de variações de temperatura, enquanto que os termoeletricos são sensores que se baseiam na conversão de energia térmica em energia elétrica [4].

2.3 Equações de Navier-Stokes e de convecção-difusão

O modelamento de escoamentos compressíveis, incompressíveis, turbulento e laminar de fluidos é feito a partir das equações de Navier-Stokes. Estas equações representam princípios físicos básicos: conservação da massa, conservação do momento e conservação da energia [12]. Para o modelamento do escoamento de um fluido incompressível, as equações de Navier-Stokes são dadas por:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.4)$$

onde: $\mathbf{u} = u_x \mathbf{i} + u_y \mathbf{j}$, é o vetor de velocidade do fluido, ρ é a densidade do fluido dada em (kg/m^3), η é a viscosidade do fluido dada em ($Pa.s$), p é a pressão e g é a aceleração da gravidade dada em (m/s^2).

A equação 2.3 está associada à conservação da massa, também conhecida como a equação da continuidade, e a equação 2.4 é referente à conservação do momento [16].

O comportamento referente ao movimento do calor sobre uma massa fluidica é dado pela equação de convecção-difusão:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T \quad (2.5)$$

onde: ρ_s é densidade dada em [kg/m^3], C_p é o calor específico do material dado em ($J/kg.K$), T é a temperatura do material dado em (K), e k é condutividade térmica dada em ($W/m.K$).

A primeira parte da equação 2.5 está associada com a velocidade do fluido, e é denominada de termo convectivo. Enquanto que a segunda parte, à direita da igualdade, corresponde à difusão molecular. Dessa forma, a partir do acoplamento entre as equações de Navier-Stokes, equação 2.3 e equação 2.4, e a equação de convecção-difusão equação 2.5, o qual é dado pelo vetor velocidade, é possível obter o comportamento do calor ao longo do fluido. As equações 2.3 e 2.5 formam um sistema de equações diferenciais parciais acoplado [12], [17], [16]. O conjunto de equações pode ser resolvido ou pelo método das diferenças finitas ou pelo método dos elementos finitos,

que é o método de solução presente na ferramenta computacional Comsol[®] [18] utilizada no desenvolvimento das simulações desse trabalho.

2.4 Sensores termo-resistivos

Os sensores termo-resistivos são empregados em diversas áreas, como: instrumentação eletrônica; biomedicina; mecânica dos fluidos; agricultura, dentre outras. Esses sensores são empregados em sistemas de medição que monitoram grandezas como: temperatura; velocidade de fluido; radiação.

Os sensores termo-resistivos possuem características que podem ser utilizadas de acordo com o interesse de medição de uma grandeza como as mencionadas anteriormente. Dessa forma torna-se necessário conhecer suas características e compreender seu funcionamento de acordo com as grandezas de interesse (temperatura, radiação, velocidade de fluido).

Nesse trabalho são usados sensores termo-resistivos de filme metálico para o monitoramento da vazão de água em uma tubulação utilizando uma plataforma de testes.

2.4.1 Equações que descrevem os sensores termo-resistivos

Os sensores termo-resistivos são descritos por duas equações: a primeira equação relaciona a resistência com a temperatura e a segunda equação é primeira Lei da Termodinâmica aplicada ao sensor. A primeira equação pode ser descrita de uma forma geral, como pode ser visto na equação 2.6, a seguir:

$$R_s = F(T_s) \quad (2.6)$$

onde: R_s é a resistência do sensor dada em (Ω) e T_s é a temperatura do sensor dada em (K ou $^{\circ}C$).

$F(T)$ representa a função que determina se o sensor resistivo pode possuir um coeficiente de temperatura positivo ou negativo.

A segunda equação relaciona a energia entregue ao sensor, por efeito *Joule*, com a energia dissipada no meio e ainda a variação de sua energia interna. A equação 2.7, descrita a seguir é definida como a primeira Lei da Termodinâmica.

$$\alpha SH + P_e = hS(T_s - T_a) + mc \frac{dT_s}{dt} \quad (2.7)$$

onde: αSH é a energia térmica em forma de radiação, P_e é a potência elétrica entregue ao sensor, $hS(T_s - T_a)$ é a energia térmica perdida pelo sensor e $mc \frac{dT_s}{dt}$ é a variação de energia interna do sensor.

2.4.2 Tipos de sensores termo-resistivos

Os sensores termo resistivos podem ser divididos de acordo com o seu coeficiente de temperatura, entre sensores com coeficiente de temperatura positivo e sensores com coeficiente de temperatura negativo. Isso indica como a resistência elétrica do sensor se comporta com a temperatura à qual o sensor termo-resistivo está exposto.

Dessa forma teremos equações distintas para cada caso. Para sensores do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) a equação mais comum que descreve o seu comportamento é mostrada a seguir, na equação 2.8 [4].

$$R_s = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2.8)$$

Os sensores com coeficiente positivo de temperatura, PTC (*Positive Temperature Coefficient*) e os sensores metálicos, a variação da resistência elétrica pode ser dada pela equação 2.9 [4] mostrada a seguir.

$$R_s = R_0[1 + \alpha_1(T_s - T_0) + \alpha_2(T_s - T_0)^2 + \dots + \alpha_n(T_s - T_0)^n] \quad (2.9)$$

A equação 2.9 pode ser simplificada, desprezando os coeficientes térmicos (α), acima de um, pois para elementos metálicos pode-se considerar $\alpha_i \gg \alpha_{i+1}$. Simplificando a equação 2.10, apresentada a seguir:

$$R_s = R_o[1 + \alpha_1(T_s - T_o)] \quad (2.10)$$

2.5 Coeficiente de transferência de calor (h)

Utilizando a primeira Lei da Termodinâmica podemos explicar o princípio de funcionamento de um anemômetro a filme quente, pois o mesmo se baseia no princípio da transferência de calor. O fluido perde calor para o meio, sendo o meio gasoso ou líquido. Como o elemento aquecido perde calor é necessário compensar essa perda. Os sensores termo-resistivos que são modelados por essas equações possuem como característica importante o seu coeficiente de transferência de calor (h). Esse coeficiente varia com a velocidade de fluido a qual o sensor aquecido está imerso. O coeficiente (h) pode ser obtido através da Lei de King modificada, que para uso em fluidos com densidade constante pode ser dada pela equação 2.11:

$$h = a + bv^n \quad (2.11)$$

onde: h é o coeficiente de transferência de calor; a , b e n são constantes que são obtidas através de ensaios; v é a velocidade do fluido.

Os valores de a e b e n são obtidos experimentalmente. Porém, o valor de n é geralmente considerado igual a 0,5 para sistemas em que a convecção forçada é bem maior que a convecção livre [19].

Um dos agentes dificultadores da obtenção do coeficiente de transferência de calor é justamente que ele sofre variação com a velocidade do fluido, então em alguns estudos de anemometria a temperatura constante pode ser observado que a equação 2.11 juntamente com a equação 2.7 podem ser utilizadas para relacionar a potência elétrica entregue ao sensor termo-resistivo com a velocidade do fluido. Como a diferença de temperatura é constante, a equação pode ser referida da seguinte forma, como mostrado na equação 2.12.

$$P_e = h S (T_s - T_a) \quad (2.12)$$

E que podemos obter com a substituição do coeficiente de transferência de calor h , temos, em condição de equilíbrio térmico estático:

$$P_e = (a + b v^n) S (T_s - T_a) \quad (2.13)$$

2.6 Sensor termo-resistivo (*MEMS*)

O sensor termo-resistivo utilizado neste trabalho é um *MEMS* (*Microelectromechanical Systems*) desenvolvido pelo IST (*Innovate Sensor Technology*), que fabrica vários tipos de sensores utilizando o princípio da transferência de calor. O uso de *MEMS* tem aumentado consideravelmente nos últimos anos [14] [20]. Esse tipo de dispositivo proporciona uma maior precisão, é mais robusto e bem pequeno, que é uma vantagem considerável, pois garante uma interferência mínima nos experimentos de velocidade do fluido. Como esses sensores são pequenos é necessária uma tecnologia eficiente na sua fabricação, o que acarreta produção em massa e conseqüentemente em preços baixos. Este dispositivo pode medir fluxo de massa para gases e líquidos [21], [22]. O sensor e aquecedor estão inclusos no mesmo chip. E possuem as dimensões informadas na Tabela 1, dada a seguir:

Tabela 1 – Dimensões do sensor

Comprimento	6,9 mm
Largura	2,4 mm
Espessura	0,2 mm

As informações elétricas são dispostas na Tabela 2, apresentada a seguir:

Tabela 2 – Resistência do sensor e do aquecedor (Resistência à 0°C)

	Resistência
Aquecedor	45 Ω
Sensor de Referência	1,2 k Ω

O dispositivo possui o aquecedor e o sensor de referência constituídos do mesmo material, a platina. Esse material possui coeficiente de temperatura suficientemente alto e possui grande estabilidade quando mantido a altas temperaturas (menores que 400 °C). Na Figura 2 é apresentada uma imagem desse dispositivo como também a sua estrutura resistiva, identificando o sensor e o aquecedor do dispositivo.

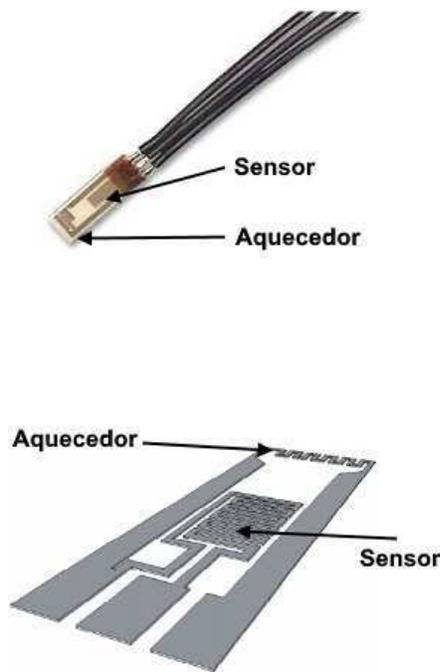


Figura 2 – Imagem da estrutura do sensor e sua estrutura resistiva

No capítulo seguinte é apresentada a solução proposta para esse trabalho, apresentando algumas discussões cruciais referente as características apresentadas na medição de vazão em nível de submedição. São apresentadas, também, simulações para compreendermos melhor o escoamento do fluido com a presença do sensor na tubulação e é investigada a situação do regime de fluido nos testes.

3 Solução proposta e análise do regime de fluxo

3.1 Solução proposta

A solução proposta para esse trabalho é aplicar anemometria térmica, utilizando anemômetro a filme quente, para a hidrometria em regime de submedição. Existem vários pontos a serem considerados sobre a medição e a construção de um equipamento capaz de operar nessa faixa de medição, como: conversor A/D; energia elétrica para o fornecimento de energia para os circuitos; realização da leitura; a união mecânica-elétrica da estrutura, dentre outras. Na Figura 3 é apresentada uma abordagem de como foi realizada a medição com o sensor de filme quente.

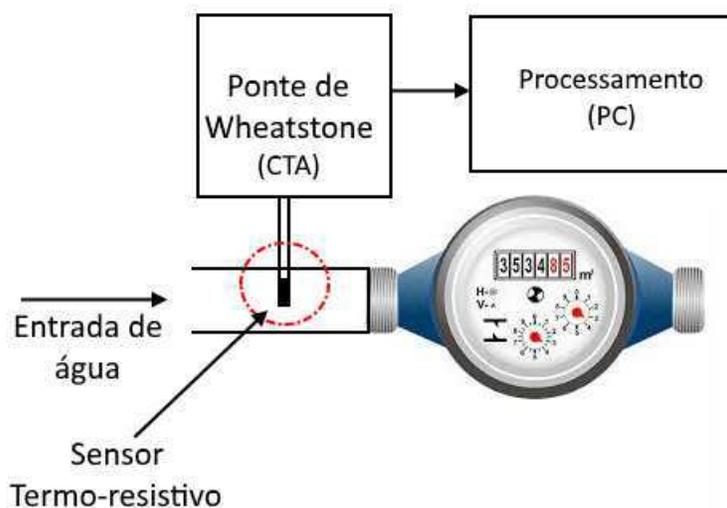


Figura 3 – Representação da solução proposta para hidrometria em regime de submedição

O sensor termo-resistivo deve ser conectado a um circuito em Ponte de Wheatstone, quando utilizado uma configuração em temperatura constante. A Ponte de Wheatstone deve satisfazer os critérios de funcionamento do sensor, fazendo com que a temperatura do fluido seja compensada e que a resistência do sensor não seja alterada com a velocidade do fluido, promovendo uma

configuração CTA (*Constant Temperature Anemometer*). Porém, o conjunto que forma a Ponte de Wheatstone (ponte e amplificador operacional) em si não possui capacidade de suprir a corrente demandada pelo sensor, assim é utilizada uma estrutura que promova um ganho de corrente. Em geral são utilizados transistores conectados a saídas dos amplificadores operacionais e o transistor é levado a realimentação da Ponte de Wheatstone. Mais detalhes dos circuitos serão vistos nos capítulos seguintes.

A etapa de processamento é realizada por um sistema de aquisição de dados (DAQ NI-USB 6212, da *National Instruments*) e utilizando uma interface criada no ambiente LabView, com o posterior processamento dos dados adquiridos para o cálculo da vazão. O DAQ possui conversores A/D de 16 *bits* com taxa de aquisição de 400 *kS/s*, utilizado para a leitura do sinal de tensão do sensor termo-resistivo, proveniente da Ponte de Wheatstone. Essa tensão é contínua e dependente da velocidade do fluido e, por consequência, da vazão.

Foram obtidas medições da tensão de saída da Ponte de Wheatstone, monitorada por meio de uma interface no LabView. Neste capítulo é apresentada uma simulação multifísica com características próximas a plataforma de testes. É avaliado o regime do fluxo do líquido, determinado se a faixa em questão (vazões menores que 30 *l/h*) se enquadram em um regime de fluxo laminar.

O sistema proposto neste trabalho é composto basicamente por um *MEMS*, referenciado na seção 2.6, no qual estão contidos tanto um aquecedor como um sensor de temperatura. O elemento aquecedor sofrerá perda de calor com a passagem do fluido e o sensor de temperatura compensará a temperatura do fluido.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da implementação desse sistema em ambiente computacional, utilizando o software COMSOL *Multiphysics*. Com esta ferramenta é possível simular qualquer processo físico que possa ser descrito por equações diferenciais parciais. Além disso, é possível adaptar modelos pré-definidos para aplicações específicas. A solução numérica das equações diferenciais parciais e ordinárias utilizada pelo COMSOL se baseia no método dos elementos finitos [18]. O COMSOL pode ser utilizado para avaliar vários problemas multifísicos, como os sistemas com anemômetros a fio ou filme quente ou técnicas calorimétricas [23]. Este software foi escolhido devido à sua robustez para a condução das simulações, assim como a interface amigável, que permite a construção de estruturas com diferentes geometrias e permite uma fácil visualização dos mecanismos de testes e dos resultados obtidos.

Na próxima seção é descrita a implementação do sistema de medição de vazão proposto neste trabalho no ambiente do COMSOL. As simulações serão realizadas para determinar a posição do sensor dentro do tubo e conhecer o regime de escoamento.

3.2 Simulações

A fim de tornar as simulações mais próximas aos resultados esperados na prática, isto é, na plataforma de testes, o sistema proposto foi modelado em um ambiente 3D com proximidade as características físicas da plataforma de testes. As simulações foram realizadas considerando apenas um trecho da estrutura, que é a parte principal dos testes, onde está disposto o sensor termo-resistivo.

3.2.1 Estruturas simuladas

Foi construído um tubo com diâmetro de 2 *cm* e comprimento de 20 *cm*, conforme apresentado na Figura 4. O elemento sensor (sensor termo-resistivo) foi construído com as dimensões informadas na Tabela 1. O fluido utilizado para realizar as simulações foi a água, com densidade igual à 1000 *kg/m*³, e a temperatura do fluido foi estabelecida em 293 *K* (20 °C), correspondendo à temperatura ambiente. A velocidade de entrada (*inlet*) foi estabelecida de acordo com a faixa de valores mostrada a seguir:

$$(0,00100 \leq v_{inlet} \leq 0,0275) \text{ m/s.}$$

As simulações apresentadas nesse capítulo apresentam o valor máximo da velocidade informada anteriormente, pois é com esse valor de velocidade ($v = 0,0275 \text{ m/s}$) que a vazão da tubulação está em 31 *l/h*. Na Figura 4 é apresentado o trecho da plataforma onde se localiza o sensor.

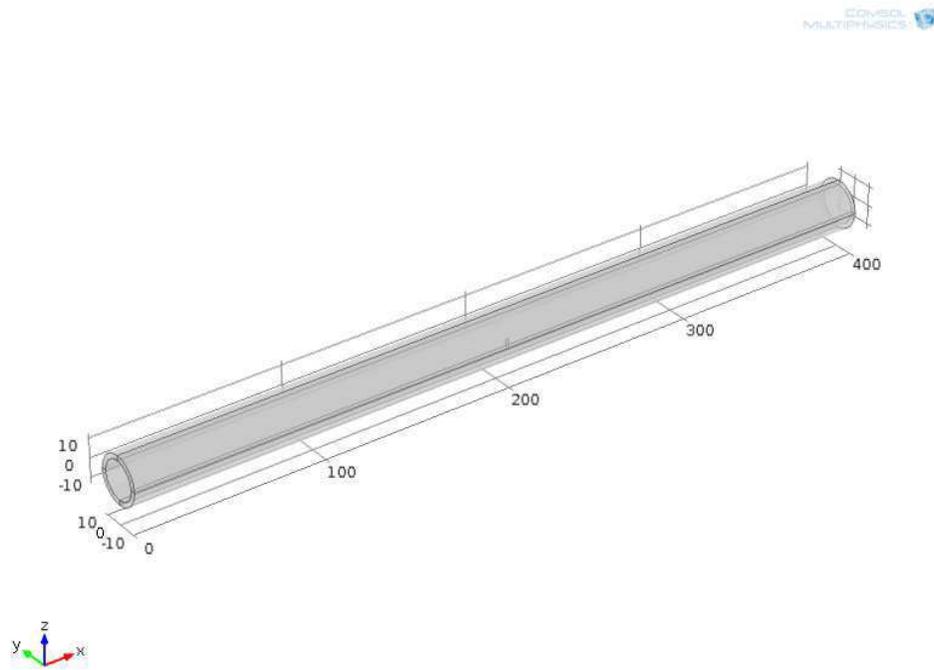


Figura 4 – Representação da vista do Tubo em 3D (Vista sólida).

Foram realizadas simulações para avaliar a posição do sensor e o regime de escoamento do fluido. Sobre o posicionamento foram avaliadas quatro posições. Três posições em que o sensor está colocado de forma longitudinal ao fluxo e outra em que o sensor está de forma transversal ao fluido. Essas posições podem ser vistas nas Figuras 5, 6, 7, 8 a seguir.

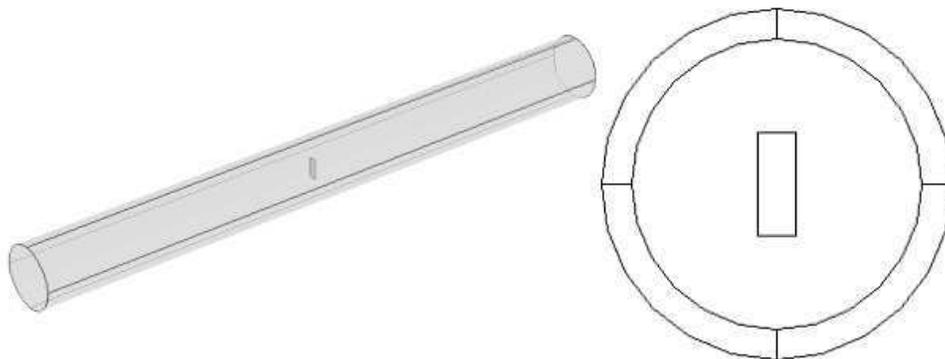


Figura 5 – Estrutura 1 - Representação do sensor posicionado no meio do tubo na direção perpendicular ao fluido

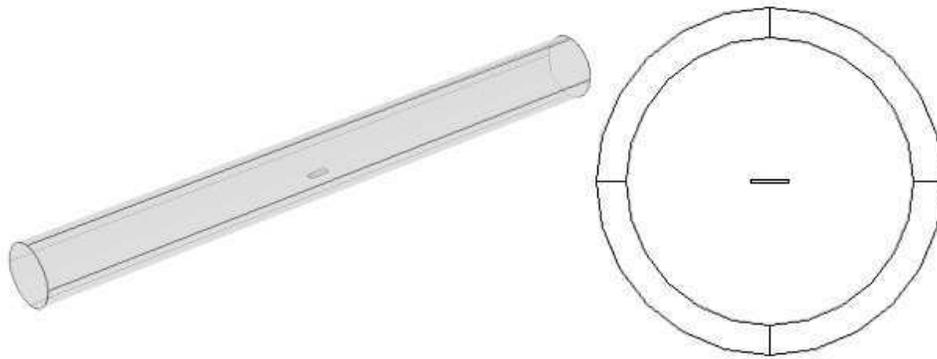


Figura 6 – Estrutura 2 - Representação do sensor posicionado no meio do tubo na direção do fluxo (sentido comprimento)

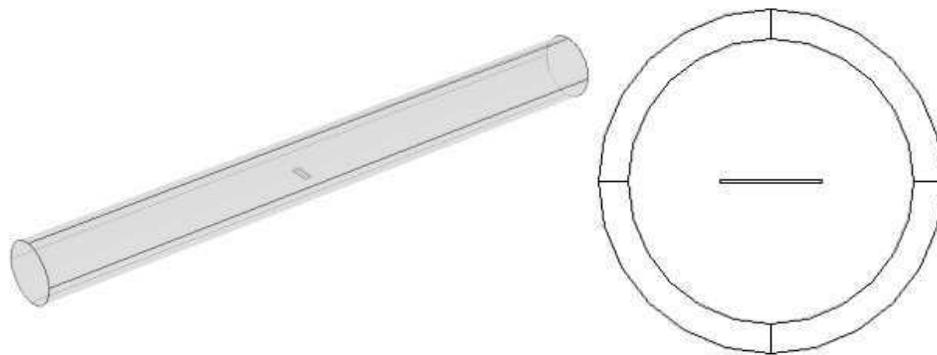


Figura 7 – Estrutura 3 - Representação do sensor posicionado no meio do tubo na direção do fluxo (sentido largura)

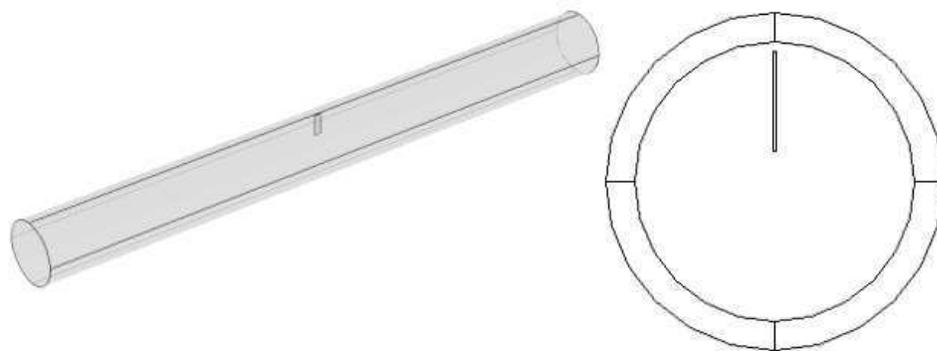


Figura 8 – Estrutura 4 - Representação do sensor posicionado no meio do tubo (parte superior) na direção do fluxo (sentido largura)

3.2.2 Curvas de velocidade

Utilizando as estruturas mostradas nas Figuras 5, 6, 7 e 8 verificou-se como a velocidade do fluido se comporta com a presença do sensor. Esse comportamento da velocidade do fluido nas proximidades do sensor pode indicar perturbações que devem ser analisadas e assim determinar a melhor posição para a localização do sensor na estrutura.

Nas Figuras 9, 10, 11 e 12 são apresentadas as curvas de velocidade do fluido para cada uma das estruturas simuladas. As Figuras são analisadas na região onde se encontra o sensor.

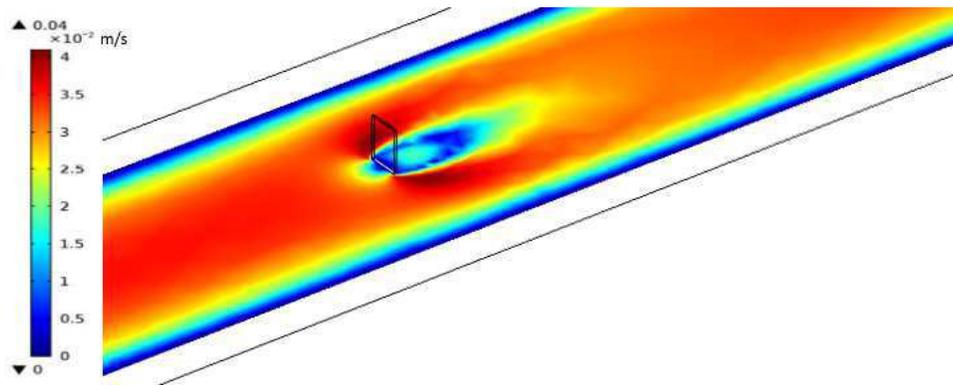


Figura 9 – Curva de velocidade, estrutura 1

Na Figura 9, nota-se que o sensor sendo posto de forma transversal ao sentido do fluxo fará com que o perfil de velocidade seja perturbado e ainda não contribuirá com uma troca efetiva de calor entre o sensor e o meio, dessa forma essa estrutura de testes não deve ser utilizada.

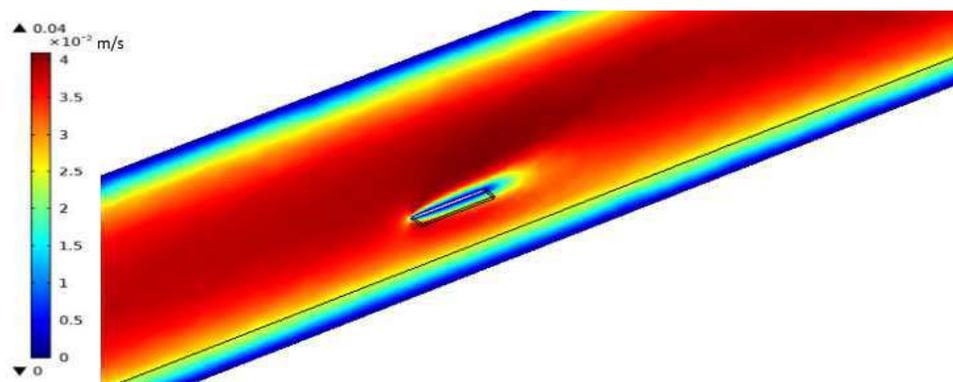


Figura 10 – Curva de velocidade, estrutura 2

Na Figura 10, o sensor está colocado no sentido do fluxo, não ocorre grande perturbação pela presença do sensor, porém, essa disposição do sensor deve ser evitada, pois a construção do sensor

impede que essa estrutura seja utilizada. O sensor é formado por um elemento que será aquecido e um outro elemento que é utilizado como compensador da temperatura do fluido, como o sentido do fluxo é da esquerda para a direita, a compensação da temperatura sofreria influencia do sensor aquecido.

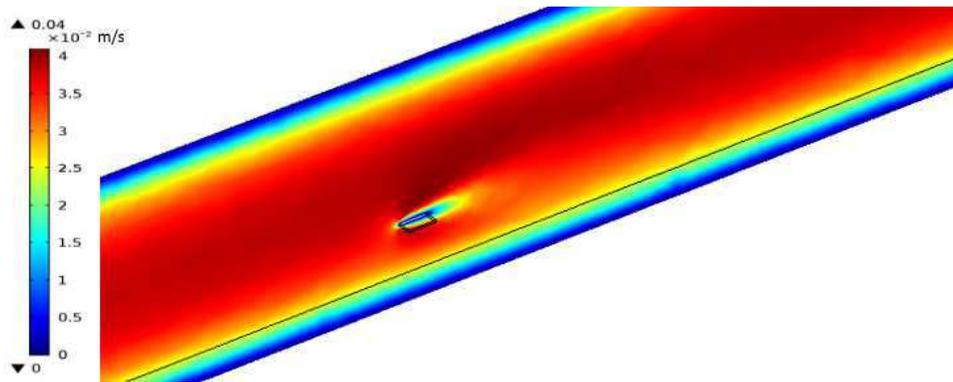


Figura 11 – Curva de velocidade, estrutura 3

A curva de velocidade referente a estrutura três é mostrada na Figura 11. Essa estrutura mostra o sensor posicionado em uma região que não impedirá o fluxo do líquido e também o seu sentido não influenciará a compensação de temperatura. Podendo, assim, ser usada para a realização de testes. Porém, essa disposição física do sensor não pode ser utilizada em virtude da construção do sensor, que possui um encaixe que é utilizado para a fixação nos tubos ou dutos.

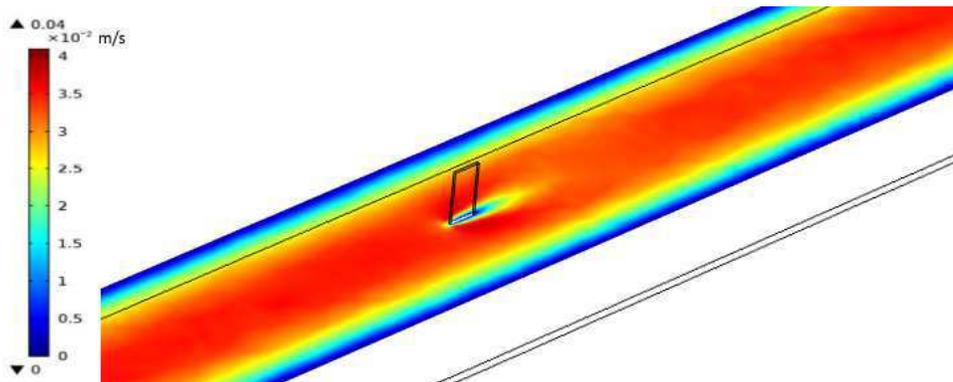


Figura 12 – Curva de velocidade, estrutura 1

Na Figura 12, é apresentada a simulação mostrando a curva de velocidade para a estrutura de testes. Essa simulação considera o sensor sendo conectado no tubo através do seu encaixe padrão, assim a distância que ele adentra o tubo é utilizada para saber o alcance de profundidade do sensor. Essa estrutura apresentada na Figura 12 é a que está mais próxima da estrutura utilizada na plataforma de testes.

3.3 Número de Reynolds

Os valores de velocidade do fluido juntamente com características da estrutura, como: densidade do fluido; viscosidade; diâmetro, são utilizados para determinar o regime de escoamento do fluido. Podendo ser laminar ou turbulento. Para que um fluido seja classificado com comportamento laminar, o mesmo deve obedecer ao número de Reynolds, o qual é dado pela seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (3.1)$$

onde: ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), v é a velocidade do fluido (m/s), D é o diâmetro do tubo (m) e por fim, μ é a viscosidade dinâmica do fluido. Na Tabela 3 são apresentados os resultados para o cálculo do número de Reynolds para alguns valores da faixa de velocidade utilizada nas simulações.

Tabela 3 – Número de Reynolds

v (m/s)	Re
0,0100	199,0443
0,0142	282,6429
0,0810	360,2702
0,0223	443,8688
0,0275	547,3718

Conforme pode ser observado, o máximo número de Reynolds presente na estrutura é 547,3718. Esse número é bem menor que o número limite que caracteriza o regime laminar, que é de 2000. Portanto, a existência de turbulência no fluido pode ser desprezada [24].

Como não há turbulência no escoamento, o que pôde ser comprovado pelas simulações, o regime de escoamento para toda a faixa estabelecida para o experimento é laminar. Isso proporciona que possa ser usado apenas um sensor para realizar a medição de vazão, visto que não ocorrerá outro regime de escoamento e assim não existirá velocidade em outra direção.

No capítulo seguinte será discutido a teoria sobre os sensores termo-resistivos e como a temperatura do fluido é compensada de forma a não influenciar nas medições. Sendo determinado o modelo matemático que representa a velocidade do fluido.

4 Sensores termo-resistivos

4.1 Caracterização dos sensores termo-resistivos

Os sensores termo-resistivos devem ser caracterizados em processos estáticos e dinâmicos para que, assim, sejam conhecidos valores de suas constantes e de seus parâmetros. Estes parâmetros são utilizados para a determinação de pontos de operação e tempo de resposta do sensor [4].

4.1.1 Caracterização estática

A caracterização estática dos sensores termo-resistivos, em nosso caso nos metálicos, é realizada através da variação de temperatura em um ensaio térmico, que consiste em variar a temperatura do meio ao qual o sensor está envolvido. Para isso usa-se uma estufa e realiza-se o monitoramento da temperatura T_s e da resistência elétrica do sensor R_s . Os valores podem ser coletados através de um microcontrolador, um multímetro com interface de leitura de dados ou um DAQ (*Data acquisition*). Esses equipamentos devem possuir uma boa resolução de conversão A/D, pois o sinal adquirido possui variação em centenas de milivolt. Nesse trabalho foi utilizado um sistema de aquisição de dados (DAQ NI USB-6212, da *National Instruments*) e uma interface em LabView para o monitoramento da caracterização estática. A temperatura foi variada de 20 °C até 60 °C e os valores de resistência foram coletados. Um esquema da montagem para a caracterização estática é visto na Figura 13, a seguir:

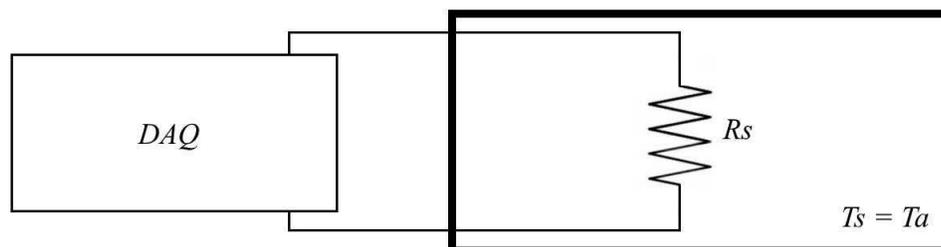


Figura 13 – Representação da estufa para caracterização estática

A caracterização estática foi realizada e com o resultado foi obtido a característica $R_s \times T_s$ do sensor termo-resistivo. Essa característica é observada na Figura 14, a seguir.

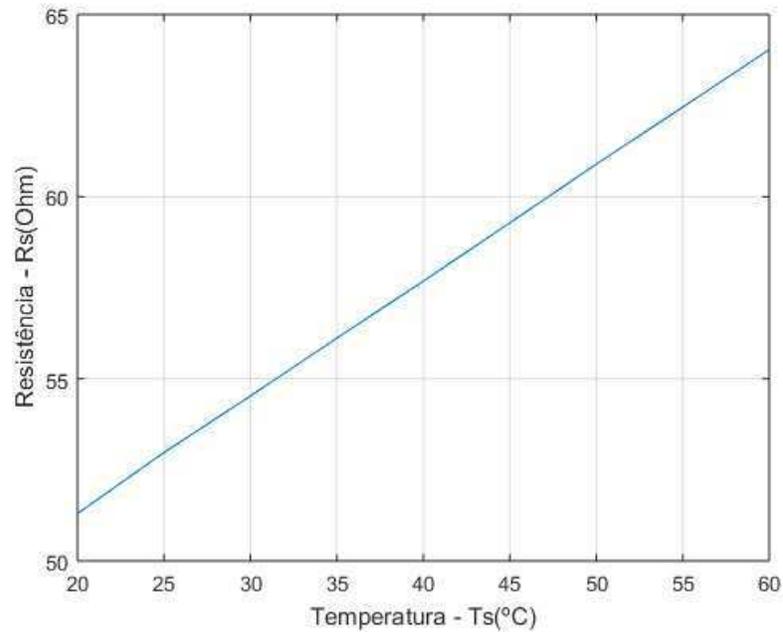


Figura 14 – Característica $R_s \times T_s$ do sensor termo-resistivo

Através do ensaio na estufa pode-se determinar a equação que descreve o comportamento do sensor termo-resistivo. Os valores de R_0 e β foram obtidos e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores da caracterização do sensor termo-resistivo

R_0	44,9920 Ω
β	0,00706 $^{\circ}\text{C}^{-1}$

O valor encontrado para R_0 é bem próximo do valor informado pelo fabricante do sensor que pode ser visto na Tabela 2, sendo seu valor de 45Ω .

4.1.2 Caracterização dinâmica

A caracterização dinâmica tem como finalidade determinar a constante de tempo dos sensores termo-resistivos. Se a temperatura ambiente for constante e a radiação sobre o sensor for nula podemos determinar a constante de tempo de acordo com a equação 4.1.[4]

$$\tau = \frac{mc}{hS} \quad (4.1)$$

O processo de caracterização dinâmica pode ser realizado de forma analítica ou de forma experimental. Em geral a forma analítica é uma forma mais difícil de se obter a constante em virtude de algumas características dos sensores termo-resistivos serem de difícil conhecimento. Assim, a forma experimental é mais empregada para encontrar os parâmetros.

O sensor termo-resistivo utilizado neste trabalho possui baixa constante de tempo da ordem de 0,01 ms. A caracterização dinâmica não foi realizada neste trabalho.

4.1.3 Estimação dos parâmetros

Para determinar os parâmetros a , b e n utiliza-se a Primeira Lei da Termodinâmica (equação 2.7). É necessário durante o procedimento de caracterização para determinação dos parâmetros acompanhar a potência elétrica entregue ao sensor, através da tensão elétrica sobre o sensor termo-resistivo e a corrente elétrica que o atravessa. Existem algumas montagens experimentais que são utilizadas para esse acompanhamento. Para esse procedimento utiliza-se a equação 2.13. Inicialmente deve-se fazer com que o fluido tenha velocidade nula ($v = 0 \text{ cm/s}$), dessa forma, como não há velocidade a equação será reduzida como demonstrada a seguir:

$$a = \frac{P_e}{S(T_s - T_a)} \quad (4.2)$$

Com o valor de a determinado deve-se fazer com que o fluido agora possua uma velocidade controlada. Para facilitar o cálculo desse parâmetro (b) utiliza-se um valor de velocidade bem determinado, de forma a estabelecer uma equação apenas relacionada com o parâmetro a ser descoberto. Com isso, deve ajustar a velocidade do fluido a 1 m/s .

$$b = \frac{P_e}{S(T_s - T_a)} - a \quad (4.3)$$

Ao determinar-se os parâmetro a e b , resta determinar o último parâmetro da equação de King, o parâmetro n . Para determinar esse parâmetro utiliza-se o mesmo princípio utilizado para a determinação dos outros parâmetros. Utilizamos um valor de velocidade de fluido. Porém, sem a necessidade de valores especiais. Assim, utiliza-se um valor qualquer de velocidade do fluido ($v = v\text{ m/s}$) [19].

$$v^n = \frac{P_e}{S b (T_s - T_a)} - \frac{a}{b} \quad (4.4)$$

Os valores encontrados podem sofrer algumas variações devido as incertezas que podem surgir de outras grandezas.

Parâmetros a , b e n

Como mencionado anteriormente, uma etapa fundamental da técnica de anemometria a fio ou filme quente, é a estimação dos dos parâmetros da Lei de King (parâmetros a , b e n). Podemos utilizar a própria estrutura de testes para, através de ensaios, estimar os valores dos parâmetros. Em alguns trabalhos os parâmetros são encontrados através da aplicação de velocidades conhecidas. No caso, $v = 0\text{ m/s}$, para determinar o valor do parâmetro a , $v = 1\text{ m/s}$, para determinar o valor de b e $v = v\text{ m/s}$, para determinar o valor de n . Porém, essa técnica utiliza apenas três pontos de operação o que pode ocasionar uma estimação dos valores inadequada.

Nesse trabalho foi realizado o seguinte procedimento para determinar os parâmetros da Lei de King. A plataforma de testes foi ajustada para diversos valores de velocidade do fluido, cada qual

correspondente a um valor de vazão da estrutura. Foram realizadas leituras dos valores de tensão de saída (V_o) para todas as velocidades de testes, utilizando os valores das tensões (V_o) calculou-se os respectivos valores do coeficiente de transferência de calor (h). Com os valores de velocidade (v) e dos coeficientes de transferência de calor (h) calculados para toda a faixa de uso da plataforma de testes pode-se utilizar algum método para identificação ou ajuste de parâmetros baseado no método dos mínimos quadrados. Assim, foi utilizado o método de Levenberg-Marquardt, o qual é um método de mínimos quadrados utilizado em aplicações não lineares. Com a utilização adequada desse método pode-se determinar os parâmetros da Lei de King.

Os parâmetros a , b e n , são apresentados na Tabela 5, apresentada a seguir.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros a e b e n

Parâmetro	Valor
a	$47488,99 \frac{W}{^{\circ}C \cdot m^2}$
b	$59496,49 \frac{W}{^{\circ}C \cdot m^2}$
n	0,3515

4.2 Aplicações de sensores termo-resistivos

Os sensores termo-resistivos são empregados em diversas áreas, principalmente aplicados na medição de temperatura, velocidade de fluidos e radiação. Eles são empregados em ambientes industriais, hospitalares, e até em ambientes domésticos. Para a medição de temperatura se torna necessário conhecer a característica resistência do sensor X temperatura, assim pode-se determinar a temperatura de um ambiente através do seu uso. Os sensores termo-resistivos também podem ser utilizados para medir velocidade de fluidos e, assim, determinar a vazão do fluido em um sistema. Para isso, utiliza-se o coeficiente de transferência de calor h .

Uma característica que faz com que os anemômetros a filme ou fio quente sejam bastante difundidos no uso da medição de velocidade de fluidos é a sua pequena dimensão, fazendo com que não ocorra grande perturbação na medição da velocidade de um fluido.

4.2.1 Modos de operação

A medição de velocidade de um fluido é alcançada devido o coeficiente de transferência de calor (h). Quando um fluido percorre o sensor termo-resistivo ocorre uma perda de energia térmica. O coeficiente de transferência de calor (h) é expresso por equações que se relacionam com a velocidade do fluido. Dessa forma, a energia perdida pelo sensor é utilizada para o cálculo da velocidade do fluido. Existem alguns modos de operação para a medição de velocidade de fluidos, todos baseados na Lei de King.

- Tensão constante (CVA - *Constant Voltage Anemometer*): a tensão sobre o sensor é mantida constante. O CVA proporciona resposta em alta frequência e baixo ruído, geralmente é utilizado para sistemas turbulentos.
- Corrente contante (CCA - *Constant Current Anemometer*): a corrente sobre o resistor é mantida constante. Dessa forma uma mudança na velocidade do fluido causa alteração da resistência do sensor R_s .
- Temperatura constante (CTA - *Constant Temperature Anemometer*): a resistência do sensor é mantida constante, sendo utilizado um circuito de realimentação que ajusta valores da corrente sobre o sensor de forma a manter a temperatura do sensor constante e consequentemente a sua resistência.

Neste trabalho é utilizado o modo de operação a temperatura constante (CTA). Esse modo de operação apresenta ótima resposta em frequência comparado aos outros dois modos de operação e possui como outra vantagem a não variação da temperatura do sensor, o que faz com que o termo variante no tempo relacionado a temperatura do sensor observado na Primeira Lei da Termodinâmica (equação 2.7) seja desconsiderado tornando o desenvolvimento matemático mais simples.

4.3 Modo de operação à temperatura constante (CTA)

Nesse modo de operação a temperatura sobre o sensor termo-resistivo é mantida constante o que acarreta que a sua resistência também será constante. Assim, a potência sobre o sensor pode ser dada por:

$$P_e = R_s \cdot I_s^2 = \frac{V_s^2}{R_s} \quad (4.5)$$

Substituindo a potência elétrica do sensor na equação 2.7 (Lei da Termodinâmica) e sabendo que a temperatura sobre o sensor é constante na condição de equilíbrio ($\frac{dT_s}{dt} = 0$). A tensão sobre o sensor será dada pela equação 4.6.

$$V_s^2 = R_s \cdot h \cdot S \cdot (T_s - T_a) - R_s \cdot \alpha \cdot S \cdot H \quad (4.6)$$

Um exemplo de circuito que pode ser utilizado para a compensação da temperatura do fluido, modo temperatura constante, é apresentado a seguir na Figura 15.

Observa-se que o sensor termo-resistivo é conectado na entrada inversora do amplificador operacional, isso ocorre por causa do tipo de sensor utilizado. Os sensores do tipo metálico e do tipo PTC (*Positive Temperature Coefficient*) são conectados ao terminal da entrada inversora, enquanto os sensores NTC (*Negative Temperature Coefficient*) devem ser conectados ao terminal da entrada não-inversora. Isso ocorre por causa do tipo de resposta desses sensores, sensores que aumentam a resistência com a temperatura são conectados na entrada inversora e sensores que diminuem a resistência com a temperatura são conectados a entrada não-inversora.

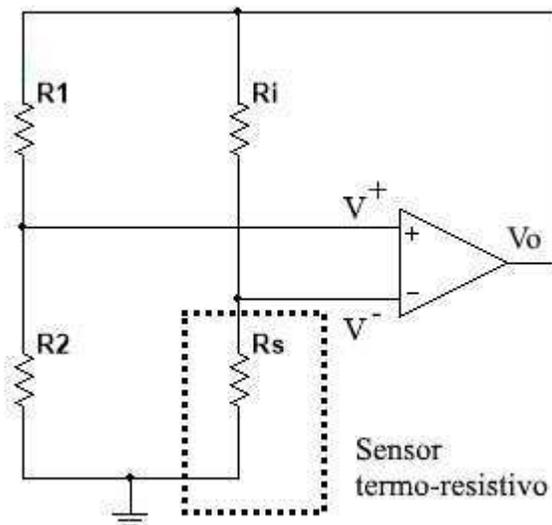


Figura 15 – Representação do circuito de medição com sensor termo-resistivo

4.4 Compensação da temperatura do fluido

Em sistemas anemométricos a velocidade relativa entre o fluido e o sensor aquecido é dependente do coeficiente de transferência de calor (h). A energia perdida para o meio pode ser utilizada, então, para se determinar a velocidade do fluido. Ao utilizar-se anemômetros baseados no princípio da troca de calor torna-se necessário estabelecer um circuito capaz de compensar a influência da temperatura do fluido, pois (h) depende tanto da velocidade do fluido como da temperatura ambiente. Se a compensação não for realizada as medições efetuadas estarão influenciadas por essa variação da temperatura do fluido, logo as medidas realizadas estarão sobre influência de erros.

Na literatura há diversas aplicações para realizar a compensação da temperatura do fluido, como: anemômetro com duas fontes de corrente; anemômetro com dois sensores na ponte; anemômetro com sensor único.

Neste trabalho foi utilizado o circuito com dois sensores na ponte. Tal circuito foi utilizado pelas características de confecção do elemento sensor, como descrito no capítulo 2. O sensor termo-resistivo de fabricação do IST possui um elemento aquecedor, o qual estará relacionado com a troca de energia térmica com o meio e um outro elemento que é utilizado para compensar a temperatura do fluido. Esse tipo de circuito com dois sensores na ponte foi proposto por Lomas

(1986). O circuito possui os dois sensores conectados na Ponte de Wheatstone, porém em lados opostos [25]. O circuito pode ser visto na Figura 16, a seguir.

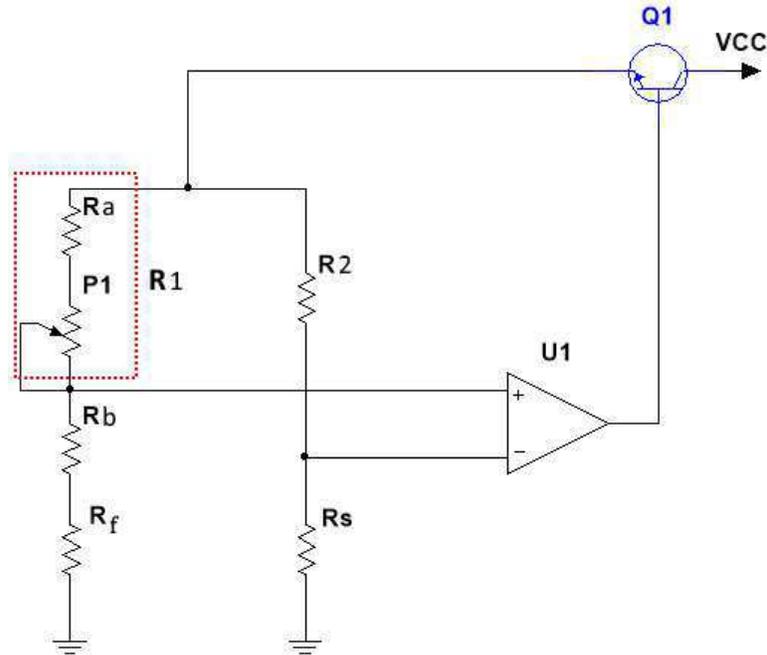


Figura 16 – Circuito de compensação da temperatura do fluido

Para a demonstração da compensação da temperatura do fluido admite-se que os coeficientes de temperatura de R_s e R_f são iguais. Assim, teremos:

$$T_f = \frac{1}{\beta} \left(\frac{R_f}{R_{0-f}} - 1 \right) \quad (4.7)$$

e

$$T_s = \frac{1}{\beta} \left(\frac{R_s}{R_{0-s}} - 1 \right) \quad (4.8)$$

Utilizando a equação 2.12, podemos determinar como a velocidade do fluido se comportará em relação as outras grandezas. Tal equação é repetida aqui por conveniência.

$$P_e = h \cdot S \cdot (T_s - T_f) \quad (4.9)$$

Substituindo a potência elétrica sobre o sensor e as temperaturas do sensor e do fluido, teremos:

$$R_s \cdot I_s^2 = h \cdot S \cdot \left(\frac{1}{\beta} \left(\frac{R_s}{R_{0-s}} - 1 \right) - \frac{1}{\beta} \left(\frac{R_f}{R_{0-f}} - 1 \right) \right) \quad (4.10)$$

onde: R_{0-s} e R_{0-f} são resistências a 0º C.

Reorganizando a equação 4.10 e para a condição de equilíbrio da ponte $R_f = R_s \frac{R_1}{R_2} - R_b$, temos:

$$I_s^2 = \frac{1}{R_{0-s}\beta} \left(1 - \frac{R_{0-s} \cdot R_1}{R_{0-f} \cdot R_2} + \frac{R_{0-s} \cdot R_b}{R_{0-f} \cdot R_s} \right) h \cdot S \quad (4.11)$$

O resistor R_b é utilizado para gerar o sobreaquecimento necessário sobre o sensor R_s .

Como o sensor possui o mesmo coeficiente de temperatura e as resistências de R_s e R_f são diferentes à 0 ºC. O sinal de saída não dependerá da velocidade do fluido. Nesse tipo de configuração a sensibilidade está relacionada diretamente com a proximidade dos valores de R_1 e R_s , pois quanto mais próxima a resistência de operação a variação da tensão de saída responderá às variações de R_s [19].

A partir da equação 4.11, podemos determinar uma equação para determinar a velocidade do fluido, sabendo que:

$$I_s^2 = \frac{V_o}{R_s + R_2} \quad (4.12)$$

e

$$h = a + b \cdot v^n \quad (4.13)$$

Assim, substituindo as equações 4.12 e 4.13 na equação 4.11, determina-se a equação 4.14 para o cálculo da velocidade do fluido a partir da tensão de realimentação da Ponte de Wheatstone (V_o), tensão dividida pelo braço da Ponte de Wheatstone onde está localizado o sensor termo-resistivo.

$$v = \left(\frac{V_o^2}{S \cdot b \cdot \frac{(R_s + R_2)^2}{\beta \cdot R_{0-s}} \cdot \left[1 - \frac{R_1 \cdot R_{0-s}}{R_2 \cdot R_{0-f}} + \frac{R_{0-s} \cdot R_b}{R_{0-f} \cdot R_s} \right]} - \frac{a}{b} \right)^{1/n} \quad (4.14)$$

No próximo capítulo é descrita a plataforma de testes, identificando os elementos que a compõe e apresentando as características de funcionamento de cada um dos seus elementos formadores. Ainda no próximo capítulo são apresentados resultados experimentais de forma a apresentar a técnica anemométrica como adequada a medição na faixa da submedição.

5 Plataforma de testes

No capítulo três foram apresentadas as simulações realizadas no COMSOL a fim de avaliar o comportamento térmico visto pela anemometria, pois as simulações comprovam que o elemento aquecido perde calor para o meio fluido. Sendo, assim é válida a possibilidade de efetuar a medição de vazão a partir da verificação da velocidade presente em um anemômetro a fio ou filme quente.

Neste capítulo é descrita a plataforma de testes. Os componentes usados, a estrutura e como foi realizada a montagem da plataforma são descritos a seguir.

5.1 Plataforma de testes

O fluxo do fluido deve ser mantido a uma velocidade constante durante os intervalos de tempo dos testes. Para que isso seja possível é necessário possuir uma plataforma de testes que possibilite tal condição para esses experimentos. Sendo assim, a plataforma de testes é constituída por um recipiente de vidro, que foi utilizado como reservatório de água, uma tubulação de PVC (*Polyvinyl Chloride*), a qual transporta o fluido em um percurso, retornando ao reservatório em descarga para não acarretar maior resistência no transporte do líquido. O sistema propulsor da plataforma é uma bomba de água submersa, conhecida como bomba porão, mostrada na Figura 17. Essa bomba porão deve ser alimentada por uma fonte de corrente contínua. As informações detalhadas referentes à bomba se encontram no Anexo. Para esse trabalho a bomba porão foi alimentada com um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) proveniente de ajustes em uma interface concebida no ambiente LabView.

A plataforma é constituída também por algumas junções que propiciam as ligações adequadas entre os tubos de PVC e o sensor de efeito Hall, que é o sensor utilizado como referência. Na Figura 18 pode-se visualizar esse sensor de referência, o qual é responsável por determinar qual é a vazão que o fluido está percorrendo a tubulação.

O sensor de referência relaciona a frequência de um sinal quadrado com a vazão de forma linear. Na Figura 19 é apresentado o sinal quadrado referente ao sensor de efeito Hall. O sinal



Figura 17 – Imagem da bomba de porão.



Figura 18 – Imagem do sensor de efeito Hall utilizado como referência para os testes de vazão.

quadrado possui aproximadamente 19 Hz de frequência.

Este valor de frequência, por sua vez, está diretamente relacionado com a vazão do fluido através do sensor de referência, e conseqüentemente com a vazão através do braço da plataforma onde está o sensor termo-resistivo.

A aquisição das amostras do teste foi realizada com o auxílio do NI USB-6212 da *National Instruments*, que é apresentado na Figura 20. Esse dispositivo de aquisição (DAQ) de dados, apresentado na Figura 20, possui as seguintes características: 400 kS/s; 16 entradas analógicas; 4 entradas digitais; 4 saídas digitais; alimentação por barramento USB e compatibilidade com o LabVIEW. A interface utilizada para acompanhamento do experimento pode ser observada na Figura 21.

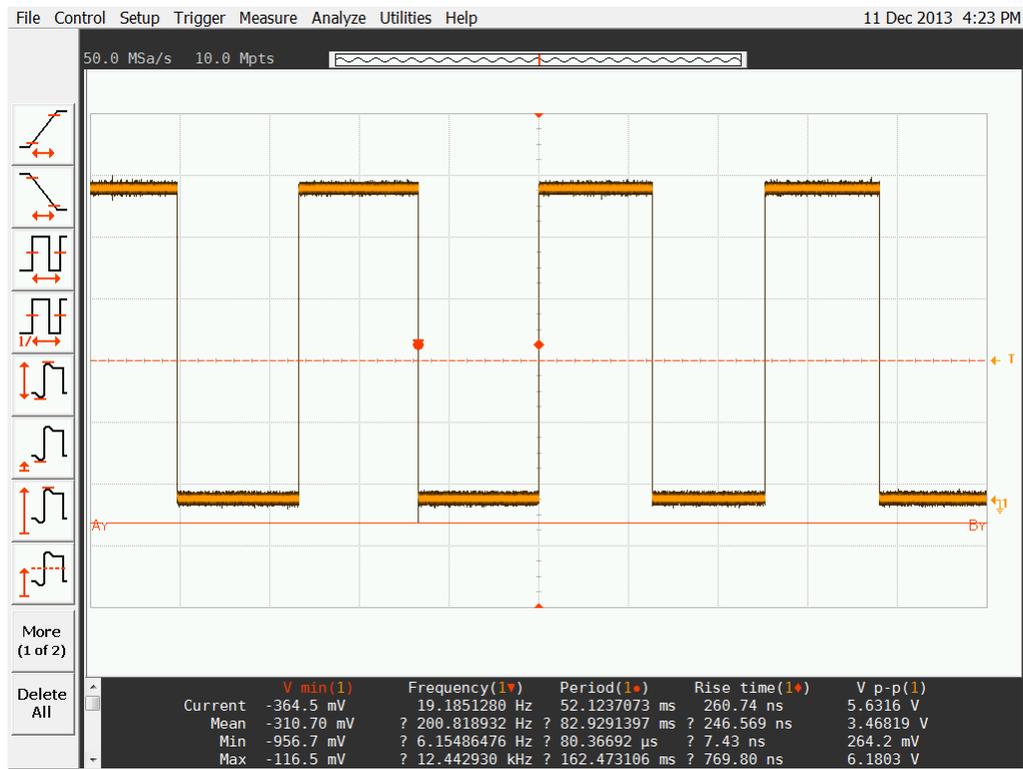


Figura 19 – Sinal quadrado do sensor referência.



Figura 20 – Imagem do dispositivo de aquisição de dados - NI USB-6212

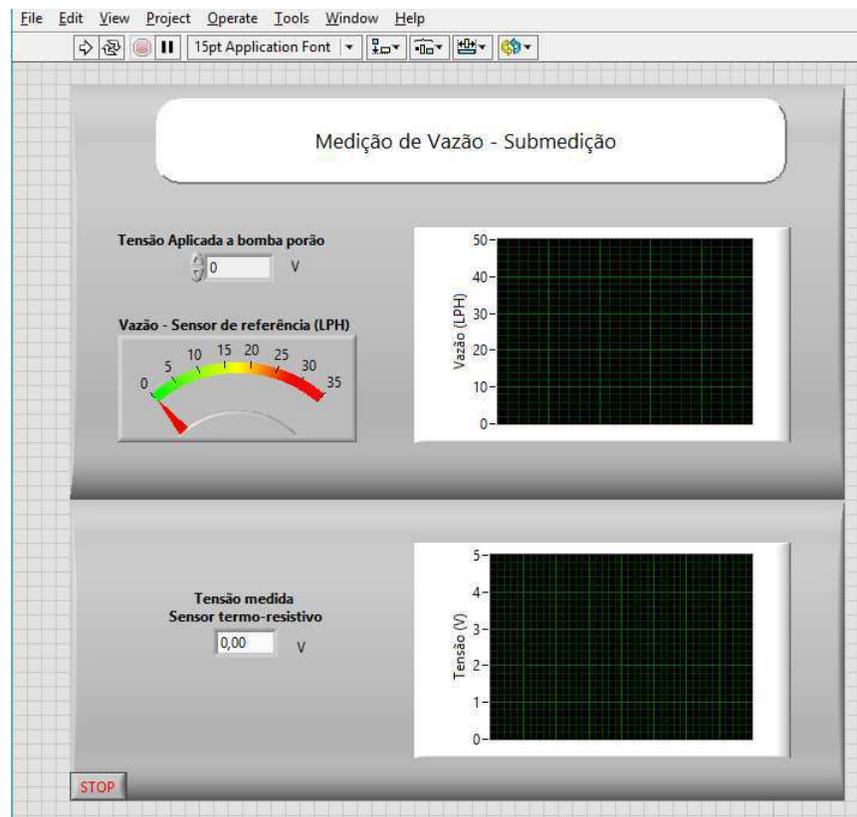


Figura 21 – Interface para acompanhamento do experimento.

A bomba de porão foi alimentada através de um sinal PWM, para que pudesse controlar assim a vazão na estrutura. Os valores de PWM foram mantidos constantes durante um determinado intervalo de tempo, de modo a ser possível adquirir uma quantidade significativa de amostras. Na Figura 22 pode-se observar a variação do PWM aplicado a bomba de porão.

Os experimentos foram realizados no LIEC (Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle) pertencente ao DEE/UFCG (Departamento de Engenharia Elétrica/Universidade Federal de Campina Grande). Para a realização dos experimentos foi utilizado o diagrama apresentado na Figura 23.

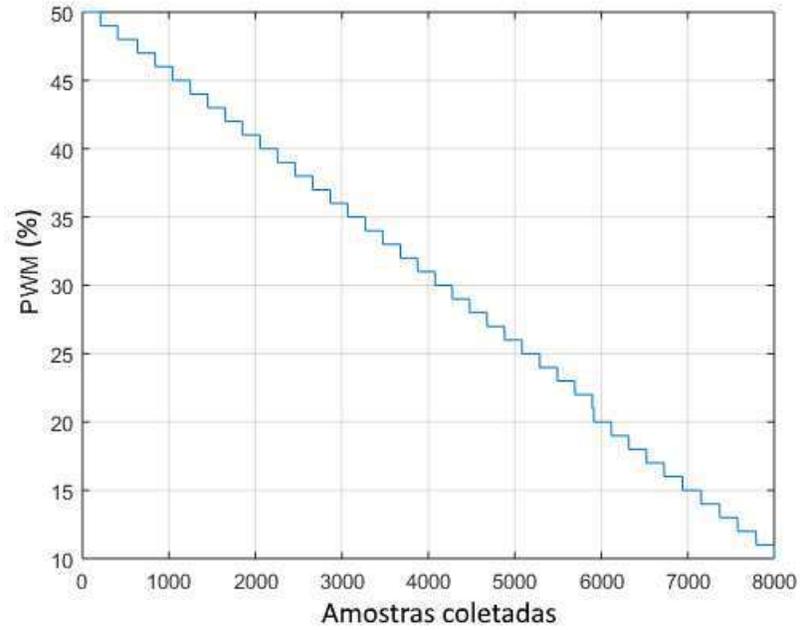


Figura 22 – PWM aplicado a bomba de porão.

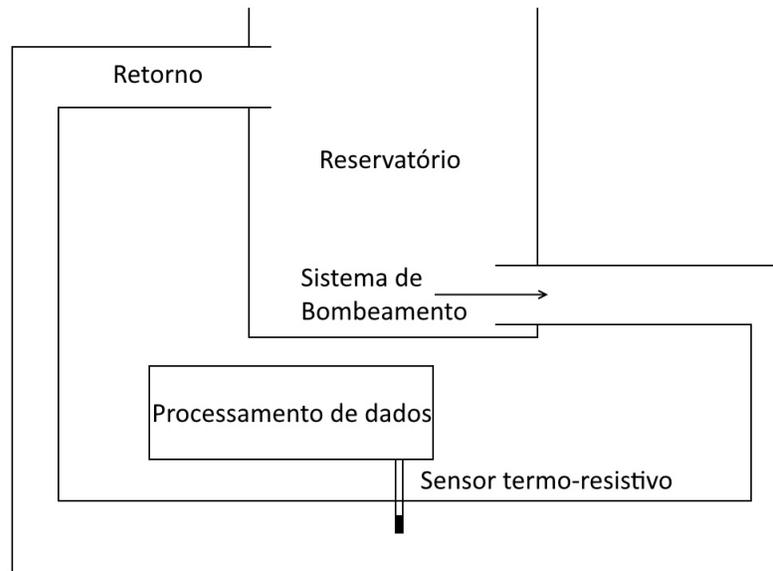


Figura 23 – Estrutura para medição de vazão.

Na Figura 24, é apresentada uma fotografia identificando algumas das partes constituintes da plataforma.

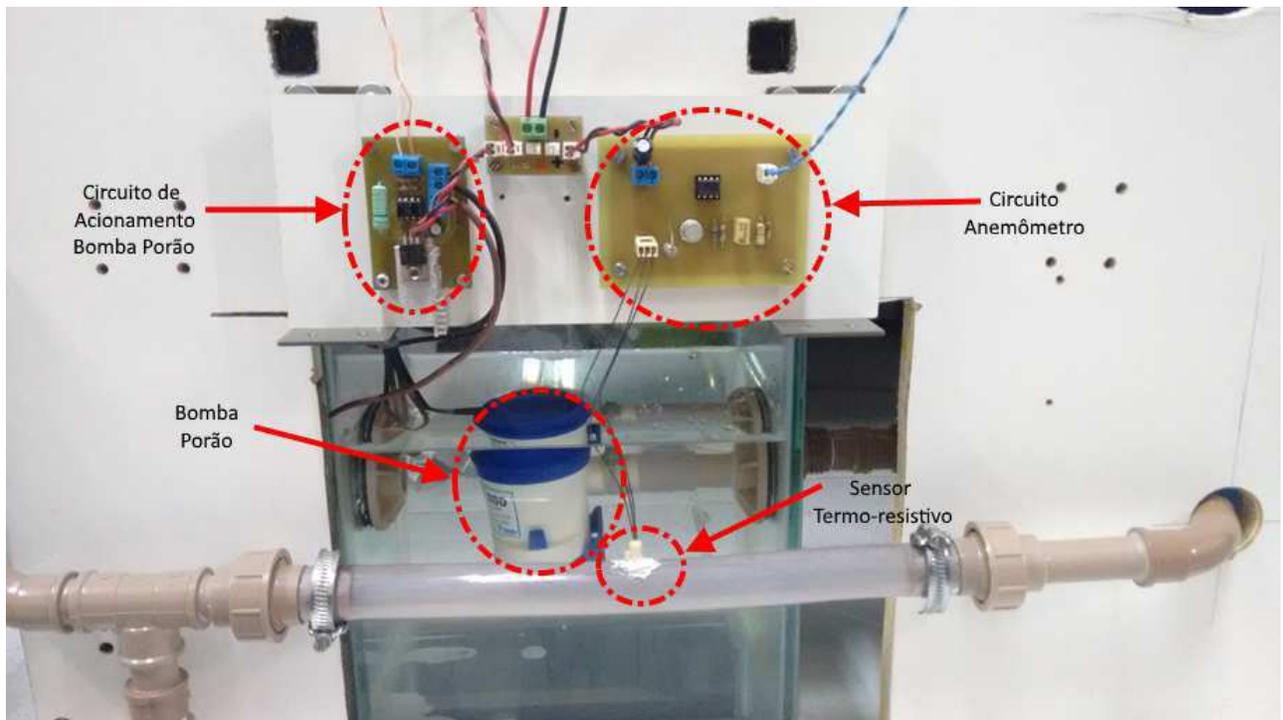


Figura 24 – Plataforma de testes

5.2 Resultados experimentais

Neste capítulo são mostrados os resultados experimentais dos testes realizados na plataforma. Os valores de velocidade podem ser calculados de acordo com os parâmetros do circuito. Como dito anteriormente os valores de tensão sobre o sensor e na saída do circuito foram adquiridos através de uma interface criada no LabView com o apoio de um DAQ (dispositivo de aquisição de dados).

A partir da configuração apresentada na Figura 23 foram realizados os testes, em que foi variada a tensão de alimentação da bomba porão, e conseqüentemente, foi variada a velocidade do fluido.

A partir da aplicação de cada nível de tensão é possível verificar o comportamento da velocidade do fluido a partir da tensão de realimentação da Ponte de Wheatstone, a qual o sensor está localizado. Os valores da tensão de saída são apresentados na Tabela 6, para vazões de até 30 l/h.

Tabela 6 – Tensões de saída

$V_0(V)$	Vazão (l/h)
2,8700	0
3,0162	4,68
3,0920	9,99
3,1199	13,63
3,1394	16,47
3,1529	18,92
3,1640	20,99
3,1789	22,85
3,1986	25,35
3,2072	26,72
3,2213	28,50
3,2280	30,13

Com os dados da tensão de saída pode-se determinar o comportamento dessa tensão com a vazão do sistema hídrico.

Na Figura 25 tem-se o gráfico da tensão de saída X vazão. O sistema proposto possui sensibilidade para pequenas vazões, sendo possível empregá-lo como alternativa nas medições de água. Fazendo com que o consumo possa ser tarifado em uma faixa maior de valores, o que também acarretaria a diminuição do desperdício de água.

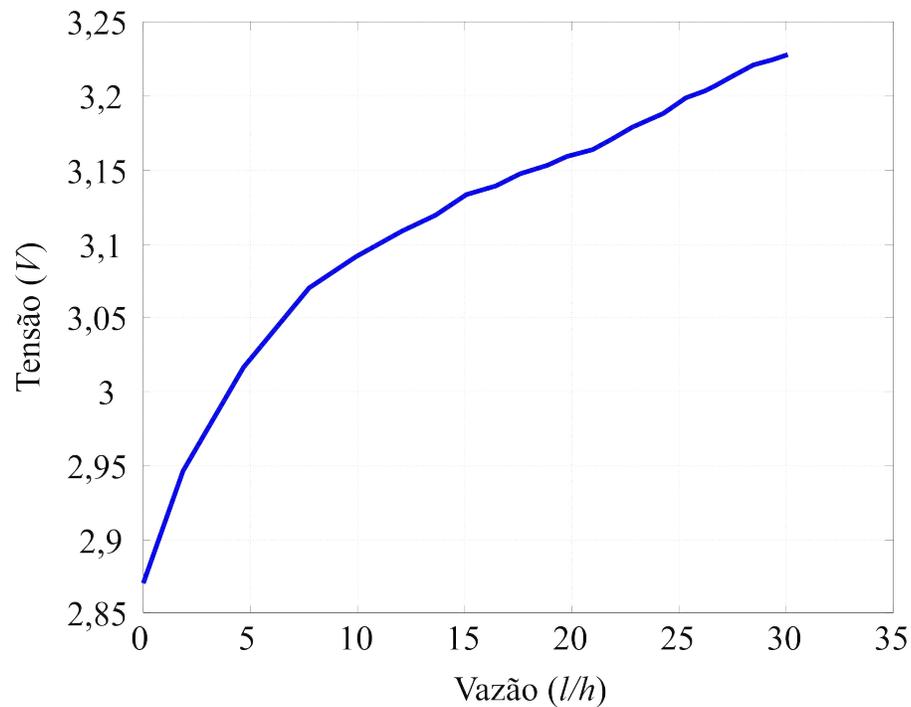


Figura 25 – Gráfico da tensão de saída (Tensão sobre a Ponte de Wheatstone) em função da vazão.

Ao observar a Figura 25 verifica-se que a vazão determinada a partir dos testes experimentais apresenta um crescimento suave, e que o *MEMS* sendo utilizado como anemômetro a filme quente possui condições de estabelecer leituras de valores reduzidos de velocidade e por consequência a vazão, possibilitando ser usado para a medição de pequenas vazões que podem ser empregadas em diversas áreas, como: medicina; submedição de água; sistemas ambientais, etc.

Na Tabela 7 é apresentado o cálculo da vazão do fluido e o erro referente para as medições.

Tabela 7 – Vazão calculada e erro percentual.

Vazão do Fluido (l/h) - Sensor aquecido	Vazão do Fluido (l/h) - Sensor referência	Tensão de saída (V)	erro (%)
1,76	1,88	2,9471	6,26
4,73	4,68	3,0162	1,00
8,66	7,80	3,0710	11,00
10,63	9,99	3,0920	6,44
12,47	12,13	3,1094	2,80
13,68	13,63	3,1199	0,36
15,34	15,09	3,1332	1,60
16,14	16,47	3,1394	1,98
17,21	17,61	3,1473	2,20
18,02	18,92	3,1529	4,79
18,92	19,81	3,1591	4,48
19,65	20,99	3,1640	6,38
20,76	21,90	3,1711	5,22
22,02	22,85	3,1789	3,64
23,66	24,30	3,1886	2,61
25,43	25,35	3,1986	0,30
26,34	26,24	3,2035	0,39
27,04	26,72	3,2072	1,20
28,14	27,48	3,2129	2,39
29,82	28,50	3,2213	4,61
30,60	29,36	3,2251	4,22
31,20	30,14	3,2280	3,54

O sensor possui boa sensibilidade na faixa de atuação que corresponde a submedição de água. Porém, testes mais minuciosos devem ser realizados para que a faixa de operação do sensor possa ser expandida. Para isso, torna-se necessário um sistema microfluídico que possa garantir

pequenos valores de vazão (menores que 30 l/h , que é a vazão de transição da maioria dos hidrômetros empregados pelas empresas de distribuição de água) e utilizar sensores de referência que apresentem uma faixa de operação maior e alcançando vazões mais baixas.

6 Conclusões e perspectivas

Nesse trabalho foi desenvolvido um sistema de medição de vazão seguindo os princípios da anemometria térmica. Foram realizadas simulações no COMSOL Multiphysics® para avaliar a influência da posição do sensor. Com os resultados da simulação observou-se que o regime é laminar o que acarreta o uso de um sensor, proporcionando uma estrutura mais simples de testes.

Na medição de vazão, estudos apontam que uma parcela dos fluidos é perdida devido a equipamentos que apresentam baixa sensibilidade. Os anemômetros aplicados a medição de velocidade ou vazão são capazes de verificar valores mínimos de variação de velocidade ou mesmo o consumo de determinado fluido. Podendo ser aplicados desde a detecção da velocidade como a detecção de regime turbulento.

Os erros encontrados podem ser reduzidos ao se fazer uma calibração mais minuciosa dos elementos sensores. O estudo de equipamentos que possam ser sensíveis a uma grande faixa de operação pode acarretar problemas. Por isso, os medidores devem ser dedicados a valores restritos de faixa de operação, pois assim é possível adequar o material de fabricação dos medidores ao valor específico de operação ao qual quer submeter um sistema.

Com os resultados obtidos nota-se que a técnica utilizada se torna adequada para a medição da submedição dos hidrômetros velocimétricos utilizados em larga escala para a tarifação do consumo de água em estabelecimentos residenciais, comerciais e industriais. Alcançando uma faixa de medição que os medidores velocimétricos convencionais (hidrômetros) incorporam grandes erros, pois os hidrômetros nessa região de medição não possui capacidade de vencer a inércia do sistema mecânico de modo a movimentar seus mecanismos responsáveis para realizar a leitura do consumo de água. Esses erros podem ser maiores que 100%. Considerando a submedição como um dos fatores mais importantes no que diz respeito as perdas aparentes de água potável, torna-se necessário estabelecer confiança nos valores medidos e assim reduzir significativamente as perdas do sistema.

A plataforma de testes se mostrou eficiente para a faixa de medição a qual foi submetida. Os valores obtidos são de ordem baixa, evidenciando uma melhor análise da eletrônica utilizada nos testes e também a estrutura física e disposição dos elementos sensores e aquecedores. Existem, ainda, várias características que podem ser estudadas sobre os anemômetros a fio e filme quente sendo utilizados para a medição de vazão. A seguir são dadas algumas sugestões de trabalhos que possam ser seguidos futuramente:

1. Utilizar mais sensores para a medição de vazão e observar o quanto a faixa de operação pode ser aumentada;
2. Avaliar simulações computacionais mais complexas;
3. Criar uma estrutura *MEMS* que possa ser usada em simulações computacionais e testá-la em diversas estruturas;
4. Realizar comparações sobre quais fluidos possuem melhor uso na medição de vazão utilizando sensores anemométricos;
5. Utilizar outros materiais na construção do tubo de testes, por exemplo vidro.
6. Realizar uma comparação sobre as técnicas de medição de velocidade de fluidos que empregam a transferência de calor para a determinação da velocidade ou da vazão.
7. Utilizar outros mecanismos para o controle da vazão.
8. Realizar a substituição do processamento feito em computador para um processamento realizado por um microcontrolador, desenvolvendo um sistema de medição adequado a hidrometria em regime de submedição, com a devida integração elétrica-mecânica como visto na Figura 26.

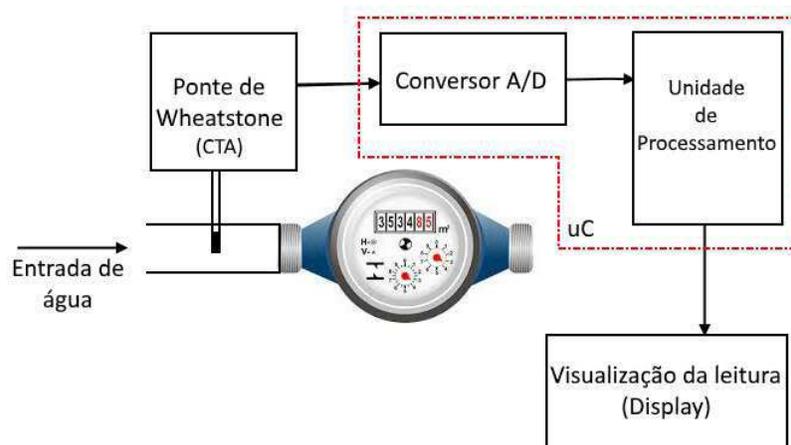


Figura 26 – Representação de uma solução para o desenvolvimento do medidor para a faixa de submedição.

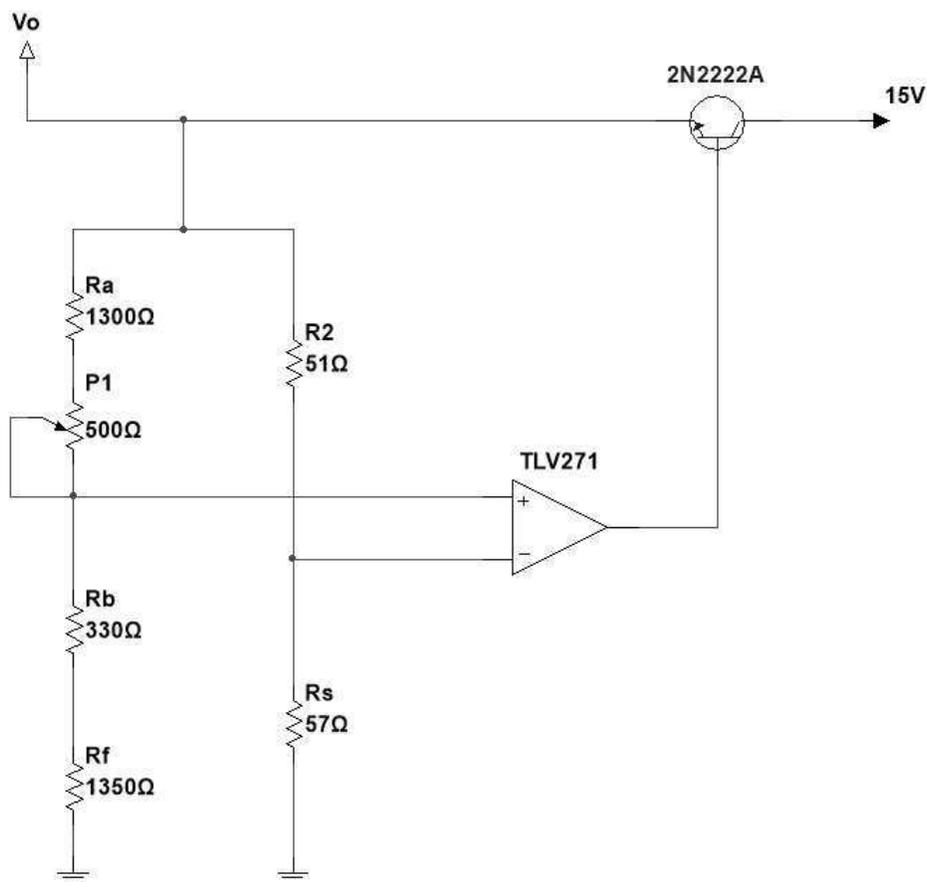
Referências

- [1] Pereira, L. G.; Oliveira Ilha, M. S. de. Avaliação da Submedição de Água em Edificações Residenciais Unifamiliares: o Caso das Unidades de Interesse Social Localizadas em Campinas, no Estado de São Paulo. *Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Revista on-line*, 8(2):7–21, abr./jun. 2008.
- [2] Schneider, P. S. Medição de velocidade e vazão de fluidos. *Apostila da disciplina de Medições Térmicas, Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre*, 2003 - Revisado: 2011-2.
- [3] Bjorklund, S.; Wadsö, L. A calorimetric method to determine water activity. *Review of Scientific Instruments*, pages 114903–1/114903–8, 2011.
- [4] Oliveira, A. *Sensores Termo-Resistivos em Configurações Realimentadas*. PhD thesis, UFPB, fevereiro 1997.
- [5] Nguyen, N. T.; Kiehnscherf, R. Low-cost silicon sensors for mass flow measurement of liquids and gases. *Sensors and Actuators A: Physical*, 49(1-2):17–20, 1995.
- [6] Petropoulos, A.; Kontakis, K.; Kaltas, G.; Gogolides, E. Evaluation of a Microfluidic Sensor Fabricated on Polymeric Material. *DTIP, Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of Mems/Moems*, pages 1–4, 2009.
- [7] Carvalho, T. M. Técnicas de Medição de Vazão por Meios Convencionais e não Convencionais. *RBGF - Revista Brasileira de Geografia Física*, pages 73–85, 2008.
- [8] Cassiolato, C.; Alves, E. O. Medição de vazão. *Smar - Automação Industrial*, 2008.
- [9] Dalola, S.; Cerimovic, S.; Kohl, F.; Beigelbeck, R.; Schalco, J.; Ferrari, V.; Marioli, D.; Keplinger, F.; Sauter, T. MEMS Thermal Flow Sensor With Smart Electronic Interface Circuit. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 12(12):3318–3328, dezembro 2012.
- [10] Nguyen, N. T. Micromachined Flow Sensors: a Review. *Flow Measurement and Instrumentation*, 8(1):7–16, 1997.
- [11] Cerimovic, S.; Talic, A.; Beigelbeck, R.; Sauter, T.; Kohl, F.; Schalco, J.; Keplinger, F. A Novel Calorimetric Flow Sensor Implementation Based on Thermal Sigma-Delta Modulation. *IEEE SENSORS 2009 Conference*, pages 1923–1926, 2009.
- [12] Barreto Neto, A. G. de S.; Sousa, C. A. de; Alves, C. L. G. de S.; Lima, A. M. N.; Neff, F. H. Medidor de Vazão pelo Princípio Calorimétrico: simulação e resultados experimentais. *IX Smetro*, pages 324–327, 2011.
- [13] Sanchez, J. G.; Motta, S. de A.; Alves, W. C. Estimativa de Volume de Água não Medido em Ligações Residenciais por Perda de Exatidão nos Hidrômetros, na Cidade de Juazeiro - BA. *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, (II - 051), 2000.

-
- [14] Ashauer, M.; Glosch, F.; Hedrich, F.; Hey, N.; Sandmaier, H.; Lang, W. Thermal Flow Sensor for Liquids and Gases. *MEMS 1998*, pages 351–355, 1998.
- [15] Sosna, C.; Buchner, R.; Lang, W. A Temperature Compensation Circuit for Thermal Flow Sensors Operated in Constant-Temperature-Difference Mode. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(6):1715–1721, June 2010.
- [16] Temam, R.; Chorin, A. Navier Stokes Equations: Theory and Numerical Analysis. *Journal of Applied Mechanics*, 45:456, 1978.
- [17] Langtangen, H. P.; Mardal, K. A.; Winther, R. Numerical Methods for Incompressible Viscous Flow. *Advances in Water Resources*, 25(8):1125–1146, 2002.
- [18] COMSOL Multiphysics®. 4-3 users guide, 2012.
- [19] Diniz, R. C. S. Considerações de Projeto para Anemômetros a Fio Quente baseado em Estruturas Realimentadas. Master's thesis, UFCG, 2003.
- [20] Ramesham, R. Fabrication of Diamond Microstructures for Microelectromechanical Systems (MEMS) by a Surface Micromachining Process. *Thin Solid Films*, (340):1–6, 1999.
- [21] Greve, A.; Olsen, J.; Privorotskaya, N.; Senesac, L.; Thundat, T.; King, W. P.; Boisen, A. Micro-Calorimetric Sensor for Vapor Phase Explosive Detection With Optimized Heat Profile. *IEEE SENSORS 2009 Conference*, pages 723–726, 2009.
- [22] Ji, H.; Huang, Z.; Wang, B.; Li, H. Measurement System for Characterization of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Micro-Channel. *I2MTC*, 2009.
- [23] Cavalcanti, T. C. M.; Rocha Neto, J. S. da; Lima, A. M. N. Princípio Calorimétrico Aplicado à Medição de Vazão. *International COMSOL Conference*, 2014.
- [24] Arregui, F.; Cabrera Jr, E.; Cobacho, R.; García-Serra, J. Key Factors Affecting Water Meter Accuracy. *IWA Leakage Conference*, 2005.
- [25] Lomas, C. G. *Fundamentals of hot wire anemometry*. 1986.

Anexos

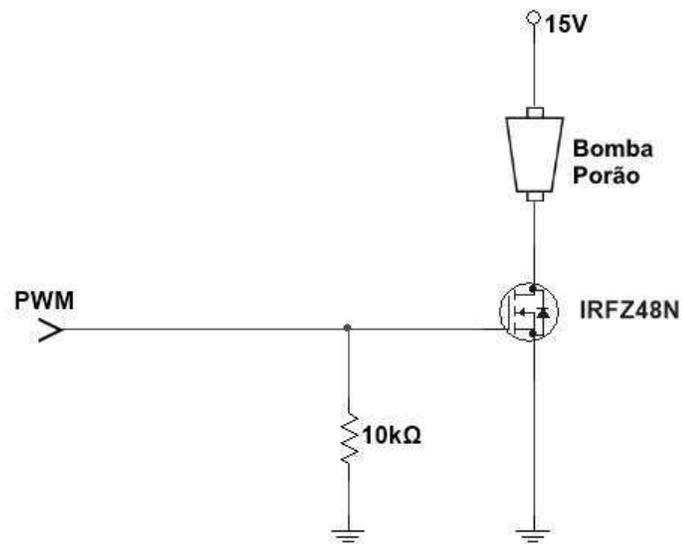
Circuito eletrônico utilizado para a compensação da temperatura do fluido e a medição da vazão do fluido



O circuito apresentado foi utilizado para a compensação da temperatura do fluido e para a aquisição de um sinal de tensão (V_o) através de um conversor A/D do DAQ NI-USB 6212. O valor de R_s é determinado pelo valor de R_b que é a resistência responsável pelo sobreaquecimento do aquecedor. R_f é a resistência do sensor responsável pela compensação da temperatura. Os valores de resistência nos braços da ponte apresentam uma relação de modo que a corrente elétrica que fluirá pelos componentes não influenciará o valor da resistência R_f , sendo assim, a corrente ou quase sua totalidade passará pelo braço da ponte onde está localizado o elemento aquecedor (R_s). O transistor 2N2222A é utilizado para amplificar a corrente elétrica que será realimentada no circuito da Ponte de Wheatstone.

Acionamento da bomba porão

O acionamento da bomba de porão foi realizado por um circuito contendo um mosfet. O sinal PWM proveniente do DAQ e controlado através da interface criada em LabView foi aplicado a um mosfet, como o mosfet possui baixa resistência de condução, praticamente toda a tensão foi aplicada sobre a bomba porão, possibilitando o seu controle para a realização dos testes em faixas de vazão ajustadas na interface LabView.



Data sheet - Bomba porão

MARINE PRODUCT DATA SHEET

OEM: 355-020-00 (380 GPH)
AFTERMARKET: 355-020-10 (380 GPH)

APPLICATION

12V Marine Bilge Water Evacuation

**PUMP**

Type: Centrifugal Pump
 Port: 3/4" Barb
 Liquid: 130 °F [54 °C] Max
 Prime: Flooded Inlet
 Run Dry: No

ELECTRICAL

Motor: 12VDC Permanent Magnet,
 Continuous Duty
 Protection: Need External Fuse (Not supplied)
 Leads: 3 ft [0.9M] Tinned, 16 AWG
 Fuse: 2.5 Amp Recommended
 Control: No Control

MATERIALS

Housing: ABS
 Impeller: High Strength Nylon
 Hardware: Stainless Steel

APPROVALS

Ignition Protected 8846, CE

WARRANTY

3 Year Limited Warranty. Contact SHURflo for details

SHIPPING

Net Weight (unboxed): 1.25 Lb [0.56 Kg] each
 Approx. Lbs./Ctn.: 30 Lb [13.6 Kg]
 Pumps in Carton: 24
 Carton Size: 24"L x 18"W x 11" H
 [61cm x 46 cm x 28 cm]

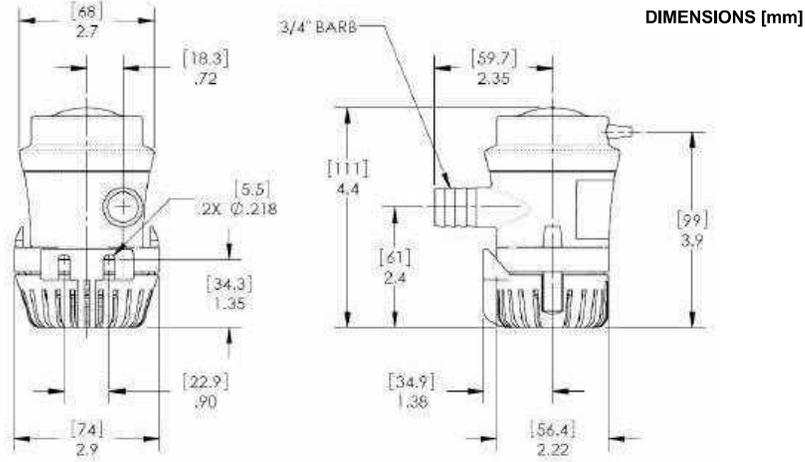
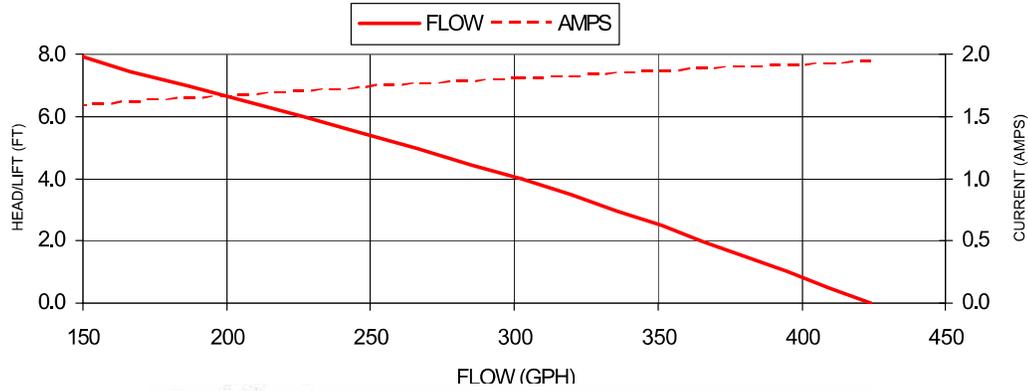
RELATED DOCUMENTS

Catalog: MS-030-140
 Installation Manual: 911-758
 Applications Spec Guide: MS-020-005



TYPICAL PERFORMANCE

PRESSURE		FLOW		CURRENT
METERS	FT OF HEAD	GPH	LPH	AMPS
0.0	0	424	1604	1.96
1.20	4	303	1146	1.82
2.40	8	147	556	1.60



Visit our Web Site at <http://www.shurflo.com>
 Shurflo reserves the right to update specifications,
 change prices, or make substitutions without notice.



SHURflo
 5900 Katella Avenue
 Cypress, CA 90630
 Phone (562) 795-5200
 Toll Free (800) 854-3218
 Fax (562) 795-7564

SHURflo East
 52748 Park Six Court
 Elkhart, IN 46514-5427
 Phone (562) 795-5200
 Toll Free (800) 854-3218
 Fax (574) 264-2169

SHURflo Europe, Middle East, Africa
Pentair Water Belgium bvba
 Industriepark Wolfstee, Toekomstlaan 30
 B-2200 Herentals, Belgium
 Phone +32-14-283500
 Fax +32-14-283505



Pentair Water
FLOW TECHNOLOGIES GROUP
 5900 Katella Ave, Cypress, CA 90630
 Phone (800) 854-3218 • (562) 795-5200 • Fax (562) 795-7564
www.shurflo.com