



Carla Cito Accioly

**Confiabilidade metrológica da supervisão de vazão em
sistema de resfriamento a água em usinas hidrelétricas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando

Rio de Janeiro

Abril de 2007



Carla Cito Accioly

Confiabilidade metrológica da supervisão de vazão em sistema de resfriamento a água em usinas hidrelétricas

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora e homologada pela Coordenação Setorial de Pós-Graduação, formalizado pelas respectivas assinaturas.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Alcir de Faro Orlando
Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Profa. Dra. Maria Helena Farias
INMETRO – Instituto de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

Prof. Dr. José Alberto dos Reis Parise
Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Dr. Pedro Campos Cunha Roquette
Instituto de Pesquisas da Marinha

Dra. Andrea Teixeira Leiroz
Det Norske Veritas

Coordenação Setorial de Pós-Graduação:

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial de Pós-Graduação do
Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 16 de abril de 2007.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Carla Cito Accioly

Graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Santa Úrsula, em 1992. Engenheira de Instrumentação na Refinaria de Petróleo de Manguinhos, de 1994 a 1996. Engenheira de Instrumentação Sênior na Internacional Engenharia, de 1996 a 1998, Engenheira Eletricista Sênior na Light Serviços de Eletricidade S.A., a partir de março de 1998.

Ficha Catalográfica

Accioly, Carla Cito

Confiabilidade metrológica da supervisão de vazão em sistema de resfriamento a água em usinas hidrelétricas / Carla Cito Accioly ; orientador: Alcir de Faro Orlando. – 2007.

68 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Metrologia, Qualidade e Inovação) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Medição não intrusiva de vazão. 3. Medidor de desprendimento de vórtices. 4. Vazão da água de resfriamento. 5. Número de Strouhal. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

Dedico este trabalho, com muito amor, ao meu filho Paulo Gabriel, aos meus pais Eugênia e Carlos, meu irmão Antides e às minhas queridas Giovanna e Verônica.

Agradecimentos

Aos meus orientadores Professor Alcir de Faro Orlando e Maria Helena Farias, pelo estímulo, orientação, conhecimento e parceria para realização deste trabalho.

Ao professor Maurício Nogueira Frota, pelos ensinamentos que me proporcionou durante o mestrado.

À LIGHT, pela oportunidade ímpar que me possibilitou cursar e finalizar este mestrado na PUC-Rio.

Ao INMETRO, pela participação de seus profissionais.

Ao Evêmero Calegário, pela sua colaboração técnica durante o desenvolvimento da parte experimental.

À ANEEL, por incentivar o desenvolvimento da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico no Setor Elétrico.

À LIGHT Serviços de Eletricidade S.A., que através de seu Programa de Pesquisa e Desenvolvimento com a ANEEL financiou este projeto para a PUC-Rio.

Resumo

Accioly, Carla Cito; Orlando, Alcir de Faro (Orientador). **Confiabilidade Metrológica da Supervisão de Vazão em Sistema de Resfriamento a Água em Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 2007. 68p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A supervisão da vazão da água de resfriamento em equipamentos de produção de energia de usinas hidrelétricas tem sido uma questão de preocupação devido à possibilidade de obstrução dos equipamentos de medição pela água sem tratamento. Outrossim, por razões econômicas, um instrumento barato e confiável deve ser escolhido para os vários pontos de monitoramento. Neste trabalho, um dispositivo não intrusivo foi desenvolvido, tendo seu desempenho avaliado para a medição da vazão da água na faixa de 0,7 a 7 m³/h. O princípio básico de operação é a variação da frequência de formação de vórtices como função da vazão. Um acelerômetro colocado na parede externa de uma tubulação mede a frequência de vibração induzida pelos vórtices. Vários testes mostraram que o instrumento é sensível a ruídos, que devem ser filtrados para a redução da incerteza de medição. O número de Strouhal foi avaliado como função do número de Reynolds do escoamento, mostrando um comportamento assintótico para números de Reynolds elevados. O instrumento diferencia nitidamente a existência ou não de escoamento. Presentemente, um esforço para condicionamento do sinal está sendo feito para a redução da incerteza de medição da vazão, que é estimada nesta dissertação.

Palavras-chave

Metrologia. Medição não intrusiva de vazão. Medidor de desprendimento de vórtices. Vazão da água de resfriamento. Número de Strouhal.

Abstract

Accioly, Carla Cito; Orlando, Alcir de Faro (Advisor). **Metrological Reliability of Flow Rate Measurement in Hydroelectrical Cooling Water System** Rio de Janeiro, 2007. 68p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The supervision of the cooling water flow rate in power producing equipments of hydro-electric plants has been an issue of concern due to the possibility of clogging up measurement instruments by the used non treated flowing water. Furthermore, for economic reasons, a cheap and reliable instrument must be chosen for each of the many monitoring points. In this work, a non-intrusive device was developed and its performance analyzed for measuring water flow rate in the 0,7 to 7 m³/h range. The basic operating principle is the variation of the vortex shedding frequency with flow rate. An accelerometer placed outside the pipe wall measures the vortex induced vibration frequency. Several tests showed that the instrument is noise sensitive, which must be filtered to reduce the uncertainty of measurement. The Strouhal number was plotted as a function of the flow Reynolds number, showing an asymptotic trend towards an approximately constant value at high Reynolds numbers. The instrument sharply differentiates between flow and non-flow situations. Presently, a signal conditioning effort is being conducted to reduce the uncertainty of measurement of the flow rate, which is estimated in this dissertation.

Keywords

Metrology. Non-intrusive flow rate measurement. Vortex shedding meter. Cooling water flow rate. Strouhal number.

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Histórico	13
1.2. Equipamentos para medição de vazão utilizados na LIGHT	14
1.3. Equipamentos em estudo	18
1.3.1. Medidor tipo Vortex	18
1.3.2. Extensômetro Resistivo	19
1.3.3. Acelerômetro	19
1.4. Objetivos	20
1.5. Metodologia	20
1.6. Estruturação deste trabalho	21
2. Fundamentos Teóricos	23
2.1. Medição de vazão	23
2.2. Sistema de medição de vazão com extensômetro	31
2.2.1. Princípio de Funcionamento do Extensômetro Resistivo	31
2.2.2. Aplicação do extensômetro no Sistema de Medição de vazão	34
2.2.3. Variação da resistência do extensômetro	36
2.3. Sistema de medição de vazão com acelerômetros	37
2.3.1. Princípio de Funcionamento do Acelerômetro	37
2.3.2. Aplicação do acelerômetro no Sistema de Medição de vazão	39
3. Procedimento Experimental	42
3.1. Sistema de medição de vazão com extensômetro	42
3.1.1. Montagem dos extensômetros (strain-gages)	44
3.1.2. Características técnicas dos extensômetros	44
3.2. Sistema de medição de vazão com acelerômetros	45
3.2.1. Montagem dos acelerômetros	45
3.2.2. Características técnicas dos acelerômetros	46
3.3. Análise das Incertezas	47
3.3.1. Na medição de vazão utilizando-se extensômetro	47
3.3.2. Na medição de vazão utilizando-se acelerômetro	48
4. Análise de Resultados	50
4.1. Medição de vazão com extensômetro	50
4.2. Medição de vazão com acelerômetros	53
4.3. Montagem do equipamento em campo	61
5. Conclusões e Recomendações	65
Referências Bibliográficas	67

Lista de figuras

Figura 1 – Máquina Limpa Grades retirando algas da Tomada d'Água da Usina de Fontes Nova	13
Figura 2 – Medidor de Vazão Tipo Turbina - Desmontado para Manutenção	15
Figura 3 – Medidores Tipo Palheta – Danificados pelo desgaste provocado pelos sólidos em suspensão existentes na água	16
Figura 4 – Filtro de água antes da manutenção	17
Figura 5 – Filtro de água após a manutenção	17
Figura 6 – Cinturão de Vórtices de Von Karman. [6]	19
Figura 7 – Placa de Orifício	24
Figura 8 – Medidor Tipo Deslocamento Positivo	25
Figura 9 – Medidores do Tipo Eletromagnético	27
Figura 10 – Medidor de Vazão Tipo Turbina	28
Figura 11 – Medidores de Vazão do Tipo Ultra – Som	29
Figura 12 – Medidores de Vazão do Tipo Vórtex [9]	30
Figura 13 – Corpo Deformado por uma força de tração [10]	32
Figura 14 – Extensômetro Elétrico Resistivo [10]	34
Figura 15 – Ponte de Whestone	37
Figura 16 – Sistema de massa e mola usado para medir aceleração [11]	38
Figura 17 – Sistema de massa usado para medir aceleração [11]	39
Figura 18 – Variação do número de Strouhal com o número de Reynolds para cilindros [8]	41
Figura 19 – Sistema de Medição de Vazão	43
Figura 20 – Montagem dos Extensômetros	44
Figura 21 – Montagem do acelerômetro e comparação de posições dos sensores com as dos extensômetros	46
Figura 22 – Extensômetros – Ponte de Wheatstone	51
Figura 23 – Extensômetro – Resposta do Medidor para medição de Vazão	52
Figura 24 – Posição dos eixos X e Y na tubulação	54
Figura 25 – Acelerômetro - Variação de frequência com vazão, eixo x	55
Figura 26 – Acelerômetro - Variação de voltagem (mV) com vazão, eixo	55
Figura 27 – Acelerômetro - Variação da Vazão com Frequência, acoplamento rígido eixo x	56
Figura 28 – Acelerômetro - Variação de Strouhal com Reynolds, eixo x	56
Figura 29 – Acelerômetro - Variação da Vazão com Frequência, acoplamento flexível eixo x	58
Figura 30 – Calibração do medidor : Strouhal (S) versus Reynolds (Re). Acoplamento flexível com o vaso de pressão	59
Figura 31 – Identificação da presença de fluido escoando. Vazão de 3,28 L/s. Acoplamento flexível entre tubulação e vaso de pressão	61
Figura 32 – Montagem do acelerômetro na Usina Fontes Nova, após uma válvula	62
Figura 33 – Detalhe da montagem do acelerômetro na Usina Fontes Nova, após uma válvula	63
Figura 34 – Instrumentação para medição do sinal do acelerômetro	63
Figura 35 – Instrumentação para medição do sinal do acelerômetro	64

Lista de tabelas

Tabela 1: Valores dos parâmetros para projeto	36
Tabela 2: Parâmetros Calculados	36
Tabela 3: Parâmetros Calculados	50
Tabela 4: Variação da resistência dos extensômetros com a vazão de água na tubulação (0 a 14 m ³ /h)	51
Tabela 5: Valores medidos, parâmetros calculados e incertezas com acoplamento rígido entre a tubulação e o vaso de pressão	57
Tabela 6: Valores medidos, parâmetros calculados e incertezas com acoplamento flexível entre a tubulação e o vaso de pressão	60

Lista de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNV – Det Norske Veritas Certification
DEM – Departamento de Engenharia Mecânica
EMI – Electro Magnetic Interference
EPUSP – Escola Politécnica da USP - Universidade de São Paulo
Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPQM – Instituto de Pesquisas da Marinha
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas - São Paulo
PósMQI – Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação
PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SBM – Sociedade Brasileira de Metrologia
SI – Sistema Internacional de Unidades
STP – Standard Temperature and Pressure
VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia
USP – Universidade de São Paulo

Lista de Símbolos

A – Área da seção transversal
a – Aceleração
B – Intensidade de campo magnético
C – Capacitância
D – Diâmetro nominal do tubo
E - módulo de elasticidade do material
F – Força e frequência
FEM – Força eletromotriz induzida
I – Corrente elétrica
K – Constante
L - comprimento
M – massa
N – n.º de amostras
n – Frequência
P – Pressão
Q – Vazão
Re – N.º de Reynolds
r – resistência
S – N.º de Strouhal
t – Tempo
U – incerteza
V – Velocidade
DV – Diferença de tensão elétrica
x – Deslocamento
 X_i – Amostra
 \bar{X} - Média
Y – Módulo de Young
 ε – Deformação
 μ – coeficiente de Poisson
 ρ – massa específica
 Ω – resistividade do condutor
 σ – tensão
 ν – viscosidade
 Σ – Somatório