



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Tiago Motta Quirino

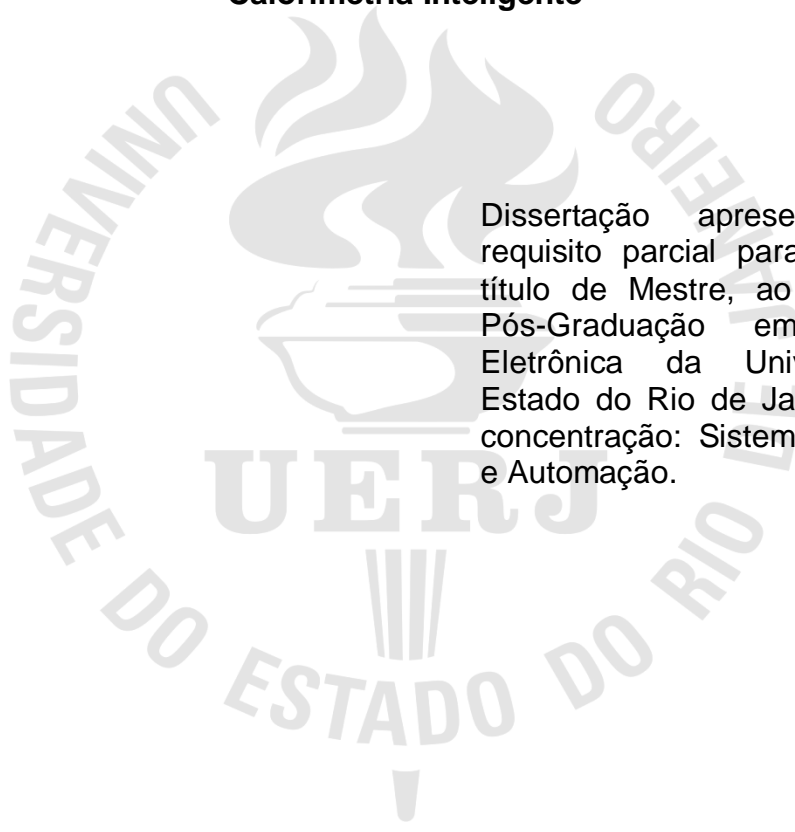
**Desenvolvimento de um Medidor de Vazão Não Intrusivo Utilizando
Calorimetria Inteligente**

Rio de Janeiro

2015

Tiago Motta Quirino

**Desenvolvimento de um Medidor de Vazão Não Intrusivo Utilizando
Calorimetria Inteligente**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Orientadores: Prof. Dr. Jorge Luís Machado do Amaral

Prof. Dr. José Franco Machado do Amaral

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

Q8 Quirino, Tiago Motta.
Desenvolvimento de um medidor de vazão não intrusivo utilizando calorimetria inteligente / Tiago Motta Quirino. - 2015.
114 f.

Orientadores: Jorge Luís Machado do Amaral, José Franco Machado do Amaral.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Eletrônica. 2. Redes neurais (Computação) – Dissertações. 3. Sensores inteligentes -- Dissertações. 4 Modelagem computacional -- Dissertações. I. Amaral, Jorge Luís Machado do. II. Amaral, José Franco Machado do. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 004.89

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Tiago Motta Quirino

**Desenvolvimento de um Medidor de Vazão Não Intrusivo Utilizando
Calorimetria Inteligente**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Aprovado em 31 de Março de 2015.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jorge Luís Machado do Amaral (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. José Franco Machado do Amaral (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Eduardo Costa da Silva
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2015

AGRADECIMENTOS

A Deus pela capacitação e suporte para prosseguir mesmo diante de intempéries.

Ao professor Jorge Luís Machado do Amaral que orientou este trabalho com esmero e dedicação, auxiliando tanto nas soluções de questões teóricas quanto no desenvolvimento do aparato experimental, tornando possível a conclusão deste trabalho.

Ao meu irmão Jonatas que participou diretamente deste trabalho com sugestões e correções, além de colaborar na elaboração de ilustrações.

Ao professor José Franco Machado do Amaral pelo incentivo e orientação para a realização deste trabalho.

Ao meu pai Eliezer Senna Quirino que colaborou dando o suporte possível para facilitar o período de realização do programa de pós-graduação.

À minha irmã Lília, minha mãe Lilian, minha madrasta Dalva e meu padrasto Armando, que sempre me deram suporte para a realização deste objetivo.

Aos meus amigos Caio, Felipe, Raphael, Filipe, Ronan e Alex que me proporcionam momentos descontraídos e alegres e ainda pacientemente escutaram os novos conceitos aprendidos durante o processo acadêmico, mesmo sem entendê-los algumas vezes.

Ao meu amigo Mario Possebom que no momento crítico deste trabalho auxiliou na elaboração de peças úteis ao projeto.

Ao Engenheiro Marcos Oliveira que colaborou com materiais e sugestões para desenvolvimento do protótipo.

Aos professores do programa de pós-graduação em engenharia eletrônica que contribuíram de forma direta para o meu crescimento intelectual.

À UERJ que possibilitou a realização da graduação, iniciação científica e mestrado, gerando desta maneira o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos meus colegas do curso que sempre me auxiliaram.

Deus fez isso para que os homens o buscassem e talvez, tateando, pudessem encontrá-lo, embora não esteja longe de cada um de nós.

Atos 17:27

RESUMO

QUIRINO, Tiago Motta. *Desenvolvimento de um medidor de vazão não intrusivo utilizando calorimetria inteligente*. 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Devido à necessidade de satisfazer as exigências de medição ainda não resolvidas plenamente pelos sensores de vazão atuais, este trabalho propõe desenvolver um sistema de medição de vazão termal não intrusivo para pequenos diâmetros e baixas vazões de ar. Tal sistema é baseado no conceito de convecção forçada, no qual um conjunto de cinco sensores de temperatura PT-100 e um resistor de aquecimento são instalados na superfície externa de uma tubulação de maneira a obter-se a distribuição térmica na parede da tubulação como efeito combinado do aquecimento, gerado pelo resistor, e do resfriamento, gerado pelo escoamento interno. Deseja-se obter o modelo do perfil térmico de maneira a reconstituir o perfil de temperaturas por apenas alguns pontos. A partir das características da distribuição térmica no tubo, investiga-se a inferência da vazão pelo modelo de regressão linear e, posteriormente, de maneira análoga, se utiliza Redes Neurais Artificiais para determinação da vazão. Os resultados mostraram que é possível o desenvolvimento de um medidor não intrusivo, capaz de inferir a vazão com erro de fundo de escala menor que 3%.

Palavras-chave: Sensor Inteligente; Vazão. Termal; Não Intrusivo; Redes Neurais; Modelagem.

ABSTRACT

QUIRINO, Tiago Motta. *Development of a non-intrusive flow meter using intelligent calorimetry*. 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

In order to pursue the measurement requirements still not fully achieved by the current flow sensors, this dissertation proposes to develop a non-intrusive thermal flow measurement system for small diameters and low air flow. This system is based on concept of forced convection, in which a set of five PT-100 temperature sensors and a heating resistor are installed on the outer surface of a pipe in order to obtain the thermal distribution in the pipe wall as the combined effect of heat generated by the resistor and cooling generated by the internal flow. The thermal profile was modeled in order to allow its complete reconstruction, by measurements of few sensors placed on the pipe wall. From the characteristics of the thermal distribution in the tube, the flow inference is evaluated by using the linear regression model and later in a similar manner using Artificial Neural Networks. The results showed that it is possible to develop a non-intrusive thermal flow meter capable to infer flow with full scale error lower than 3%.

Keywords: Intelligent Sensor; Flow; Thermal; Non-intrusive; Neural Network; Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos medidores.....	18
Figura 2 – Regimes de escoamento.....	21
Figura 3 – Classificação dos medidores de vazão.....	22
Figura 4 – Exemplos de medidores de deslocamento positivo.....	24
Figura 5 – Medidor Turbina.....	24
Figura 6 – Medidores por impacto de fluido.....	25
Figura 7 – Medidores DP.....	26
Figura 8 – Vista de corte de um rotâmetro.....	27
Figura 9 – Medidor eletromagnético.....	28
Figura 10 – Medidor por ultrassom.....	29
Figura 11 – Medidor por vórtex.....	30
Figura 12 – Medidor por Efeito Coriolis.....	30
Figura 13 – Medidor por FIV.....	31
Figura 14 – Medidor por termorresistências.....	32
Figura 15 – Fluxograma de medição da vazão pelo efeito termal.....	35
Figura 16 – Anemômetro Térmico.....	36
Figura 17 – Tempo de Trânsito.....	37
Figura 18 – Oscilação Térmica.....	37
Figura 19 – Gráfico de oscilação Térmica.....	38
Figura 20 – Montagem do calorímetro e curvas características.....	39
Figura 21 – Direções de condução no tubo.....	40
Figura 22 – Simplificação para condução em apenas uma direção.....	40
Figura 23 – Volume de controle da condução.....	41
Figura 24 – Distribuição axial teórica de temperaturas.....	43
Figura 25 – Volumes de controle para condução e convecção.....	44
Figura 26 – Perfis de temperaturas.....	47
Figura 27 – Envoltórias geradas pelos limites de vazão.....	48
Figura 28 – Possibilidades de arranjos para o medidor.....	49
Figura 29 – Bancada de testes.....	50
Figura 30 – Modificações no sensor termal.....	52
Figura 31 – Medição pelo calorímetro.....	53

Figura 32 – Ilustração da instalação do material isolante no tubo.....	54
Figura 33 – Representação da instalação do resistor.....	54
Figura 34 – Instalação e detalhe da peça para acomodação dos sensores térmicos	55
Figura 35 – Medidor de vazão termal não intrusivo.....	55
Figura 36 – Bancada de teste.....	56
Figura 37 – Esquema elétrico da bancada de testes.....	58
Figura 38 – Respostas dos sensores sem ajuste.....	59
Figura 39 – Calibração de Pt-100 segundo sensor de referência em banho térmico.	60
Figura 40 – Respostas dos sensores calibrados.....	60
Figura 41 – Efeito do isolamento térmico.....	61
Figura 42 – Definição de parâmetros do MPT.....	62
Figura 43 – MPT para reconstituição do perfil.....	62
Figura 44 – Pontos de temperaturas do perfil.....	62
Figura 45 – Determinação da diferença de temperaturas do perfil.....	63
Figura 46 – Determinação de inclinação das regiões do perfil.....	63
Figura 47 – Inclinação de regiões do perfil.....	63
Figura 48 – Determinação das áreas do perfil.....	64
Figura 49 – Áreas do perfil.....	64
Figura 50 – Determinação da diferença de áreas do perfil.....	65
Figura 51 – Reta estimativa e pontos de dados.....	66
Figura 52 – Regressão pelo modelo de regressão linear.....	68
Figura 53 – Rede Neural de uma camada e um neurônio.....	69
Figura 54 – Funções de ativação.....	69
Figura 55 – Exemplo de rede MLP e aprendizado por retropropagação do erro.....	71
Figura 56 – Curvas de erro exemplificando o treinamento excessivo.....	71
Figura 57 – Regressão por rede neural artificial.....	72
Figura 58 – Painel frontal do VI (<i>Virtual Instrument</i>).....	74
Figura 59 – Temperatura resultante dos efeitos termais.....	74
Figura 60 – Perfis de temperaturas medidos e aproximados.....	75
Figura 61 – Perfis de temperaturas normalizados.....	75
Figura 62 – Diagrama de blocos do processo de inferência da vazão.....	76

Figura 63 – Aplicação das estratégias de regressão e ajuste.....	76
Figura 64 – Valores de vazão e erros do MRL para áreas do perfil.....	78
Figura 65 – Valores de vazão e erros do MRL para diferença de áreas do perfil.....	78
Figura 66 – Valores de vazão e erros do MRL para diferença de temperaturas do perfil.....	79
Figura 67 – Valores de vazão e erros do MRL para inclinação do perfil.....	79
Figura 68 – Valores de vazão e erros do MRL para pontos de temperatura do perfil.....	80
Figura 69 – Valores de vazão e erros do MRL para áreas do perfil reconstituído.....	81
Figura 70 – Valores de vazão e erros do MRL para diferença de áreas do perfil reconstituído.....	81
Figura 71 – Valores de vazões e erros do MRL para diferenças de temperaturas do perfil reconstituído.....	82
Figura 72 – Valores de vazão e erros do MRL para a inclinação do perfil reconstituído.....	82
Figura 73 – Valores de vazão e erros do MRL para pontos de temperatura do perfil reconstituído.....	83
Figura 74 – Valores de vazão e erros da RNA para áreas do perfil.....	85
Figura 75 – Valores de vazão e erros da RNA para diferença de áreas do perfil.....	86
Figura 76 – Valores de vazão e erros da RNA para diferença de temperaturas do perfil.....	86
Figura 77 – Valores de vazão e erros da RNA para inclinação do perfil.....	87
Figura 78 – Valores de vazão e erros da RNA para pontos de temperaturas do perfil.....	87
Figura 79 – Valores de vazão e erros da RNA para áreas do perfil reconstituído.....	88
Figura 80 – Valores de vazão e erros da RNA para diferença de áreas do perfil reconstituído.....	89
Figura 81 – Valores de vazão e erros da RNA para diferença de temperaturas do perfil reconstituído.....	89

Figura 82 – Valores de vazão e erros da RNA para a inclinação do perfil reconstituído.....	90
Figura 83 – Valores de vazão e erros da RNA para pontos de temperatura do perfil reconstituído.....	90
Figura 84 – Estrutura em série do MRL e da RNA.....	94
Figura 85 – Diagrama de blocos do software de controle e aquisição de dados.....	94
Figura 86 – Diagrama de blocos do software de controle e aquisição de dados.....	99
Figura 87 – Dispersão de dados e MRL para áreas.....	101
Figura 88 – Dispersão de dados e MRL para diferença de áreas.....	101
Figura 89 – Dispersão de dados e MRL para diferenças de temperatura.....	102
Figura 90 – Dispersão de dados e MRL para inclinação do perfil.....	103
Figura 91 – Dispersão de dados e MRL para áreas do perfil reconstituído.....	103
Figura 92 – Dispersão de dados e MRL para diferenças de temperaturas do perfil reconstituído.....	104
Figura 93 – Dispersão de dados e MRL para diferença de áreas do perfil reconstituído.....	105
Figura 94 – Dispersão de dados e MRL para inclinação do perfil reconstituído.....	105
Figura 95 – Quantidade de neurônios para áreas do perfil.....	106
Figura 96 – Dispersão de dados e RNA para áreas.....	106
Figura 97 – Quantidade de neurônios para diferença de áreas.....	107
Figura 98 – Dispersão de dados e RNA para diferença de áreas.....	107
Figura 99 – Quantidade de neurônios para diferença de temperaturas.....	108
Figura 100 – Dispersão de dados e RNA para diferenças de temperaturas.....	108
Figura 101 – Quantidade de neurônios para inclinação do perfil.....	109
Figura 102 – Dispersão de dados e RNA para inclinação do perfil.....	109
Figura 103 – Quantidade de neurônios para pontos de temperaturas.....	110
Figura 104 – Quantidade de neurônios para áreas do perfil reconstituído.....	111
Figura 105 – Dispersão de dados e RNA para áreas do perfil reconstituído.....	111
Figura 106 – Quantidade de neurônios para diferença de áreas do perfil reconstituído.....	112

Figura 107 – Dispersão de dados e RNA para diferença de áreas do perfil reconstituído.....	112
Figura 108 – Quantidade de neurônios para diferenças de temperaturas do perfil reconstituído.....	113
Figura 109 – Dispersão de dados e RNA para diferenças de temperaturas do perfil reconstituído.....	113
Figura 110 – Quantidade de neurônios para inclinação do perfil reconstituído.....	114
Figura 111 – Dispersão de dados e RNA para inclinação do perfil reconstituído.....	114
Figura 112 – Quantidade de neurônios para pontos de temperaturas do perfil reconstituído.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise comparativa dos medidores.....	34
Tabela 2 – Comparação dos erros para MRL direto.....	83
Tabela 3 – Comparação dos erros para RNA direta.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TOF	<i>Time of Flight</i>
DP	Diferença de Pressão
FIV	Flow Induced Vibration
d.d.p	Diferença de Potencial
MPT	Modelo do Perfil Térmico
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
PVC	Policloreto de vinila
LSE	Laboratório de Sistemas Evolucionários
LARISA	Laboratório de Redes Industriais e Sistemas de Automação
RBC	Rede Brasileira de Calibração
MRL	Modelo de Regressão Linear
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
RNA	Redes Neurais Artificiais
MLP	<i>Multi Layer Perceptron</i>
VI	<i>Virtual Instrument</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
Temp. Dist.	Temperatura Distante
Temp. Prox.	Temperatura Próxima
<i>mse</i>	<i>mean square error</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\varnothing	Diâmetro
\dot{m}	Vazão
Q	Quantidade de calor
T_{S1}	Temperatura do sensor 1
T_{S2}	Temperatura do sensor 2
Δt	Tempo de atraso
f	Frequência
L_s	Distância entre sensores
\dot{q}	Potência gerada
Θ	Direção angular
r	Direção radial
z	Direção axial
T_s	Temperatura superficial
$R_{Cu,\theta}$	Resistência térmica do cobre na direção angular θ
$R_{Cu,z}$	Resistência térmica do cobre para o comprimento axial z
$R_{Cu,r}$	Resistência térmica do cobre na direção radial r
$R_{ar,r}$	Resistência térmica do ar na direção radial r
$R_{isolante,r}$	Resistência térmica do isolante na direção radial r
$T_{Ambiente}$	Temperatura do ambiente
$T_{Ambiente}$	Temperatura superficial na posição L
$q_{cond,x}$	Quantidade de calor de condução na posição x
$q_{cond,x+dx}$	Quantidade de calor de condução na posição $x + dx$
dx	Distância diferencial
\dot{E}	Taxa de transferência de energia
ρ	Massa específica
c_p	Calor específico a pressão constante
A_c	Área de condução
k	Condutividade térmica
m_{Cu}	Massa de cobre.
V_{Cu}	Volume de cobre.

A_s	Área superficial.
L	Comprimento axial
h	Coefficiente convectivo
P_i	Perímetro interno
T_m	Temperatura média do fluido
D	Diâmetro
S_{conv}	Superfície convectiva
Ω	ohm
cm	centimetro
V	volt
°C	grau Celsius
mA	mili ampére
ε	Resíduos da regressão linear
W	Matriz dos pesos
i	Época de treinamento
J	Matriz jacobiana
H	Matriz hessiana
λ	Fator de ajuste
∇E	Gradiente do erro médio quadrático para a matriz de pesos da época

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	18
1	MEDIDORES DE VAZÃO	21
1.1	Medidores Diretos	23
1.1.1	<u>Deslocamento Positivo</u>	23
1.1.2	<u>Impacto de Fluido</u>	24
1.2	Medidores Indiretos	25
1.2.1	<u>Pressão Diferencial</u>	26
1.2.2	<u>Área Variável</u>	27
1.3	Medidores Especiais	28
1.3.1	<u>Eletromagnético</u>	28
1.3.2	<u>Ultrassônico</u>	29
1.3.3	<u>Vortex</u>	30
1.3.4	<u>Coriolis</u>	30
1.3.5	<u>Vibração Induzida pelo Fluxo</u>	31
1.3.6	<u>Termal</u>	31
1.3.7	<u>Comparação entre Medidores de Vazão</u>	32
2	PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO TERMAL	35
2.1	Quantidade de Calor (Anemômetro)	36
2.2	Tempo de Trânsito	36
2.3	Oscilação Térmica	37
2.4	Perfil de Temperaturas (Calorímetro)	38
2.4.1	<u>Determinação Teórica do Modelo do Perfil Térmico (MPT)</u>	40
3	PROJETO DO MEDIDOR E BANCADA EXPERIMENTAL	49
3.1	Descrição do Medidor Proposto	51
3.2	Descrição da Bancada de Testes	56
3.3	Ajustes e Testes Iniciais	59
3.3.1	<u>Ajuste do Medidor de Vazão Turbina</u>	59
3.3.2	<u>Ajuste dos Medidores de Temperatura</u>	59
3.3.3	<u>Teste do Isolamento Térmico</u>	60
3.4	Determinação dos Atributos do Perfil	61
3.4.1	<u>Pontos do Perfil</u>	62

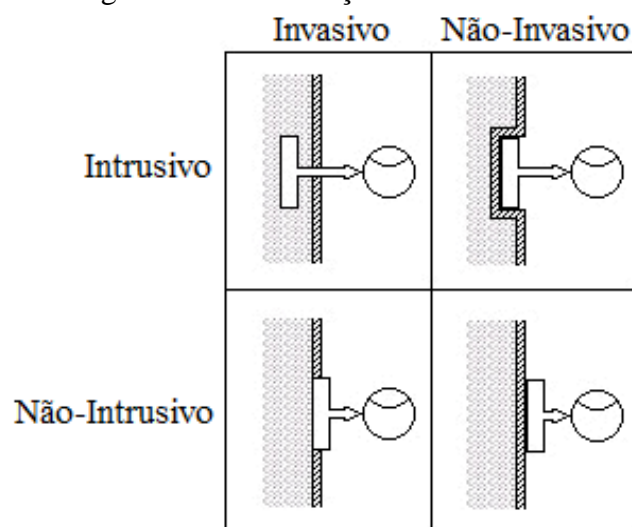
3.4.2	<u>Diferença de Temperaturas</u>	63
3.4.3	<u>Inclinação do Perfil</u>	63
3.4.4	<u>Áreas</u>	64
3.5	Métodos de Inferência da Vazão	65
3.5.1	<u>Modelo de Regressão Linear (MRL)</u>	66
3.5.2	<u>Redes Neurais Artificiais (RNA)</u>	68
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	73
4.1	Resultados pelo MRL	77
4.1.1	<u>Dados dos Sensores</u>	77
4.1.2	<u>Perfil Reconstituído</u>	80
4.1.3	<u>Comparação entre os Resultados do MRL</u>	83
4.2	Resultados pela RNA	84
4.2.1	<u>Dados dos Sensores</u>	85
4.2.2	<u>Perfil Reconstituído</u>	88
4.2.3	<u>Comparação entre os Resultados da RNA</u>	91
	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS	95
	ANEXO A	99
	ANEXO B	100
	ANEXO C	101
	ANEXO D	106

INTRODUÇÃO

A medição de vazão é necessária em diversas aplicações comerciais e industriais, sendo ainda demandada cada vez mais por outros setores, tal como a medicina. Diferentes requisitos devem ser satisfeitos: características físicas e químicas do fluido, instalação, operação, exatidão, precisão, custo, sensibilidade, confiabilidade, entre outras. Isto estimula a pesquisa e o desenvolvimento de medidores de vazão baseados nos mais variados princípios.

Dentre as possíveis classificações dos medidores duas análises são interessantes: a relação de contato do medidor com o escoamento e à perturbação que o medidor causa ao mesmo. Respectivamente definidas: Considerando o rompimento das barreiras físicas para a medição a classificação pode ser Invasiva ou Não-Invasiva. Em outra análise, dependendo da obstrução ocasionada pela medição a classificação do medidor pode ser Intrusiva ou Não Intrusiva, vide ilustração da figura 1.

Figura 1 – Classificação dos medidores



No caso dos medidores não intrusivos não existe obstrução entre o fluido e o equipamento de medição, o que proporciona uma série de vantagens em comparação com os medidores intrusivos, tais como: ausência de perda de carga, facilidade de instalação, preservação dos sensores e prevenção de contaminação do fluido (Sahzin, 2013).

Estas vantagens têm aumentado o interesse por medidores não intrusivos, com destaque para os medidores por indução magnética e por ultrassom (Doppler ou por

tempo de trânsito). Entretanto, estes medidores também apresentam algumas desvantagens. Segundo Awwa (1989), os medidores magnéticos só podem ser usados com líquidos que tenham condutividade mínima de 200 $\mu\text{S}/\text{m}$. Além disso, para tubulações de pequeno diâmetro, eles se tornam grandes e caros. No caso dos medidores por ultrassom, que utilizam o efeito Doppler, existe a dependência da reflexão de ondas de ultrassom em partículas suspensas no fluido, enquanto os medidores que estimam a vazão por diferença no tempo de trânsito são inadequados para medições em pequenos diâmetros.

As limitações observadas nos medidores por indução magnética e por ultrassom sugerem a necessidade de pesquisar outras técnicas de medição não intrusivas. Uma alternativa é a medição de vazão por convecção forçada ou termal.

Os medidores de vazão termal valem-se da relação entre a transferência de calor e o transporte mássico, baseando-se no princípio da convecção forçada em um canal de escoamento e por isso a medição pode ser realizada de maneira não intrusiva. De acordo com a organização dos componentes sensores e atuadores térmicos, os medidores de vazão termal podem ser divididos em quatro categorias principais: calorimétricos, por tempo de voo (TOF), os anemômetros térmicos e oscilação térmica.

O princípio do calorímetro é baseado na mudança do perfil de temperaturas, próximo ao elemento aquecedor, pelo fluxo de fluido. As características de assimetria, em relação ao aquecimento, do perfil térmico na presença do escoamento podem ser usadas para inferir a vazão (Sazhin, 2013).

O método para medir a velocidade do fluido por meio de sensores TOF consiste em determinar o atraso de tempo de pulso térmico. O aquecedor gera um impulso de aquecimento, e após algum tempo (tempo de voo) sensores de temperatura localizados a jusante do fluxo de fluido percebem o pulso. O atraso de tempo apresenta uma estreita relação com a velocidade do fluido (Ashauer et, 1999; Elwenspoek, 1999).

Os anemômetros térmicos estão entre os medidores de vazão mais comuns. Um elemento aquecido eletricamente esfria, como resultado da troca de calor com o fluido. Assim, é possível determinar a taxa de fluxo por meio da determinação da quantidade de calor transferida do aquecedor para o fluido (Quirino et al, 2014).

Este trabalho tem por objetivo pesquisar e desenvolver um medidor de vazão termal inteligente para baixas vazões de ar (15 m^3/h a 50 m^3/h , limites determinados pela capacidade da bancada de testes) em pequenos diâmetros ($\text{Ø}1'$) utilizando o princípio do calorímetro. Ele deve ser não intrusivo e possuir incerteza menor que 5%

do valor de fundo de escala, sendo que nesta incerteza devem estar considerados os fatores de reprodutibilidade e repetibilidade.

Desta maneira almeja-se obter as informações para avanço na pesquisa de um medidor não intrusivo capaz de ser aplicado para diâmetros pequenos sem extração de energia do fluido. Especificamente, intenta-se contribuir para o desenvolvimento de um medidor capaz de atender às necessidades de aplicação para processos médicos (Plakk, 1998), principalmente no caso da hemodiálise, pois em tal procedimento médico existe a necessidade de manutenção da temperatura do fluido e a quantificação do escoamento.

O trabalho está dividido da seguinte forma: o capítulo 1 apresenta uma comparação das vantagens e desvantagens de alguns dos principais dispositivos de medição de vazão. No capítulo 2, são apresentados de forma sucinta os diferentes princípios de medição por efeito termal, juntamente com a análise teórica do perfil de temperaturas. O capítulo 3 detalha o projeto do medidor termal não intrusivo e a respectiva bancada de testes. O capítulo 4 apresenta a avaliação experimental do medidor proposto e sua bancada experimental. As conclusões e sugestões para trabalhos futuros podem ser encontradas no final do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A. G. Jr.; SOUZA, A. R.. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. 1ª ed., Editora Manole, São Paulo, 2008.
- AWWA. *Flowmeters in Water Supply*. 1ª ed., Denver, American Water Works Association, 1989.
- AGUIRRE, L.A. *Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, 3ª ed., Editora UFMG, 2007.
- ASHAUER, M., H. GLOSCH, F., HEDRICH, N., HEY, H., SANDMAIER AND W. LANG. 1999. *Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two Principles*. *Sensors and Actuators*, 73, pp. 7–13.
- BARBOSA, I. M.; HERNANDEZ, E. M.; REIS, M. C. C.; MELO, O. A. F. *Predições em Ajuste de Curva de Calibração Utilizando Redes Neurais Artificiais*, In: Encontro para a Qualidade Laboratorial - 2007, São Paulo, 2007. CD, 2007.
- BISHOP, C. M. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press, New York, 2001.
- CALIL, A. L. O. *Análise teórico-experimental de transferência de calor conjugada em micro-tubos por termografia de infravermelho e transformação integral*, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2012.
- CASSIOLATO, C.; ALVES, E. O. *Medição de Vazão*. *Controle & Instrumentação* v. 138, 2008.
- DAYHOFF, J. E. *Neural Network Architectures an Introduction*, London, Van Nostrand Reinhold, 1990.
- ELWENSPOEK, M. *Thermal flow micro sensors*, *CAS* 99, 2, pp. 423-425, 1999.
- EVANS, R. P. *Mass Flow Measurement Through*. Idaho State University, Tese de doutorado, 2004.
- FAN, Z.; CAI, M.; XU, W. *Non-invasive and non-intrusive gas flow measurement based on the dynamic thermal characteristics of a pipeline*, IOP Publishing Measurement Science and Technology. 2012.
- FEUERMANN, D.; TAYLOR, H. E; ENGLANDER, S; *Non-intrusive flow measurement by cross-correlation of temperature variations: a tool for building energy diagnostics*, *Energy and Buildings*, Issue 19, pp. 81 – 86, 1992.
- FORTUNA, A. O., *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básico e Aplicações*, EDUSP, São Paulo, 2000.

FUKASAWA, R. *Resolução de problemas de logística ferroviária utilizando programação inteira*. Rio de Janeiro: PUC–Rio, 2002.

GOMES, L. *Modelagem de variáveis qualitativas por meio de redes neurais artificiais: avaliação do uso de análise de correspondência como técnica de codificação*. Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

GUARNIERI, R. A. *Emprego de redes neurais artificiais e regressão linear múltipla no refinamento das previsões de radiação solar do modelo ETA*. São José dos Campos: INPE, 2006.

HAUPTMANN, P.; HOPPE, N.; PUETTMET. *Ultrasonic Sensor for Process Industry*. *IEEE Ultrasonic Symposium*, Vol. 1, pp:369-378, 2001.

HAYKIN, S. *Neural Networks and Learning Machines*, Prentice Hall v.10, 2009.

INCONTROL. *Manual de Operação e Instalação: Computador de Vazão Indicador, Totalizador e Transmissor de Vazão Série MEV3000*, INCONTROL S/A, São Paulo, rev. G, 2008.

INCONTROL. *Manual de Operação e Instalação: VTG Medidor de Vazão Tipo Turbina para Gases*, INCONTROL S/A, São Paulo, ver. D, 2009.

INCROPERA, F.P. “Internal Flow,” in *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., LTC, 2011, pp. 486–502.

JÚNIOR, E. C. *Software Inteligente Embarcado Aplicado à Correção de Erro na Medição de Vazão em Gás Natural*, Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

KNUPP, D. C. *Análise Teórico-Experimental de Transferência de Calor em Nanocompósitos via Transformação Integral e Termografia por Infravermelho*, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE. 2010.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia estatística*, CPRM, Belo Horizonte, 2007.

NAJAFI, M.; Culp, C.; Langari, R., *Performance Study of Enhanced Auto-Associative Neural Networks for Sensor Fault Detection*, Energy Systems Laboratory, 2004.

NGUYEN, Nam-Trung. *Flow Measurement*, 28.9, by CRC Press LLC, 1999.

MEDEIROS, K. A. R. *Análise metrológica da aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífera*, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, PUC-RJ, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2014.

MIRANDA, F. C.; MOTA, F. C. E SILVA, S. J. G., *Um algoritmo para estimação de vazão de gás em poços de petróleo por golfadas*, 6º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2011.

MOAZZENI, T.; JIAN M.; YINGTAO J., *Measurement and Calibration of Thermal Cross-Correlation-Based Flowmeter Operating in Harsh Environment*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on , vol.62, no.8, pp.2280- 2285, Aug. 2013.

OLIVEIRA, M. A. A.; AMARAL, J. L. M. ; AMARAL, J. F. M. ;PINHEIRO, G. R. V.. *Desenvolvimento de um Anemômetro por Convecção Forçada*. I CIMMEC - Primeiro Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, Rio de janeiro, Brasil, 2008.

OLIVEIRA, M. A. A. *Desenvolvimento de um Medidor de Vazão Termal Inteligente*, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, UERJ/PEL, 2010.

OLIVEIRA, M.A.A ; AMARAL, J. L. M. *Auto-ajuste de Sensores*. In: Flávio Vasconcelos; Raimundo C. S. Freire; Sebastian Y.C. Catunda. (Org.). Metrologia e instrumentação: tópicos selecionados.1 ed. Campina Grande: EDUFCG, v. 1, p. 67-94, 2010.

PATERNELLI, L.A. Notas de Aula de Estatística I: Capítulo 9 - Regressão e Correlação.

<http://www.dpi.ufv.br/~paternelli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>, Acesso em 03/02/2015.

PATRA, J. C.; GOPALKRISHNAN, V.; ANG, E. L.; DAS, A. *Neural Network-Based Self-Calibration / Compensation of Sensors Operating in Harsh Environments*, Sensors, 2004.Proceedings of IEEEvol.1, Issue, 24-27 Oct. 2004 pp. 425 - 428.

PEREIRA, J. M. D.; POSTOLACHE, O.; GIRÃO, P. S. *Using a Dual-Channel FDC Device and ANN Techniques to Improve Measurements Accuracy*, Sensors & Transducers Magazine (S&T e-Digest), vol.62, Issue 12, pp.462-472, 2005.

PLAKK, P., LIIK, P. AND KINGISEPP, P. H.*Hot-wire anemometer for spirography*.Med. Biol. Eng. Comput., 1998.p. 17-21.

QUIRINO, T.M.; SOUZA, J.B.;AMARAL, J. L. M.; AMARAL, J.F.M.; OLIVEIRA, M. A. A. *Métodos Inteligentes para Modelagem e Ajuste de um Medidor de Vazão Termal*, Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 2014.

RACHALSKI, A. 2006.*High-precision anemometer with thermal wave.*, Rev. Sci. Instrum., 77, 095107-1.

RIVERA, J.; CARRILLO, M.; CHACÓN, M.; HERRERA, G.; BOJORQUEZ, G. *Self-Calibration and Optimal Response in Intelligent Sensors Design Based on Artificial Neural Networks*, Sensors ISSN 1424-8220, n.7, pp.1509-1529, 2007.

ROSÁRIO, J. M. Automação industrial. São Paulo: Editora Baraúna, 2009.p. 62-71.

SACHENKO, A.; KOCHAN, V.; TURCHENKO, V. *Intelligent System for Prediction of Sensor Drift*, In Proc. of International Workshop on Virtual and Intelligent Measurement Systems, Annapolis, USA, pp. 88-92, 2000.

SAMPAIO, P. T. *Modelagem Térmica de um Forno Panela utilizando Redes Neurais Artificiais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais - PPGEE/UFMG: Belo Horizonte, 2006.

SAZHIN, O. 2013. *Novel mass air flow meter for automobile industry based on thermal flow microsensor. I. Analytical model and microsensor*. Flow Measurement and Instrumentation, 30,60–65.

SMITH, B. M.; PISCITELLI, S.; LIVREA, A., *Pulsed thermistor technique for measuring very low liquid flow rates*, Review of Scientific Instruments , vol.52, no.10, pp.1565,1568, 1981.

TAYLOR, J. *Selecting the right Flow Meter for your Hydronic System*, il. Disponível em: <http://woodharbinger.com/site/index.php/>. Acesso em: 10/02/2015.

REYES SÁNCHEZ; JAVIER, E. *Sistema de monitoramento de múltiplos sensores por redes neurais auto-associativas e lógica fuzzy*, Dissertação mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

VIANA, U. B., *Instrumentação Básica II - Vazão, Temperatura e Analítica - Instrumentação*, SENAI - ES/CST, 1999.