PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO TERMOGRÁFICO

THERMOGRAPHIC FLOW METER PROTOTYPE

QUIRINO, Jonatas Motta[1]
QUIRINO, Tiago Motta[2]

Resumo: A utilização de substâncias fluidas percorre uma grande quantidade de áreas dentro do campo de estudo da Engenharia Mecânica, sendo possível até mesmo detectar tal necessidade em outras áreas, como a medicina. Por tal utilização ser crescente em diversos estudos, gerou-se a necessidade da medição de grandezas relativas ao transporte de tais fluidos, como velocidade e vazão. Os medidores de vazão existentes no mercado, em sua maioria, possuem a limitação de promover a medição, contando com a necessidade de haver contato entre o fluido em escoamento e o elemento sensor do instrumento de medição, conhecida como intrusividade. A presente proposta prevê um método que possua eficiência igual ou maior à dos medidores existentes no mercado, atentando principalmente para evitar a ocorrência da intrusividade, sendo, portanto, importante promover a medição pelo efeito térmico provocado na superfície de um tubo de cobre por um sistema de controle e aquisição de dados.

Palavras-chave: Medidor, Vazão, Térmico.

Abstract: The use of fluid substances covers many areas within the Mechanical Engineering field of study, and it can even detect such a need in other areas, such as medicine. For this use is increasing in several studies, it has generated the need of the measured variables for the transport of fluids such as speed and flow. The flow meters are on the market, in most cases, have the limitation of promoting measuring, with the need for contact between the fluid and flow-measuring instrument of the sensor element, known as intrusiveness. This proposal provides a method that has efficiency equal to or greater than the existing meters on the market, paying attention mainly to prevent the occurrence of intrusiveness, is therefore important to promote the measurement effect caused by heat on the surface of a copper tube by a system control and data acquisition.

Keywords: Meter, Flow, Thermal.

[1] Doutorando Eng. Mecânica – UERJ / Prof. Universidade Santa Úrsula – jonatas.quirino@usu.edu.br
[2] Doutorando Eng. Eletrônica – UFJF / Prof. Universidade Estácio de Sá – tqmotta@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O setor da indústria demanda cada vez mais por métodos excelentes para transporte de fluidos. Desde grandes tubulações de água ou gases para o abastecimento predial, até oleodutos e tubulações hospitalares para o transporte de oxigênio.

Para atender essa demanda, determinadas características devem ser precisamente levantadas, como viscosidade, densidade, velocidade de fluxo, regime de escoamento, temperatura de fluido, entre outras. (CASSIOLATO & ALVES, 2008)

O fenômeno que permite tal transporte é conhecido como vazão e sua medição é de extrema relevância, seja para controle de gastos, no caso de fornecimento residencial, ou para doseamento, para tratamentos hospitalares. Em todos os projetos e operações que envolvem transporte de fluidos, é imprescindível projetar a instalação, operação, exatidão, precisão, custo, sensibilidade do sensor, confiabilidade, entre outras.

Pode-se relacionar uma série de vantagens na utilização do método térmico de medição de vazão, das quais sobressaem a possibilidade de análise diretamente na parede externa do tubo, ou seja, de maneira não intrusiva. Desta forma é possível mitigar as desvantagens ocasionadas pelos distúrbios no escoamento e as perdas de velocidade e pressão, além de assegurar que, não havendo o contato de sensores de medição com o fluido, a medição está imune aos prejuízos que o contato ao fluido pode gerar à medição.

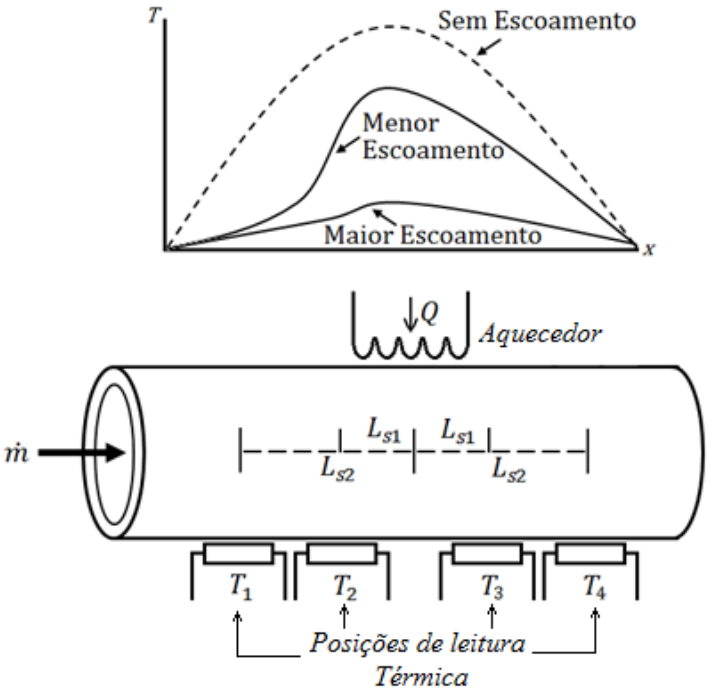
Dispondo-se de um sensor termográfico para detecção da temperatura, entende-se que é possível relacionar a distribuição de temperaturas detectada na parede do tubo com valores de vazão.

2. DESENVOLVIMENTO

Conhecendo-se o material do tubo, encontra-se em seu entorno, um elemento aquecedor conduz calor pela dispersão térmica e ainda um fluido movimentando-se em contato com tal região, troca calor pelo efeito convectivo, desenvolvendo um perfil térmico nesta região.

A condução do calor fornecido pelo aquecimento (Q) no fluido, sem escoamento, e na parede do tubo resulta na distribuição espacial de temperaturas esboçada. Quando o fluido está em movimento com aquecimento mantido, surge o efeito convectivo, que produz a alteração da distribuição de térmica, que se relaciona à vazão ($\dot{m}$). (BERGMAN *et al*, 2011)

Figura 1: Perfis de temperatura de calorimetria



Fonte: Próprio autor

Para a utilização de tal princípio é realizada a montagem necessitando no mínimo de um aquecedor e dois pontos de temperatura equidistantes de par em par dispostos a jusante e o restante a montante do aquecedor.

O método termográfico pode ser incluído como análogo ao método calorimétrico, no qual é possível analisar vários pontos de temperatura, onde o elemento sensor é a projeção gráfica em representação de imagem da distribuição de temperaturas ao longo do sentido axial do tubo. (STRIEDER *et al.*, 2004)

Parte-se do pressuposto de que o valor da temperatura do fluido é inferior ao do tubo depois do aquecimento, assumindo que toda a parede de tubo da superfície de controle está aquecida. As variações percebidas no perfil são provocadas partindo da extremidade do tubo na qual o fluxo é inserido, que causa resfriamento no tubo pré-aquecido, nas posições axiais anteriores ao elemento aquecedor.

Quanto mais distante da extremidade de inserção da vazão no tubo, menor é o efeito do resfriamento, já que se aproxima do elemento aquecedor posicionado na metade longitudinal do tubo.

Além do elemento aquecedor, o efeito de resfriamento não é idêntico ao efeito aquém do aquecedor, já que o fluido aquece no processo, portanto a mesma intensidade de vazão não provoca efeitos térmicos idênticos simetricamente, em relação ao elemento aquecedor.

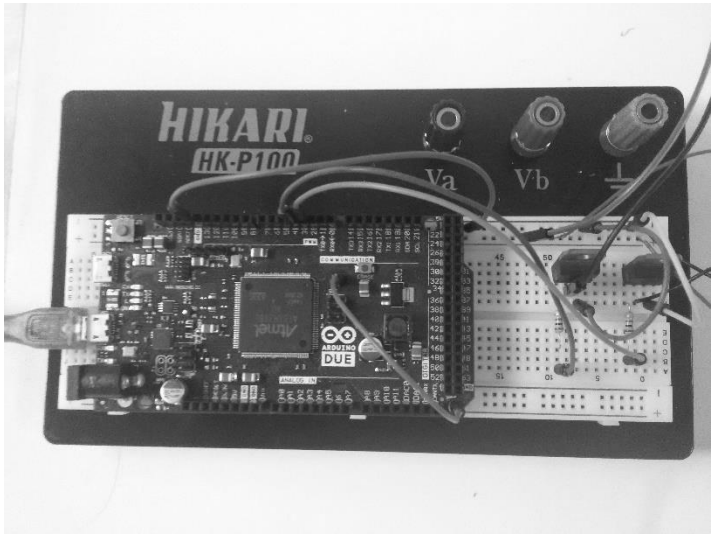
A fim de experimentar a proposta do projeto em situação fisicamente real, foi elaborada a montagem de um protótipo com os dados obtidos na simulação, atendando-se às limitações comerciais, e que as características dos componentes existentes devessem atender às especificações de projeto.

2.1.1. Placa de aquisição de dados

Todo o processo de acionamento e sensoriamento necessários para realizar os testes no protótipo devem ser controlados, para assegurar que os valores estipulados pelo projeto sejam efetivamente aplicados ao sistema.

Adquiriu-se, portanto uma placa de aquisição de dados, que também funciona concomitantemente como um elemento de controle de instrumentação, chamada Arduino®, que se conecta a um computador para que seja possível monitorar os valores dos resultados obtidos e impor os valores de projeto a todos os componentes do sistema de medição.

Figura 2: Placa de aquisição de dados



Fonte: Próprio autor

Dentre as placas disponíveis no mercado, foi selecionado o Arduino Due®, que possui maior gama de controle e maior quantidade de portas digitais.

2.1.2. Fonte de alimentação

Uma vez que o sistema funciona por acionamento eletrônico, faz-se necessário fornecer corrente elétrica com valor estipulado para cada componente.

Com esse objetivo, usou-se uma fonte de alimentação em corrente contínua de 12V, gerando corrente máxima de 5A, o que resulta numa potência total máxima de 60W para alimentação de todo o sistema.

Figura 3: Fonte de alimentação

Fonte: Próprio autor

A placa de aquisição de dados não é conectado à fonte, uma vez que pode ser alimentado apenas pela conexão USB com o próprio computador.

2.1.3. Tubo de cobre

Para a limitação do escoamento adquiriu-se um tubo de cobre com 35 mm de diâmetro, que atende à exigência de projeto de possuir pequeno diâmetro, com 400 mm de comprimento, que foi o mínimo estabelecido pela simulação para que houvesse a melhor resolução possível para haver a melhor leitura térmica possível de acordo com os dados impostos pelo projeto.

Figura 4: Tubo de cobre

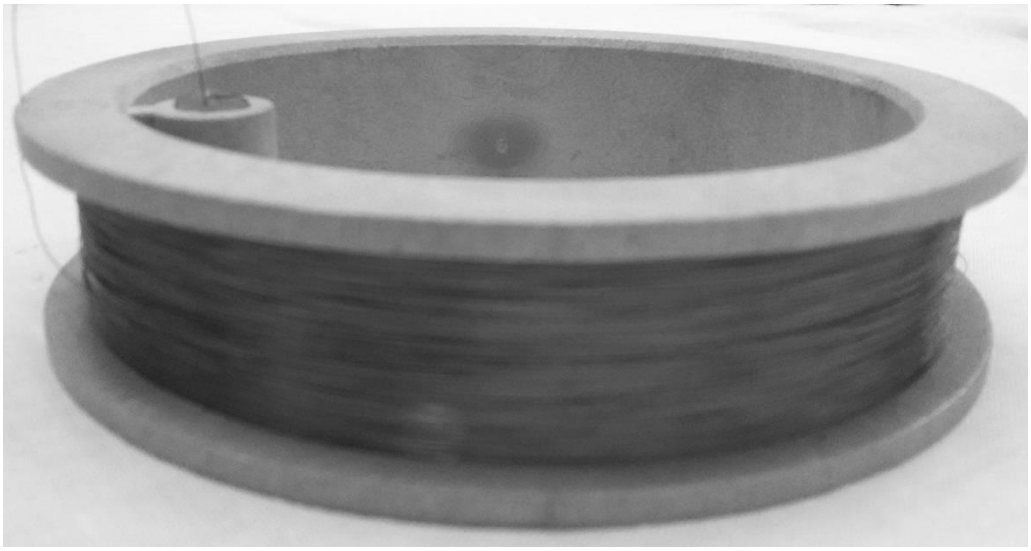
Fonte: Próprio autor

O tubo deve ser isolado fisicamente de contato com outros meios dissipadores de calor para que não haja transferência indesejada de calor para outro meio sólido por condução térmica.

2.1.4. Filamento resistivo

Para o aquecimento, foi adquirido um filamento de tungstênio da marca GE® visando o aquecimento do tubo de cobre. Para tal, o fio de tungstênio foi ligado à alimentação da fonte, de forma que houvesse passagem de corrente elétrica por ele.

Figura 5: Filamento de tungstênio



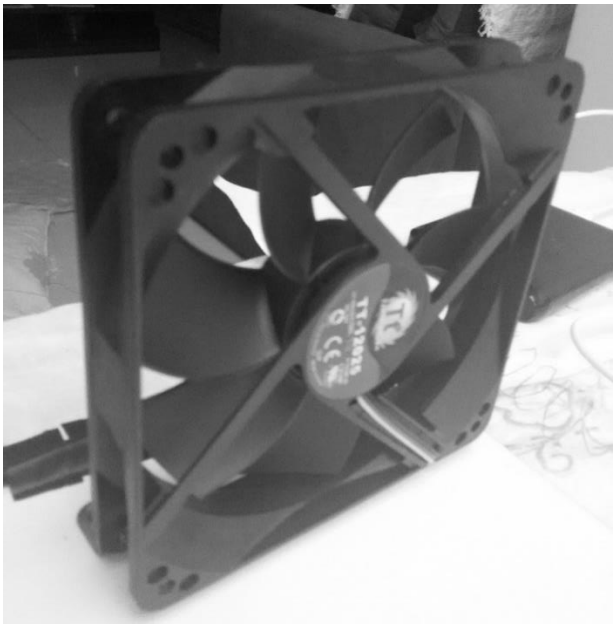
Fonte: Próprio autor

Para o controle da corrente elétrica e, portanto, da temperatura dissipada pelo filamento, um transistor TIP122 foi colocado entre a fonte e o fio resistivo, sendo controlado pelo Arduino. Portanto a temperatura no fio é controlada pela placa de aquisição de dados através do transistor e medida em tempo real, concomitantemente por um sensor térmico de precisão LM35, também ligado à placa de aquisição de dados.

2.1.5. Emissor de fluxo

O emissor de fluxo de ar escolhido foi o *cooler* da *Thermaltake® Cooler FAN DuraMax AF0060*, que possui vazão máxima de 269,5 m^3/h. Tendo em vista as perdas antes da entrada no tubo, objetivou-se alcançar valores mínimos de 90 m^3/h no interior do tubo.

Figura 6: Emissor de fluxo de ar



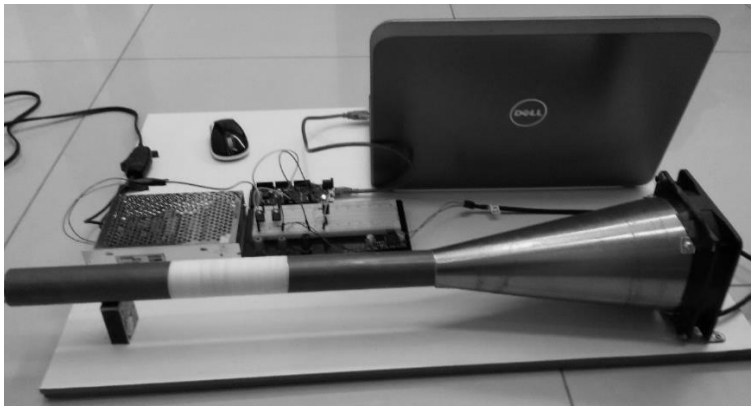
Fonte: Próprio autor

Assim como o filamento resistivo, o emissor de fluxo está ligado à placa de aquisição de dados, a fim de possibilitar monitoramento em tempo real da rotação da hélice, além de controlar a sua velocidade para, portanto, realizar os testes com diferentes valores de vazão no interior do tubo.

2.1.6. Procedimento

Após a montagem de toda a bancada de testes, as adaptações foram realizadas de forma a obter-se a melhor formulação de resultados possível, de forma que seja possível verificar os dados pertinentes à análise de forma amplamente satisfatória.

Figura 7: Protótipo montado



Fonte: Próprio autor

O funcionamento do procedimento consiste de algumas etapas bem definidas, que possibilitam a execução do processo e sua medição, a saber:

1) Conexão da fonte 12VDC à linha de energia 117VAC;

2) Alimentação da fonte ao *Cooler* e ao fio resistivo;

3) Conexão dos sensores, *cooler* e fio resistivo ao Arduino;

4) Acionamento do fluxo de ar;

5) Sensoriamento e medição do calor dissipado pelo fio resistivo;

6) Controle da intensidade do fluxo e potência dissipada pelo fio resistivo; e

7) Análise termográfica da distribuição de temperaturas pelo tubo.

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos pelos métodos e procedimentos que foram detalhadamente descritos em Capítulo anterior deste trabalho devem ser adequados às condições impostas, para possibilitar a determinação dos valores de vazão. A emissão do ar é monitorada e controlada pelos instrumentos de comando e controle também descritos em Capítulo anterior. (MILLER, 1983)

A experimentação se deu em condições que o tubo em questão, de dimensões determinadas e conhecidas, fosse primeiramente aquecido até que se alcançasse a temperatura de estabilização, quando então foi ligado o fluxo, de forma que provocou um resfriamento ao longo do tubo, gerando assim um perfil de temperaturas ao longo da superfície do tubo, que será o objeto de análise deste Capítulo.

Os resultados gerados consistem basicamente em levantar informações através de gráficos sobre o comportamento térmico dos efeitos de aquecimento provocado pelo filamento resistivo de tungstênio, cominado com o resfriamento oriundo da emissão de fluxo de ar controlada pelo sistema de controle descrito anteriormente.

O equipamento utilizado para a aquisição de imagens térmicas que foram analisadas foi a Câmera termográfica FLIR® A320.

Figura 8: Bancada de testes termográficos

Fonte: Próprio autor

Tal equipamento permite uma análise por imagens que caracteriza a distribuição térmica em um corpo, concedendo resultados por um espectro de cores. (MOAZZENI, 2013)

Espera-se que os resultados obtidos estejam relacionados aos valores de vazão concedidos pelo sistema de monitoramento e controle, tal qual foi especificado em seção anterior, de forma que o espectro gráfico de cores fornecido pela câmera, como é exemplificado pela imagem obtida pela câmera supracitada, apresentada na Figura 9.

Figura 9: Imagem de distribuição térmica inicial

Fonte: Próprio autor

O processo transiente foi analisado durante os intervalos de tempo chamados tempo de estabilização térmica, que consiste na duração necessária para que o regime térmico se torne permanente, ou que as variações sejam desprezíveis.

Vale ressaltar que a câmera avalia a quantidade de pontos que lhe for estipulado, o que torna maior a sua eficiência para a análise do protótipo.

A fim de finalmente traduzir os dados de temperatura obtidos através dos procedimentos detalhadamente descritos acima, faz-se necessário utilizar métodos que possibilitem tal associação entre parâmetros.

Para tal há alguns métodos estatísticos que relacionam dois ou mais parâmetros. A realização do processamento por esses parâmetros, demanda a análise o comportamento do perfil térmico, ou seja, a determinação se a tendência de crescimento ou decrescimento é conjunta ou contrária entre as variáveis.

A utilização do Modelo de Regressão Linear (MRL) possui grande potencialidade em estimar o comportamento citado, já que segundo Naghettini (2007) um MRL simples considera uma variável independente e uma variável dependente de acordo com a função

$$y = \alpha x + \beta + \varepsilon, \tag{1}$$

sabendo-se que α e β são os coeficientes do modelo, ε representa os resíduos da regressão, enquanto x é a variável independente e y a variável dependente.

A determinação dos coeficientes angular e linear se dão através de relações entre os somatórios, descrita por Paternelli (2015):

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

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} - \alpha \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} = \bar{y} - \alpha \bar{x} \quad (3)$$

Onde:

$\bar{y}$ e $\bar{x}$ representam os valores médios das variáveis do contexto.

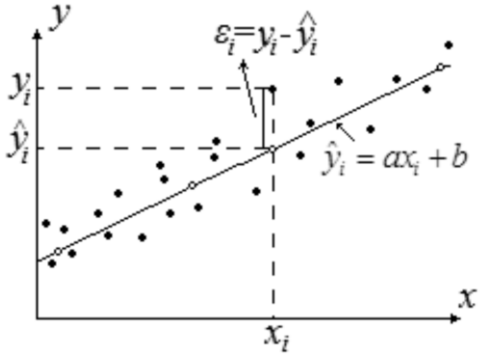
Em modelagem experimental, ε representa a diferença entre o valor medido e o valor calculado, ou seja, a quantificação do erro relativo.

Na aplicação em análises com maior quantidade de variáveis dependentes, o MRL simples pode ser generalizado, de forma que seja possível modelar equações com dois ou mais coeficientes angulares, embora isso acarrete uma maior demanda computacional para a solução.

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_n x_n + \beta + \varepsilon \quad (4)$$

Para a definição dos parâmetros empregados no MRL em x_n e y_n, o algoritmo mais eficiente é o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), onde busca-se minimizar o somatório dos erros quadráticos, que são a representação matemática dos resíduos gerados pelo MRL, como é exposto na Figura 10. (HELENE, 2006)

Figura 10: Gráfico comparativo entre valores medidos e calculados



Fonte: Adaptado VANNI (1998)

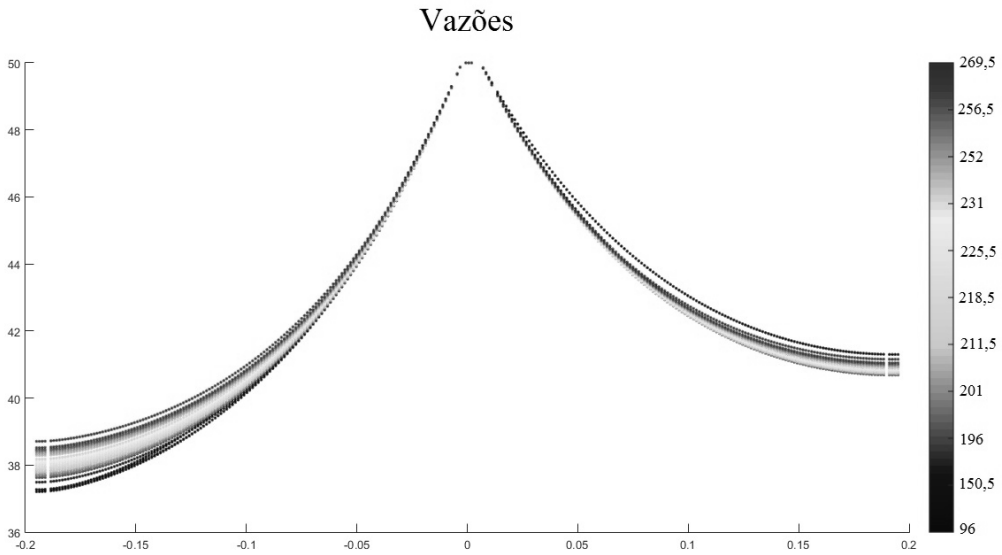
O processo de determinação da vazão é dividido em duas partes: A aquisição de dados por um procedimento experimental; e as estratégias de regressão e ajuste da vazão.

A partir das imagens termográficas obtidas, torna-se possível determinar representações gráficas que descrevam como diferentes valores de vazão se comportam numa relação entre a distribuição de temperaturas e a posição longitudinal no tubo.

Para tal análise utilizou-se o método de processamento computacional de imagens, através do programa MATLAB®, onde é possível traduzir informações da imagem em dados de projeto da distribuição das temperaturas ao longo da superfície do tubo.

Tais dados apresentados na Figura 11 mostram tal comportamento, sendo possível avaliar as nuances diferenciais entre cada intensidade de vazão.

Figura 11: Gráfico de valores de vazão



Fonte: Próprio autor

A massa de dados composta pelas medições realizadas é dividida em treinamento e teste com objetivo de determinação dos parâmetros de regressão e análise da capacidade de generalização do modelo. Os dados utilizados para treinamento são responsáveis pela definição dos pesos do MRL. A existência do conjunto de testes permite determinar a capacidade de generalização dos modelos, pois não se utilizou as informações deste conjunto para a definição do modelo. (Quirino *et al.*, 2015)

A distribuição das temperaturas medidas foi de acordo com a análise de temperaturas oriundas da imagem termográfica, como pode-se ver na Figura 12.

Figura 12: Análise de pontos de teste ao longo do tubo

Fonte: Próprio autor

Para o presente estudo, a segregação dos dados foi feita aleatoriamente, de forma que as medições da massa de dados sejam usadas para treinamento dos modelos, 37 medições são inseridas no grupo de validação e 11 medições consistem no grupo de testes.

Ao aplicar os dados adquiridos de cada característica do perfil no modelo linear, obtém-se resultados através de vários métodos possíveis, os quais podem ser comparados a fim de determinar-se qual o método que descreve o menor erro de medição.

3.1.1. Determinação das características do perfil

A proposta deste trabalho visa a análise da disposição térmica na superfície de um tubo, logo se baseando no fato da termografia relacionar os perfis de temperatura aos diferentes valores de vazão.

A consideração inicial é que para diferentes vazões existe simetria no perfil de temperaturas ao longo do tubo, em relação ao resistor que se encontra na metade do comprimento do tubo.

Apropria-se de características do perfil para inferência da vazão. O perfil pode ser caracterizado simplesmente pelos dados de temperatura do sistema de sensoriamento, que no caso da presente experimentação, consiste em todos os pontos quantos forem necessários ao longo do tubo.

Será utilizado o método de determinação de parâmetros de regressão linear, que será explicitado mais adiante, a fim de dispor-se de um método eficiente que teste os valores obtidos experimentalmente e determine com melhor precisão os valores de vazão para cada disposição térmica gerada pelo experimento.

Para a análise termográfica, vale ressaltar que é o método termográfico é aquele em que se pode obter a maior quantidade de pontos do que outro método de sensoriamento, limitando-se pela resolução da câmera utilizada para tal análise.

3.1.2. Áreas do perfil

O perfil térmico gerado, representado graficamente através de curvas que relacionam as temperaturas medidas ao longo do tubo, pode ser analisado matematicamente por meio das áreas geradas entre a curva e o eixo das abcissas, onde a assimetria causada pelo resfriamento da vazão permite a definição da mesma.

A dimensão das áreas do gráfico em cada lado do centro, caracterizado pela posição do elemento aquecedor é obtido através do método de integração trapezoidal, onde serão separadas as Áreas à esquerda do elemento aquecedor (AP_{esq}) e à direita do elemento aquecedor (AP_{dir}), onde obtém-se as seguintes equações:

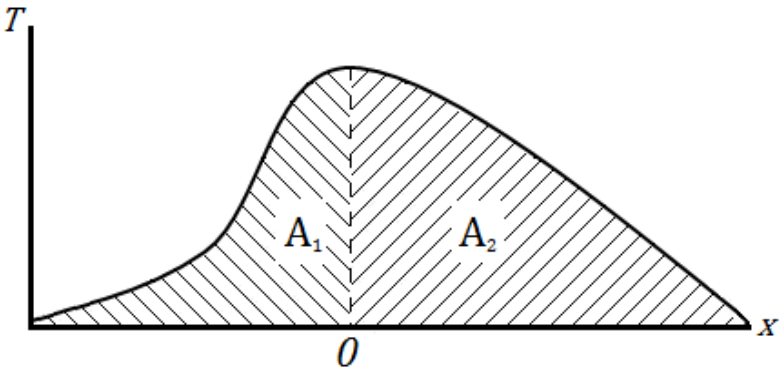
$$A_1 = \Delta T_1 \cdot \Delta x_1; A_2 = \Delta T_2 \cdot \Delta x_2; A_3 = \Delta T_3 \cdot \Delta x_3; \dots; A_n = \Delta T_n \cdot \Delta x_n; \quad (5)$$

Ao realizar-se tais cálculos em ambos os lados do perfil, obtém-se:

$$AP_{esq} = \sum_{n=1}^{146} \Delta T_n \cdot \Delta x_n \ e \ AP_{dir} = \sum_{n=147}^{292} \Delta T_n \cdot \Delta x_n \quad (6)$$

A Figura 13 representa um esboço de como as relações térmicas (T) em função da posição (x), sob a influência da vazão.

Figura 13: Áreas do perfil



Fonte: Próprio autor

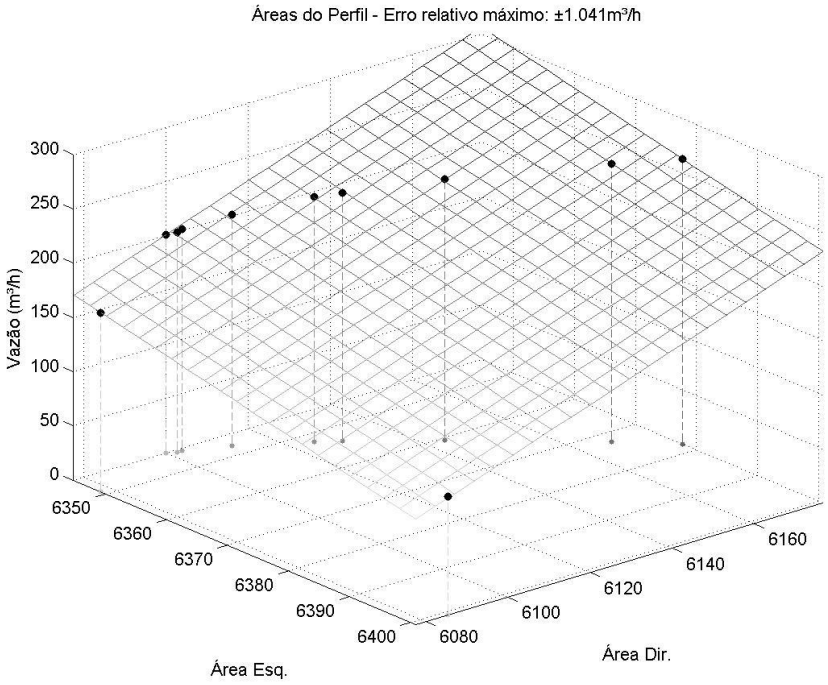
Através das relações descritas, pode-se gerar a Equação análoga à Equação do MRL:

$$\dot{m} = f_{AP}(AP_{esq}, AP_{dir})$$

$$\dot{m} = \alpha_{A1} AP_{esq} + \alpha_{A2} AP_{dir} + \beta_A \quad (7)$$

A distribuição dos dados obtidos através do método de análise de Áreas e sua relação com a vazão mássica está presente na Figura 14.

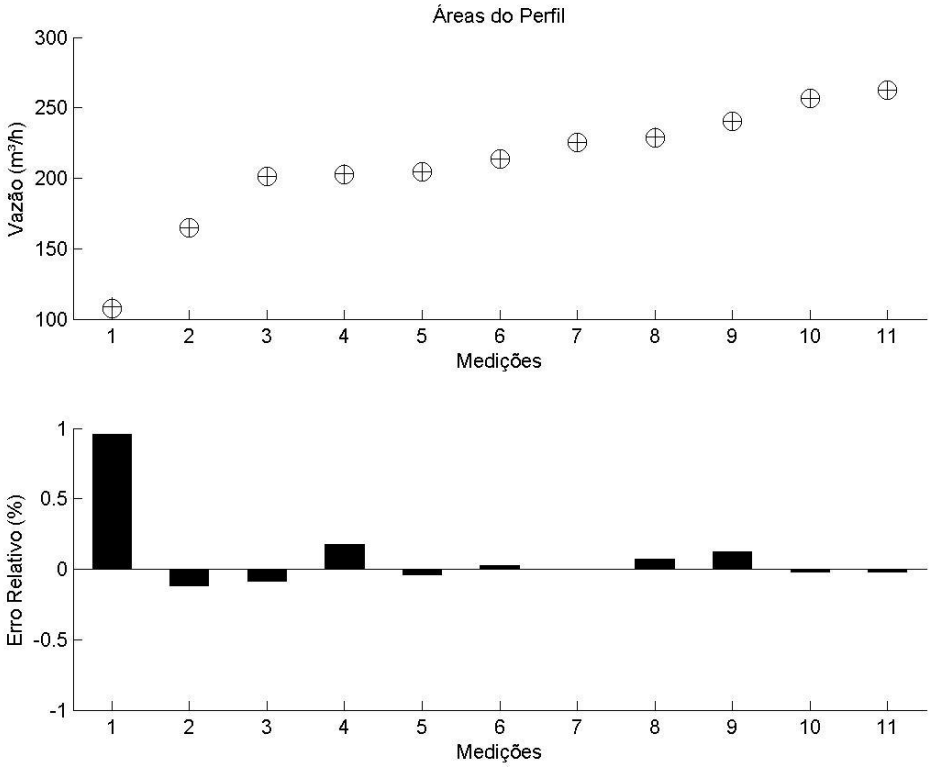
Figura 14: Gráfico de vazões pelo método de Áreas



Fonte: Próprio autor

Na Figura 15 estão apresentadas as proporções de medição de vazão e os erros relativos entre as vazões medidas e calculadas através do MRL proposto.

Figura 15: Erro de Áreas do Perfil



Fonte: Próprio autor

Partindo do pressuposto de constância dos dados obtidos na experimentação, não havendo variação significativa, torna-se possível comparar os resultados obtidos nos diversos métodos empregados.

Concluiu-se pelo desenvolvimento deste projeto a potencialidade da aplicação do método descrito para a medição de vazões tubulares. Uma vez que a propagação do erro (0,96% de erro relativo) se situa dentro do limite de erro de vários outros medidores comerciais, percebe-se a eficiência do método proposto.

Pela crescente necessidade no aprimoramento dos instrumentos de medição de vazão, percebe-se a demanda de tal equipamento em instalações específicas, acarretando determinadas exigências de projeto para a utilização do medidor. Por meio de tais exigências, detectou-se a importância do desenvolvimento de um método de medição que não necessitasse ser intrusivo ao escoamento.

O presente estudo desenvolveu e analisou um método específico que se mostrou de grande eficiência, através do exame em protótipo proposto pelo próprio estudo, de forma que atendesse à não intrusividade e que aplicasse metodologia que dispusesse da maior quantidade de pontos ao longo do tubo para análise.

A proposta da utilização da termografia computacional pela câmera FLIR® A-320 mostrou-se perfeitamente eficaz e atendeu à expectativa de leitura térmica de quantos pontos fossem necessários, sendo utilizados 292 pontos, descrevendo um perfil térmico que é apresentado graficamente.

O protótipo foi montado atendendo às especificações de projeto, tais quais: Fluxo em fluido gasoso, de ar; baixas vazões, entre 95 e 269,5 m^3/h; pequenos diâmetros de tubo, de $1\,{}^{1}/_{4}$" de diâmetro nominal e tubo em material com excelente condutividade térmica, no caso o cobre, com $k_{Cu} \cong 400\ W/m \cdot K$.

A análise foi realizada primeiramente pela observação dos fenômenos físicos descritos em fundamentação teórica de transferência de calor, onde o elemento aquecedor é ligado ainda sem a influência da vazão, permanecendo assim pelo tempo de estabilização térmica.

Após o tempo necessário para que toda a superfície do tubo esteja uniformemente aquecida, liga-se o emissor de fluxo, de maneira que haja resfriamento no tubo, originado em uma das extremidades do tubo, na qual está conectado o emissor de fluxo.

A partir daí o aquecimento gera o fenômeno da condução térmica enquanto a vazão de ar provoca o fenômeno da convecção térmica. Os fenômenos combinados geram uma variação térmica que é o principal objeto de estudo deste trabalho.

Uma placa de aquisição de dados foi utilizada para prover o controle da potência de aquecimento, que foi monitorada em tempo real por sensores térmicos de precisão para que ao alcançar um valor estipulado, o aquecimento se estabilizasse. A placa também controlou a velocidade de rotação do emissor de fluxo, e consequentemente, a intensidade da vazão.

Para a aquisição de dados térmicos, foi utilizada uma câmera termográfica, que foi capaz de ler tantos pontos de temperatura quantos fossem estipulados, portanto apresentou-se como um eficiente método de obtenção de dados, possibilitando a plotagem de uma curva gráfica que denota a distribuição térmica ao longo do tubo.

O processamento dos dados obtidos foi realizado computacionalmente, onde a aplicação de um Modelo de Regressão Linear avalia um conjunto de dados fornecido para criar um modelo aplicável a todos os valores de vazão impostos ao sistema proposto.

Através dos resultados de todas as etapas de análise do projeto, concluiu-se que o método de análise pelo Modelo de Regressão Linear foi o mais eficiente, apresentando valores de erro relativo de fundo de escala menores do que 1% para as medições de vazão.

REFERÊNCIAS

BERGMAN, Theodore L. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. John Wiley & Sons, 2011.

CASSIOLATO, Cesar; ALVES, E. O. Medição de vazão. **São Paulo**, 2008.

HELENE, Otaviano. **Metodos dos Minimos Quadrados**. Editora Livraria da Física, 2006.

HSIA, Tien C. **System identification: least-squares methods**. Lexington: Lexington books, 1977.

MILLER, Richard W. Flow measurement engineering handbook. 1983.

MOAZZENI, Taleb; MA, Jian; JIANG, Yingtao. Measurement and calibration of thermal cross-correlation-based flowmeter operating in harsh environment. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 62, n. 8, p. 2280-2285, 2013.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Hidrologia estatística**. CPRM, 2007.

PETERNELLI, Luiz Alexandre; MELLO, MP de. Conhecendo o R: uma visão estatística. **UFV**, 2011.

QUIRINO, TIAGO M. et al. MÉTODOS INTELIGENTES PARA MODELAGEM E AJUSTE DE UM MEDIDOR DE VAZÃO TERMAL, 2015.

STRIEDER, André et al. Medidor de vazão por transferência térmica. 2004.

VANNI, Sergio Marcos. **Modelos de regressão linear e não linear simples: estatística aplicada, inclui solução pela HP12C e EXCEL**. Legnar Informática, 1998.