

**Velfe Hollandino de Oliveira Júnior**

**Validação metrológica de alternativa tecnológica  
para mitigação de incrustação em trocadores de calor**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Maurício Nogueira Frota  
Co-orientador: Dr. Epifanio Mamani Ticona

Rio de Janeiro  
Setembro de 2015



**Velfe Hollandino de Oliveira Júnior**

**Validação metrológica de alternativa tecnológica  
para mitigação de incrustação em trocadores de calor**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Maurício Nogueira Frota**

Presidente / Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

**Dr. Epifanio Mamani Ticona**

Co-orientador

Instituto de Energia – PUC/Rio

**Profª Elisabeth Costa Monteiro**

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

**Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa**

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de setembro de 2015

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

### **Velfe Hollandino de Oliveira Júnior**

Formado em Licenciatura Plena em Física (2010) pela Faculdade Moacyr Sreder Bastos. Professor de Física na rede estadual de ensino do Rio de Janeiro. Pesquisador do Projeto de P&D Light-Aneel Ref.: 07/2011, *Proposição de solução inovadora para limpeza dos trocadores de calor dos hidrogeradores da Usina Fontes Nova*.

### **Ficha Catalográfica**

Oliveira Júnior, Velfe Hollandino de

Validação metrológica de alternativa tecnológica para mitigação de incrustação em trocadores de calor / Velfe Hollandino de Oliveira Júnior ; orientador: Mauricio Nogueira Frota ; co-orientador: Epifanio Mamani Ticona. – 2015.

90 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2015.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Trocadores de calor. 3. Mitigação de incrustações. 4. Hidrogeradores. 5. Efetividade térmica. 6. Esferas abrasivas. I. Frota, Mauricio Nogueira. II. Ticona, Epifanio Mamani. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. IV. Título

*“Dedico esta obra ao  
meu amor maior: Bernardo  
Fanini Maia de Oliveira, meu  
filho.”*

## Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus que permitiu que tudo acontecesse, ao longo de minha vida. Ele é, e será sempre, o Mestre de todos os mestres.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao professor Maurício Nogueira Frota, pela oportunidade de trabalhar de forma independente, pela sua confiança demonstrada e por sua firme orientação, apoio, pela sua incrível capacidade de liderança motivadora, sabendo encorajar-nos em todos os momentos e fazendo acreditar que sempre somos capazes.

Ao co-orientador Epifânio Mamani Ticona pela sua paciência e presteza, sempre com uma solução inteligente para os mais difíceis problemas.

Às Equipes PUC-Rio e da Usina Fontes Nova, responsáveis pelo desenvolvimento do P&D Light/Aneel 07/2011, os agradecimentos pelo incondicional apoio recebido em todos os dias de desenvolvimento desta pesquisa, em particular ao Gerente do Projeto Gilson Valente e Engenheiro Renato Osório pelo estímulo na busca de uma alternativa tecnológica capaz de substituir onerosas técnicas tradicionais de manutenção por uma solução inovadora de manutenção sem a necessidade de interromper a geração. Na pessoa dos dedicados técnicos Gabriel de Oliveira Neves e Jairo Hidalgo Jasmin, deseja-se agradecer a todos os demais profissionais da Usina Fontes Nova que colaboraram na prestação de serviços de apoio a este trabalho. Igualmente são registrados os agradecimentos à Coordenação de P&D da Light pela oportunidade de contribuir para agregar inovação tecnológica nas práticas da usina por meio do Projeto de P&D 07/2011, em cujo contexto esta pesquisa de mestrado foi desenvolvida.

A todos os professores do programa pelo conhecimento compartilhado com tanto entusiasmo e afetividade nas brilhantes aulas que tive oportunidade de receber enquanto aluno do programa POSMQI.

A minha mãe Eunice Oliveira e Meu pai Velfe Oliveira por todo apoio e incondicional amor em todos os momentos da minha vida. Aos meus irmãos Núbia, Cíntia, Fábio pelo carinho respeito e inspiração para minha trajetória. Ao colegas de classe pelas momentos divertidos que passamos. Ao meu amor maior, o motivo da transformação em minha vida Bernardo Fanini. Ao meu irmão cubano Alejandro Martinez, por sua fiel amizade e Eduardo Araújo, um irmão que sempre sustentou com seus sábios conselhos nossa firme amizade.

## Resumo

Oliveira, Velfe Hollandino de. Frota, Mauricio Nogueira (Orientador). Ticona, Epifanio Mamani (Co-orientador). **Validação metrológica de alternativa tecnológica para mitigação de incrustação em trocadores de calor**. Rio de Janeiro, 2015. 90p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Problemas com incrustações em equipamentos são frequentes em equipamentos de resfriamento de mancais de turbinas hidráulicas e hidrogeradores, drasticamente comprometendo a sua eficiência de operação. Pesquisas aplicadas buscam a eficiência térmica dos trocadores de calor por meio da mitigação do *fouling* formado nesses equipamentos. Esta dissertação de mestrado tem por **objetivo** avaliar a eficácia de uma alternativa tecnológica de limpeza dos tubos do trocador de calor que faz uso de esferas abrasivas para mitigar indesejáveis incrustações em trocadores de calor utilizados no arrefecimento de hidrogeradores. A **motivação** da pesquisa deu-se no contexto do projeto de P&D Light-Aneel Ref.: 07/2011, *Proposição de solução inovadora para o sistema de resfriamento dos hidrogeradores da Usina Fontes Nova*, desenvolvido pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio. Superando o desafio de oferecer um método de limpeza que evita a raspagem mecânica e o uso de produtos químicos, o trabalho construiu um equipamento e validou uma alternativa tecnológica de limpeza, que opera *on-line*, portanto sem a necessidade de parada técnica da usina para realizar a manutenção. A metodologia utilizada fundamenta-se na análise do desempenho hidrodinâmico e térmico do trocador de calor quando assistido pelo sistema proposto. Dentre os **resultados**, destacam-se (i) o caráter prático da alternativa de limpeza proposta, que realiza a limpeza sem a necessidade de interromper a geração e (ii) o estudo da velocidade ótima das esferas para assegurar eficácia do processo de desobstrução dos trocadores. Os resultados favoráveis dos testes de desempenho realizados em laboratório e no campo consubstanciam a **conclusão** do trabalho, permitindo validar a técnica e o protótipo de equipamento construído para ser utilizado nas condições reais de operação da usina.

## Palavras-chave

Metrologia; trocadores de calor; mitigação de incrustações; hidrogeradores; efetividade térmica; esferas abrasivas.

## Abstract

Oliveira, Velfe Hollandino de. Frota, Mauricio Nogueira (Advisor). Ticona, Epifanio Mamani (Co-advisor). ***Metrological validation of new method for fouling mitigation in heat exchangers***. Rio de Janeiro, 2015. 90p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Formation and deposit of fouling is a common problem encountered in heat exchangers, bearings of hydraulic and hydro turbines, drastically reducing their operation efficiency. Applied research continuously seeks for gains in thermal efficiency by encouraging fouling mitigation in the internal passages of heat exchangers. This dissertation **aims** to evaluate the effectiveness of a technological alternative for cleaning heat exchanger tubes by the use of abrasive spheres to mitigate undesirable fouling in heat exchangers used in hydro generators cooling. The **motivation** of the research took place in the context of the R&D project Light-Aneel 07/2011, entitled *Innovative solution for fouling mitigation of heat exchangers used in the cooling system of the Fontes Nova Power Plant*, developed by the postgraduate Metrology Programme of Catholic University of Rio de Janeiro, financed under a Brazilian government regulated R&D Programme. Overcoming the challenge of providing a cleaning method that prevents the mechanical scraping and the use of chemicals, a prototype of an equipment was built and validated as a technological alternative cleaning tool, which operates online, therefore without the need to shutdown the power plant to perform the heat exchanger maintenance. The **methodology** is based on the analysis of hydrodynamic and thermal performance of the heat exchanger when assisted by the envisioned system. Among the **results** achieved, the work highlights (i) the practical character of the cleaning alternative proposed, which performs the cleaning without the need to interrupt the electrical energy generation and (ii) the study of the optimum speed that must be imposed to the abrasive spheres to ensure effectiveness of the unclogging process of the exchangers. The favourable results emerged from the performance tests carried out in the laboratory and in the field environments substantiate the **conclusion** of the work, validating the technical method and the prototype of the equipment to operate in the real conditions of the power plant.

## Keywords

Metrology; heat exchangers; fouling mitigation; hidrogeradores; termal effectiveness; abrasive spheres.

## Sumário

1 Introdução	15
1.1. Definição e caracterização do problema da pesquisa	17
1.2. Motivação	18
1.3. Objetivo geral	18
1.4. Objetivos específicos	18
1.5. Justificativa	19
2 Alternativa tecnológica de limpeza por esferas abrasivas	20
2.1. Sistemas abertos sem recirculação de água	20
2.2. Tecnologias de limpeza de trocadores de calor	21
2.3. Tecnologias <i>on-line</i>	23
2.4. Seleção das esferas para assegurar eficiência da limpeza	24
2.5. Tipos de esferas abrasivas	25
2.6. Outros tipos de esfera	27
2.7. Deterioração da esfera e redução de sua vida útil	28
2.8. Período de atividade	29
2.9. Inutilização ou perda de esferas	29
2.10. Seleção do tipo de esfera a ser utilizada	30
2.11. Rigidez da esfera e sua eficiência na limpeza	31
2.12. Número ótimo de esferas	32
3 Monitoramento da incrustação: estudo do caso	34
3.1. Transmissão remota de dados	35
3.2. O sistema de medição SISMED/SIMPAR	35
3.2.1. Hardware do sistema SISMED	36
3.2.2. Sistema de aquisição de dados e controle modular Beckhoff	36
3.2.3. O pré-processamento de dados	37
3.3. Medição de temperatura	38
3.3.1. Medição de pressão	39
3.3.2. Monitoramento da vazão da água de resfriamento	39



3.4. Estudo de desempenho do sistema de trocadores de calor	43
3.4.1. Simulador de paradas (SIMPAR)	50
3.4.2. Correlação entre resistência térmica e índice de incrustação	52
4 Alternativa tecnológica de limpeza do trocador de calor	55
4.1. Caracterização do trocador de calor utilizado	55
4.2. O sistema de injeção e recuperação de esferas	57
4.3. Caracterização do sistema injetor de esferas abrasivas	58
4.4. Fluxo de transporte das esferas abrasivas	58
4.5. Vazão volumétrica e velocidade de escoamento	58
4.6. Concepção, construção, operação e validação do SIREA	59
4.6.1. Concepção do SIREA	59
4.6.2. Construção do protótipo e descrição da operação do SIREA	62
4.7. Operação do Sistema Injetor de esferas acoplado ao trocador	65
4.7.1. Visualização do escoamento no interior do trocador	66
4.7.2. Dimensionamento da bomba de operação do SIREA	67
4.8. Introdução de melhorias incrementais no protótipo do SIREA	71
4.8.1. Implementação de melhorias incrementais no SIREA	71
5 Avaliação do protótipo do SIREA no ambiente da usina	74
5.1. Estado de incrustação pelo processo de limpeza tradicional	74
5.2. Teste do protótipo do SIREA na usina hidrelétrica	75
5.3. Trabalho Experimental	77
5.3.1. Experimentos realizados	77
5.3.2. Desempenho do SIREA: inspeção dos tubos pós limpeza	79
5.3.3. Refinamento da limpeza: lavagem com água sob pressão	81
5.4. Considerações finais sobre o teste realizado	82
6 Conclusões e recomendações	84
6.1. Conclusões e recomendações	84
6.2. Recomendações para desdobramentos futuros	87
7 Referencias Bibliográficas	88

## Lista de Figuras

Figura 1: Esquema de trocador de calor sem recirculação de água	21
Figura 2: Técnicas de mitigação de incrustação	22
Figura 3: Remoção de incrustação por esfera abrasiva	24
Figura 4: Tubos de titânio com manganês após limpeza	26
Figura 5: Tipos de esferas abrasivas	26
Figura 6: Efeito do diâmetro da esfera na pressão do fluido	27
Figura 7: Tipos de esferas com cerdas	28
Figura 8: Esfera após uso, comparada à esfera sem uso	28
Figura 9: Total de esferas por ciclo de limpeza	29
Figura 10 : Desgaste das esferas por ciclo de limpeza	29
Figura 11: Ciclos de limpeza por esferas abrasivas	30
Figura 12: Corte da esfera tipo padrão	31
Figura 13: Desempenho das esferas macias vs. de alta dureza	32
Figura 14: Medição remota e transmissão <i>on-line</i> de dados	34
Figura 15: Componentes SISMED/SIMPAR do sistema de medição	35
Figura 16: Comunicação BECKHOFF/Protocolo TCP/IP	36
Figura 17: Sistema de comunicação Beckhoff-PC - LabView	37
Figura 18: Tela do sistema de monitoramento local na usina	38
Figura 19: Sistema de água de refrigeração dos trocadores	40
Figura 20: Componentes do sistema de medição	40
Figura 21: Posicionamento do medidor de vazão	41
Figura 22: Princípio de funcionamento do medidor ultrassônico	42
Figura 23: Sondas e conversor de sinal do medidor ultrassônico	42
Figura 24: Esquemático da instalação do medidor de vazão	42
Figura 25: Parede da tubulação de transporte do fluido	43
Figura 26: Vazão de água no trocador de calor	45
Figura 27: Temperatura da água no trocador de teste	45
Figura 28: Temperatura da água no trocador de referência	46
Figura 29: Temperatura do ar no trocador de teste	46
Figura 30: Temperatura do ar no trocador de referência	47
Figura 31: Pressão da água no trocador de teste	47
Figura 32: Pressão da água no trocador de referência	48
Figura 33: Vazão de ar de resfriamento do hidrogerador	49
Figura 34: Evolução da razão $\Delta P/m^2$	49

Figura 35: Resistência térmica induzida pela incrustação	50
Figura 36: Esquema do modelo de resfriamento do hidrogerador	51
Figura 37: Esquema do sistema hidráulico de resfriamento	52
Figura 38: Sistema na ausência de <i>fouling</i>	53
Figura 39: Resistência térmica vs. fator de incrustação	54
Figura 40: Corte longitudinal do tubo aletado	55
Figura 41: Processo convencional de limpeza	56
Figura 42: Identificação do trocador de calor testado	56
Figura 43: Esquemático e componentes do SIREA	61
Figura 44: SIREA acoplado ao trocador de calor	61
Figura 45: Versão preliminar do equipamento construído (SIREA)	62
Figura 46 Alimentação de esferas no sistema de limpeza	63
Figura 47: Esferas abrasivas no interior do sistema injetor	65
Figura 48: visualização das esferas abrasivas em ação	67
Figura 49: Curvas características das bombas testadas	68
Figura 50: Bomba selecionada para operação do SIREA	69
Figura 51: Diagrama para seleção da bomba KSB	70
Figura 52: Curvas características da bomba KSB 40-200.	70
Figura 53: Ilustração da versão final do protótipo do SIREA	71
Figura 54: Pressão de teste na câmara de recuperação	72
Figura 55: Câmara de alimentação de esferas	73
Figura 56: Melhorias no sistema injetor de esferas abrasivas	73
Figura 57: Trocador de calor após 365 dias de operação	75
Figura 58: Acoplamento do SIREA no trocador da usina	75
Figura 59: Testes de desempenho do SIREA na usina	76
Figura 60: Trocador de calor submetido ao processo de limpeza	79
Figura 61: Inspeção do TC após passagem das esferas	80
Figura 62: Eficácia da limpeza por esferas	81
Figura 63: Grau de impregnação das esferas abrasivas	81
Figura 64: Limpeza do trocador pela técnica convencional	82
Figura 65: Pressão positiva na saída do trocador em operação	83
Figura 66: Resistência térmica no período de incubação	85

## **Lista de tabelas**

Tabela 1: Abrasividade das esferas	25
Tabela 2: Características técnicas das bombas testadas	69
Tabela 3 : Níveis de pressão na operação do SIREA	79

## **Lista de quadros**

Quadro 1: Condições de operação e manobra das válvulas do SIREA	64
---	----

## Lista de Abreviações

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
CCPJ	Coordenação Central de Pós-Graduação e Pesquisa
CPU	Central de processamento
LEM	Laboratório de Ensaios Mecânicos
LEV	Laboratório de Engenharia Veicular do ITUC/PUC-Rio
MPE	Material polimérico extracelular
MQI	Metrologia Qualidade e Inovação
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PIG	<i>Pipeline inspection gauges</i>
PUC	Pontifícia Universidade Católica
SIMPAR	Simulador de paradas
SIREA	Sistema de injeção e recuperação de esferas abrasivas
SISMED	Sistema de medição

## Lista de Símbolos

$A$	Área
CT	Coletor de entrada
CS	Coletor de saída
CT	Conversor de temperatura
$d_t$	Diâmetro do tubo
$\varepsilon$	Efetividade do trocador de calor
$F_i$	Fator de incrustação
$\dot{m}$	Variação de massa
$\Delta P$	Variação de pressão
$P_{be}$	Pressão na entrada do bocal
$P_{bs}$	Pressão na saída do bocal
$P_e$	Pressão na entrada da tubulação de água
$P_s$	Pressão na saída da tubulação de água
$\dot{Q}$	Vazão volumétrica
$R_t$	Resistência térmica
SP	Sensor de pressão
$T_{ae}$	Temperatura na entrada da água
$T_{as}$	Temperatura na saída da água
$U$	Coeficiente global de transferência de calor
$U_l$	Coeficiente global medido na condição de trocador limpo
$V$	Velocidade média do escoamento
V1 ... V4	Válvulas solenoides para abertura/fechamento automático
VE1 e VE2	Válvulas de entrada do SIREA
VR	Válvula reguladora
VS1 e VS2	Válvulas de saída (água de descarte no afluente)
ST	Sensor de temperatura
TC	Trocador de calor
UC	Unidade coletora
UH	Usinas hidrelétricas

# 1

## Introdução

Trocadores de calor (TC) são equipamentos auxiliares essenciais de qualquer sistema de geração de energia. Sabidamente, a efetividade do trocador de calor impacta a operação do sistema de geração, quer em nível operacional, econômico ou ambiental.

A água captada no canal de fuga das turbinas é, via de regra, o fluido de trabalho dos TC utilizados no sistema de arrefecimento dos hidrogeradores. O acúmulo de compostos orgânicos e inorgânicos nos dutos internos do TC é fortemente agravado pela presença de agentes (resíduos) de natureza orgânica, inorgânica ou de matéria viva presentes nas águas de refrigeração que circulam pelos TC. A indesejável presença desses agentes resulta na formação do fenômeno da incrustação (*fouling* ou *biofouling*), que influencia diretamente na eficácia de operação desses equipamentos auxiliares como afirma (Tonin, 2003), portanto comprometendo a sua capacidade de refrigerar o gerador acoplado ao eixo da turbina e seus mancais.

No caso do *biofouling* (*fouling* composto de matéria viva), este fenômeno pode resultar de complexo processo de formação do acúmulo de depósitos bióticos devido a processos físicos, químicos e biológicos, formando uma camada artificial acima da superfície nos canais internos do TC (Frota *et al.*, 2014). O processo de formação de incrustação consiste em diversas etapas, a saber: (i) transferência de massa de macromoléculas pela superfície e formação de uma camada de absorção; (ii) transporte de microrganismos para a camada de absorção; (iii) adesão irreversível de células nas superfícies; (iv) remoção das células da superfície; (v) estabilização de uma ligação forte entre os microrganismos e a camada da superfície; (vi) transferência de massa de nutrientes através do biofilme em conexão com o transporte de material que se deposita na superfície interna do trocador; (vii) metabolismo celular, incluindo a produção de novas células e polímeros extracelulares; e (viii) retirada, através de

limpeza, do biofilme quando este atinge uma espessura crítica não tolerável (Bott, 1995).

A presença de resíduos e poluentes nas fontes primárias de água tem se constituído em crescente fonte de preocupação de ambientalistas e gestores públicos responsáveis pelo controle e fiscalização de poluição e descarga de dejetos e rejeitos industriais nos mananciais e reservatórios de água. Preocupação essa que é, cada vez mais, compartilhada por profissionais de diferentes áreas que são diretamente afetados pela qualidade da água em seus sistemas e dispositivos de arrefecimento (Oliveira *et al.*, 2015). Esse é o caso de usinas hidrelétricas (UH) cujos sistemas de refrigeração do gerador ou dos mancais dos hidrogeradores (turbina e gerador) fazem uso de grandes volumes de água para arrefecimento dos fluidos de processo (óleo ou ar) nos TC que integram os sistemas térmicos de refrigeração.

Objeto desta pesquisa de mestrado, a usina Hidrelétrica Fontes Nova, de propriedade da concessionária Light Energia (localizada no município de Pirai, RJ), possui em operação um conjunto de três unidades hidrogeradoras (turbina tipo Francis, de eixo vertical), cada uma com capacidade nominal de geração de 44 MW. Consome cerca de 7 400 litros/minuto ( $444 \text{ m}^3/\text{h}$ ) de água utilizada para refrigeração de dispositivos mecânicos, a saber: (i) mancais de escora; (ii) juntas de carvão para vedação do eixo; (iii) TC para resfriamento dos fluidos de processo óleo e ar; e (iv) refrigeração dos transformadores, Incluindo os consumos de unidades complementares (bancos de transformadores). O consumo total de água de refrigeração associado à operação das três unidades hidrogeradores da usina Fontes Nova é da ordem de 26 400 litros/minuto ( $1\,584 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Tendo em vista que cada uma das três turbinas Francis é abastecida (engolimento) com de  $19 \text{ m}^3/\text{s}$  de água (água de geração), resultando numa vazão global de  $57 \text{ m}^3/\text{s}$  nas três turbinas. Assim, o volume de água de resfriamento ( $0,44 \text{ m}^3/\text{s}$  ou  $1\,583 \text{ m}^3/\text{h}$ ) representa 0,8% do "engolimento total". Muito embora na configuração atual a água de refrigeração constitua parte da água de geração (já que é captada no canal de fuga), esse é o indicador (0,8% do total da água disponível) para se estimar o volume de água que será necessário quando for considerado um projeto de circuito independente de água de resfriamento.

O acúmulo de resíduos diversos nessas águas criam incrustações nos elementos internos dos TC do sistema de arrefecimento impondo a necessidade de



paradas técnicas (interrupção da geração) para manutenção com uma periodicidade acima do nível aceitável. Representam, portanto, perdas de geração e elevados custos de manutenção.

Assim a presente dissertação se propôs a buscar alternativas tecnológicas inovadoras para solucionar ou amenizar este problema, levando em consideração a preocupação com o meio ambiente e os interesses da usina hidrelétrica Fontes Nova.

### 1.1.

#### **Definição e caracterização do problema da pesquisa**

As pausas para manutenção e limpeza dos trocadores de calor foram sempre motivo de grande desconforto para as usinas, motivando diversos estudos e a proposição de novas técnicas para atenuar os problemas e custos de manutenção resultantes das paradas técnicas de manutenção. As necessárias paradas para uma minuciosa higienização dos trocadores de calor (TC), conhecidas na literatura atual como técnicas de limpeza *off-line*, resultam em prejuízos financeiros e riscos físicos aos operadores responsáveis pela manutenção.

Dentre as técnicas convencionais de limpeza dos TC, as mais usuais são aquelas por varetagem, jateamento de fluido químico, raspagem, jateamento com gralha, projéteis, imersão de vapor, perfuração, escovação e jato de água à alta pressão. A suspensão das atividades é programada estrategicamente ao longo do ano e podem levar de dias até meses para o alinhamento e revisão dos equipamentos dependendo do grau de comprometimento. A técnica *off-line*, por ser um método invasivo, compromete a vida útil dos equipamentos colocando em risco a sua integridade estrutural, além de exposição a riscos de contaminação química dos afluentes próximos à usina. Já o método online de limpeza, quando adequadamente conduzidos, pode representar uma solução eficaz para minimizar paradas técnicas assim evitando os prejuízos computados pela interrupção da geração.

O objeto de estudo dessa pesquisa de mestrado é conceber, construir e validar, em ambientes laboratoriais e em campo, um sistema *on-line* para

promover a limpeza de trocadores de calor utilizados no arrefecimento de hidrogeradores sem a necessidade de interrupção da geração (Neves, 2013).

## **1.2. Motivação**

No contexto de um amplo esforço de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Metrologia que já soma quase uma década de pesquisas na área, a principal motivação contribuir para a proposição de alternativas não poluentes de limpeza de equipamentos suscetíveis a *fouling*.

## **1.3. Objetivo geral**

Esta dissertação de mestrado em metrologia tem como objetivo central conceber, construir e comprovar a eficácia de uma alternativa tecnológica que faz uso de esferas abrasivas para mitigar indesejáveis incrustações em trocadores de calor utilizados no arrefecimento de hidrogeradores sem a necessidade de interromper a geração. Perseguindo este objetivo, o trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre técnicas de mitigação de *fouling* em sistema de arrefecimento de hidrogeradores.

## **1.4. Objetivos específicos**

No que concerne os objetivos específicos, a pesquisa de mestrado visa:

- Projetar e construir um protótipo de um sistema capaz de introduzir e remover esferas abrasivas no interior de trocadores de calor sem a necessidade de paradas técnicas de manutenção, a exemplo do que comumente ocorre com as técnicas convencionais de limpeza.
- Avaliar a eficácia do sistema injetor de esferas abrasivas (SIREA) no ambiente do laboratório da PUC-Rio com o propósito de fazer os ajustes necessários para adequar o protótipo às condições de operação da usina Fontes Novas, selecionados para fundamentar o estudo de caso desta pesquisa de mestrado. Dentre os requisitos técnicos de operação destacam-se: a pressão da bomba hidráulica motriz do sistema injetor de esferas abrasivas; a vazão da água de resfriamento, cujo fluxo impulsiona as esferas e a velocidade adequada das esferas para assegurar remoção da incrustação.

- Avaliar o desempenho do sistema em condições reais de operação no ambiente da usina Fontes Nova.

Estimar o impacto econômico que resulta da aplicação da solução tecnológica proposta.

### **1.5. Justificativa**

A percepção da sustentabilidade para as empresas tem contribuído para uma mais efetiva conscientização sobre as formas de suprir as crescentes demandas por energia e o incentivo ao não desperdício. A lógica econômica preconiza de forma natural à racionalização e não desperdício dos processos de manutenção e operação dos sistemas de geração, dentre os quais se incluem os sistemas de arrefecimento dos hidrogeradores. A justificativa para desenvolvimento deste trabalho resulta da materialização dessa percepção.

O impacto econômico do estudo pode ser facilmente avaliado: o custo pela interrupção na geração de energia elétrica pela indesejável parada de manutenção de uma única turbina em apenas um dia de operação ( $44 \text{ MW} \times 24 \text{ h} = 1\,056 \text{ MWh}$ ) pode ser mensurado para justificar a razoabilidade dos custos. Considerando que a interrupção do fornecimento de energia correspondente ao consumo de 70,8 famílias durante 1 mês (o consumo de energia mensal de uma família é da ordem de 14,9 MWh), investir em tecnologias de limpeza de trocadores de calor que minimizem a interrupção da geração possui um excelente apelo técnico e econômico. Cifra essa que, convertida para valores monetários, indicam um forte impacto econômico: da ordem de R\$ 360 000 (trezentos e sessenta mil reais) por dia se for utilizado um preço médio (entre a tarifa residencial e a industrial) de R\$ 0,341/kwh.

## 2

## Alternativa tecnológica de limpeza por esferas abrasivas

A técnica proposta de limpeza *on-line*, que visa mitigar o efeito do *fouling* nos trocadores de calor, tem como propósito principal retardar ao máximo as paradas técnicas de manutenção da usina. Este capítulo discute as características das esferas abrasivas utilizadas, visto que poucas são as referências na literatura especializada sobre o uso de esferas abrasivas para promover a limpeza dos dutos internos de trocadores de calor. Esta revisão tem também por objetivo investigar a quantidade ideal de esferas e a velocidade ótima para que consigam realizar a limpeza num estágio inicial de formação do *fouling*.

Antes de discutir o uso das esferas abrasivas, o capítulo discute sucintamente as alternativas tecnológicas de limpeza de trocadores de calor utilizados para diferentes propósitos.

### 2.1.

#### Sistemas abertos sem recirculação de água

São dispositivos mecânicos também chamados de sistemas de uma só passagem. Estes são naturalmente pré-dispostos aos problemas de incrustação, justamente pela quantidade de fluido *in natura* e sem tratamento que circula em seu interior para a absorção de calor pela água da fonte que comumente apresenta problemas com *fouling* (Lopes, 1995). Estes resfriadores usam, em sua maioria, o sistema tipo casco e tubo para trocadores de calor. Estes, por sua vez, são ideais para limpeza *on-line* das incrustações conforme comentado no capítulo anterior.

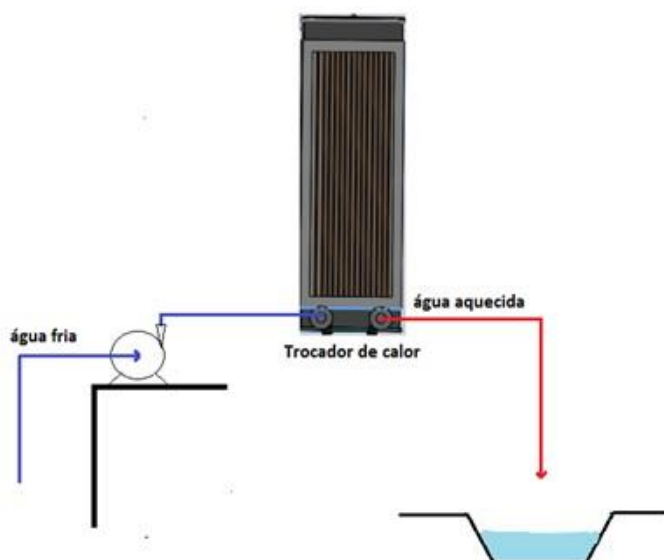
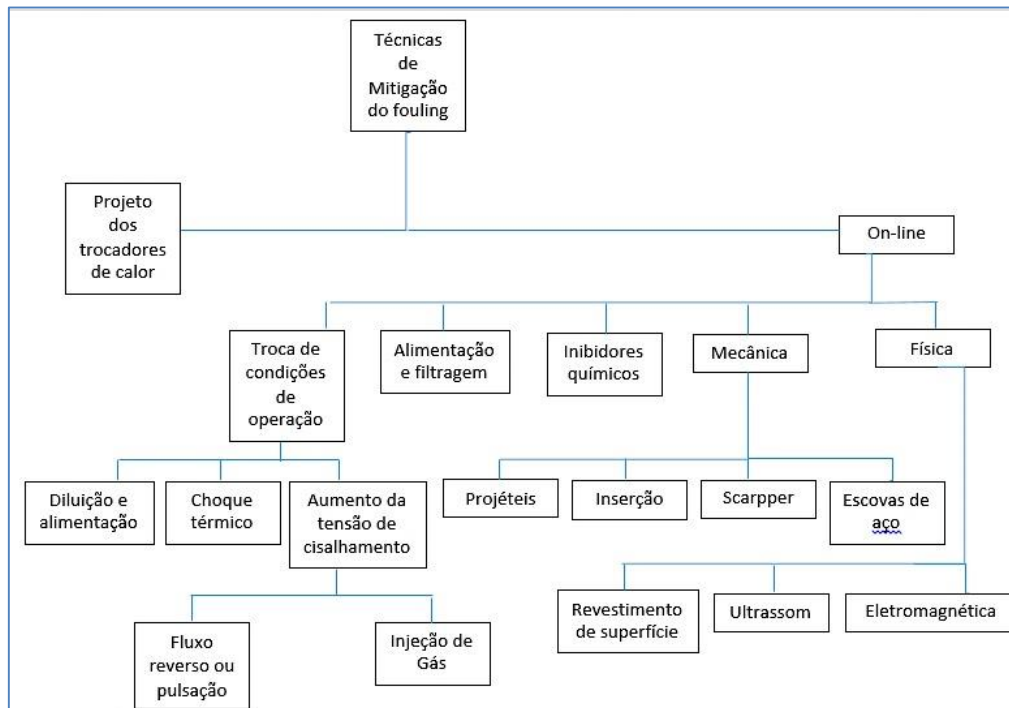


Figura 1: Esquema de trocador de calor sem recirculação de água

## 2.2. Tecnologias de limpeza de trocadores de calor

Os Trocadores de calor (TC) são equipamentos projetados para prover a transferência de calor entre dois ou mais fluidos com diferentes temperaturas (Bejan e Kraus, 2003; Shah, 2006). Para que não haja combinação entre os fluidos de escoamento, estes são separados por superfícies de transferência de calor. O fluxo constante dos fluidos nos tubos aumenta a probabilidade de incrustação nas suas paredes internas (originada por impurezas presentes nos fluidos do trocador, temperatura e vazão), condições de operação que dependem do trocador. As tecnologias de mitigação de depósitos em TC podem ser caracterizadas em dois grupos, *on-line* e *off-line* (Arnal *et al.*, 2012). Uma gama de técnicas *on-line* utilizadas para limpeza dos trocadores de calor é mostrada na figura 2, visto que a técnica por esferas abrasivas é identificada como limpeza mecânica através de projéteis. A inviabilidade técnica do método *off-line* não compensa, não obstante ser, por razões lógicas, o método de mitigação mais comumente empregado na indústria química. O Müller-Steinhagen (2000), elenca as várias desvantagens agregadas à essa técnica: (i) requer processo de inatividade dos trocadores de calor para limpeza e manutenção; (ii) causa acúmulo gradual de incrustação reduzindo o desempenho do sistema; (iii) torna-se nocivo ao meio ambiente (os resíduos e produtos químicos de limpeza exigem disposição especial elevando ainda mais os investimentos com a limpeza, uma vez que a questão ambiental

deve ser respeitada). Os custos com a incrustação e sua abordagem de limpeza *off-line* podem ser analisados segundo as seguintes perspectivas:



**Figura 2: Técnicas de mitigação de incrustação**

Fonte: *Heat Exchanger Fouling: Mitigation and Cleaning Strategies* (Müller-Steinhagen, Malayeri e Watkinson, 2011)

- Redução da produtividade: devido à degradação da eficiência e perda de produção durante paradas planejadas, considerado o principal motivo das despesas que resultam da incrustação.
- Custos de manutenção: aqueles associados à remoção de incrustações e depósitos quer pelo uso de produtos químicos quer por outros métodos, e outros custos operacionais pelo uso de dispositivos *antifouling*. Normalmente, cerca de 8% dos custos com manutenção de uma unidade podem ser atribuídos às atividades de limpeza dos trocadores de calor.

O consumo de energia para superar as incrustações por meio do método *off-line* está entre 1% e 5% da energia utilizada pelo setor indústria (Müller-Steinhagen, Malayeri e Watkinson, 2011). Acredita-se, assim, que esta combinação dos custos de operação e manutenção adicionais que impactam no aumento do investimento de capital necessário para manter em operação sistemas normalmente afetados pela incrustação (Bott, 1995). Discute os aspectos técnicos e econômicos associados à transferência de calor nesses equipamentos cujos

processos de limpeza afetam a rentabilidade de todo o processo. Outros estudos mostram que a incrustação em um trocador de calor pode ser responsável por cerca de 2,5% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, resulta em expressivos custos associados à incrustação, estimados em cerca de 0,25% do PIB dos países industrializados. Evidentemente, a limpeza *off-line* não pode ser considerada uma solução adequada para o problema de incrustação e é usada somente pela indisponibilidade de uma tecnologia mais adequada. Portanto, há um mercado promissor para sistemas e dispositivos de mitigação da incrustação e de técnicas *on-line* de limpeza (Müller-Steinhagen, Malayeri e Watkinson, 2011). Embora a limpeza química em série com a rede ainda seja comumente praticada, várias técnicas de limpeza mecânica (e.g.: injeção de projétil) estão também disponíveis, com resultados promissores. A limpeza com projéteis esféricos tem sido testada com sucesso, desde que seja aplicada na fase incipiente de formação da incrustação assim garantindo eficácia do processo de mitigação das incrustações (Someah e White, 1987).

Conclui-se das experiências descritas na literatura que a técnica de limpeza *on-line* resulta em economia e praticidade na higienização do trocador, atende otimização no uso da mão de obra, o que permite deslocar a força de trabalho para outras atividades mais nobres, o que pode ser realizado em qualquer momento sem prejuízos da refrigeração e resultando em melhor custo benefício.

### **2.3. Tecnologias *on-line***

O processo de limpeza *on-line* pode ser realizado de maneira contínua ou intermitente. Como exposto por Bott (1995), as alternativas tecnológicas podem ser destacadas pela (i) injeção de esferas abrasivas; (ii) utilização de filtros automáticos (*automatic strainers*); (iii) inversão de fluxo (*backflushing*); (iv) injeção de produtos químicos (*chemical injection*); e (v) sistemas de varredores e armazenamento (*pipeline inspection gauges*, PIG).

Uma alternativa rudimentar de limpeza, porém eficiente, é a circulação de água dopada com grãos de areia para provocar a abrasão mecânica nas superfícies dos dutos internos do trocador. Este capítulo concentra-se no estudo da técnica que considera o uso de esferas abrasivas nos tubos do trocador de calor para

remover a incrustação do interior das passagens internas do trocador, conforme representado na figura 3. Por imposição da geometria, esta alternativa não se aplica para limpeza de trocadores de sistemas não tubulares (Bott, 1995; Psoch e Schiewer, 2005).



Figura 3: Remoção de incrustação por esfera abrasiva

## 2.4.

### Seleção das esferas para assegurar eficiência da limpeza

A seleção das esferas utilizadas em sistemas de limpeza leva em consideração fatores relacionados e a natureza da incrustação que se pretende remover e a geometria do trocador de calor. Para atender a essas exigências existem alguns tipos de esferas para ação em diferentes estágios de incrustação (Müller-Steinhagen, 2000; Müller-Steinhagen, Malayeri e Watkinson, 2007). As esferas com revestimentos especiais para espessura e compactação diferente de *fouling*, a exemplo de plástico granulado, carborundum (carbeto de silício); esferas com polimentos especiais e, mesmo, esferas que são mantidas a temperaturas elevadas e com distintos graus de dureza. As esferas disponíveis no mercado para esse fim possuem diâmetros diversos e, normalmente, com distintos graus de dureza: macio, médio/macio, médio, duro, dureza extra. A escolha da esfera adequada para determinada higienização do TC pode variar em função dos distintos fatores (material do tubo, grau de impureza do fluido de trabalho, temperatura e velocidade do fluido no tubo, tipo de inibidores utilizados, dentre outros).

Este capítulo resume o estudo realizado sobre técnicas de limpeza online que faz uso de esferas abrasivas diretamente introduzidas no fluido de trabalho utilizado para resfriamento dos dutos internos dos trocadores de calor. Diferentemente de outras aplicações em que as esferas abrasivas circulam pelo rotor da bomba comprometendo a sua integridade e reduzindo a vida útil da esfera, na alternativa proposta as esferas são introduzidas e removidas do circuito



da água de refrigeração em um sistema paralelo sem a necessidade de parada técnica dos hidrogeradores.

## 2.5. Tipos de esferas abrasivas

Com o propósito de remover o *fouling* ainda em sua fase incipiente de consolidação nas paredes internas dos dutos, esferas abrasivas com revestimento especial foram concebidas para remover a incrustação. Cuidados especiais devem entretanto ser tomados para evitar que a esfera abrasiva ocasione erosão nos tubos e remoção da camada protetora anticorrosão sobre a superfície interna dos tubos de arrefecimento. O uso de materiais mais macios previne contra arranhões. Bott (1995), alerta para probabilidades de desgaste quando materiais abrasivos são utilizados para revestir esferas que circularão nos tubos internos do TC. A superfície das esferas utilizadas devem ter rugosidade ideal, como afirmam Abd-Elhady e Malayeri (2015), para limpar delicadamente os tubos, sem marcar a superfície. E para remover depósitos já incrustados, esferas especiais abrasivas com revestimento de corindo<sup>(1)</sup> podem ser utilizadas desde que controlada, pois estes levam a danosos efeitos comprometendo a integridade da superfície interna. Esferas revestidas com granulados de plástico tornam-se menos hostis para as tubulações e, conseqüentemente, requerem maior tempo de circulação no interior dos dutos. Recomenda-se, portanto, cuidados especiais para evitar que qualquer técnica de limpeza em serviço não destrua a capacidade de proteção do filme na superfície interna do tubo.

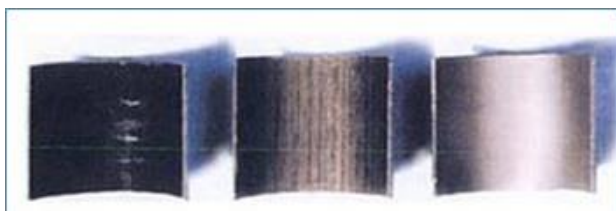
**Tabela 1: Abrasividade das esferas**

Dureza dos compostos abrasivos das esferas	
Material	Dureza
Esfera revestida com corindo	3400
Esfera revestida com granulados de plástico	95
Titânio	145
Aço inoxidável	142
Bronze	84
Cobre níquel (90/10)	75
Cobre níquel (70/30)	95

Fonte: *Fouling Heat Exchangers* (Bott, 1995)

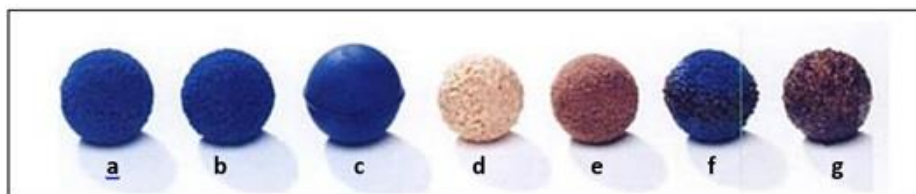
<sup>(1)</sup> Corindo é um mineral de natureza elevada, composto por Óxido de Alumínio  $Al_2O_3$ . Sua produção em pequenos fragmentos irregulares é empregado como abrasivo e seu pó pode ser usado para polimentos mais delicados

A figura 4 ilustra tubos de titânio com camadas de manganês após a aplicação do sistema de limpeza por esferas abrasivas (da esquerda para a direita: tubo impuro, tubo após 100 passagens da esfera e tubo após 800 passagens da esfera). Para Müller-Steinhagen (2000), propriedades particulares das esferas tais como forma, tamanho, textura, material e rigidez podem influenciar individualmente a limpeza de permutadores de calor de maneira distinta. Já a figura 5 ilustra diversos tipos de esferas utilizadas.



**Figura 4: Tubos de titânio com manganês após limpeza**

Fonte: Hans, ed. *Heat Exchanger Fouling: Mitigation and Cleaning Techniques* (Müller-Steinhagen, 2000)



**Figura 5: Tipos de esferas abrasivas**

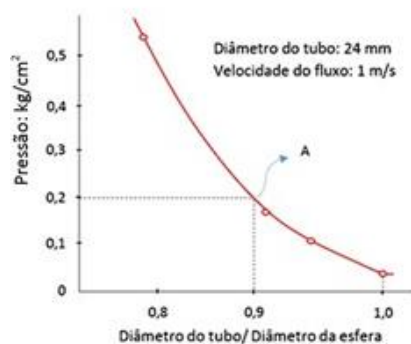
Legenda da figura 5: (a) Esferas esponja Padrão; (b) Esferas esponja com baixa velocidade de naufrágio; (c) Esferas esponja para demandas particularmente elevados; (d) Esferas com revestimento de plástico granulado; (e) Esferas com adição de agente de polimento; (f e g) esferas de borracha esponjosa com revestimento de corindo.

Fonte Hans, ed. *Heat Exchanger Fouling: Mitigation and Cleaning Techniques* (Müller-Steinhagen, 2000)

Esferas de vida útil prolongada – Como já mencionado, a esfera é recomendada para limpeza durante a fase incipiente da incrustação, quando esta ainda não se encontra fortemente ancorada na superfície interna dos dutos. Al-Bakeri e El Hares (1993a), não recomenda esta técnica que faz uso de águas que utilizam areia como abrasivo no tubo. Estas esferas possuem a mesma estrutura esponjosa das esferas do tipo padrão, mas possuem uma delicada película em todo seu entorno. Esta película se desgasta lentamente estendendo a sua vida útil. Com o desgaste da superfície, elas comportam-se como esferas-padrão. O desgaste da sua superfície ocasiona um efeito de limpeza reduzido, resultando na redução da eficácia no processo de higienização.

Jalalirad, Abd-Elhady e Malayeri (2013), ressaltam que a geometria esférica desempenha um importante papel no processo de limpeza continua dos tubos. As esferas que possuem um diâmetro acima do recomendado (de 5 a 10%

do diâmetro do tubo) podem bloquear a passagem do fluido no condensador levando a uma queda de pressão interna, tornando-o sujeito a uma possível obstrução, que poderá ocasionar indesejáveis processos de corrosão. Já as esferas de maior tenacidade, são recomendadas por Jalalirad, Abd-Elhady e Malayeri (2013), desde que seu diâmetro exceda cerca de 2% do diâmetro interno do tubo para impor um processo de interferência. Al-Bakeri e El Hares (1993b), recomenda que o diâmetro das esferas seja cerca de 2 mm maior que o diâmetro do tubo, sem designar a tenacidade da esfera. Okouchi *et al.* (1983), especificam a pressão de bombeamento em função da relação entre o diâmetro do tubo e o da esfera como na figura 6. A comparação serviu para verificar que esta é inversamente proporcional à pressão do tubo, tendendo, porém, para um limite mínimo da pressão



**Figura 6: Efeito do diâmetro da esfera na pressão do fluido**

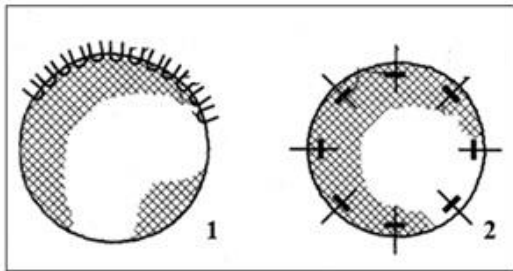
Fonte: *Cleaning system for heat conductive conduits of a heat exchanger* (Okouchi *et al.*, 1983)

As alterações de densidade e volume da esfera ao ser embebida no fluido, alertando que variações fora do aceitável podem comprometer a eficácia do processo de limpeza e de circulação das esferas (Jalalirad, Abd-Elhady e Malayeri, 2013).

## 2.6. Outros tipos de esfera

Klaus *et al.* (1983), em sua patente, descreve dois tipos de esferas utilizadas na limpeza dos tubos: com cerdas de borracha, para intensificar a abrasão quando em movimento, contrastando com as esferas fabricadas pela Taprogge, cujos granulados realizam o polimento da superfície. Dois são os tipos de esferas: com cerdas em forma de U, para mitigar a incrustação e com cerdas

retas introduzidas no corpo da esfera, mostradas na figura 7. De acordo com Abd-Elhady e Malayeri (2015), a superfície irregular das esferas proporciona uma melhor limpeza no interior dos tubos do trocador de calor.



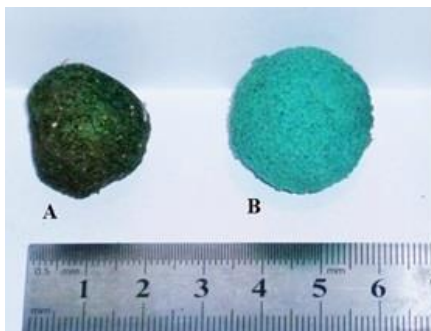
**Figura 7: Tipos de esferas com cerdas**

Fonte: *Cleaning the Interior of heat exchanger in tubes* (Klaus *et al.*, 1983)

## 2.7.

### Deterioração da esfera e redução de sua vida útil

Dentre os fatores que influenciam o prolongamento da vida útil da esfera destacam-se: a rugosidade do tubo, o grau e o tipo da incrustação. O grau de desgaste de uma esfera durante o processo de limpeza dos dutos varia de alguns dias a, aproximadamente, 4 semanas, dependendo das condições do tubo. Além do desgaste da superfície, há também a possibilidade de ressecamento da esfera após um período de circulação, ou, ainda, ressecamento por exposição à luz solar, tornando-as inutilizáveis. A figura 8 ilustra as esferas em dois estágios distintos de uso: o estágio A refere-se a uma esfera em condições de extrema deterioração pelo ressecamento e o Estágio B em que a esfera ainda encontra-se em razoáveis condições de uso.



**Figura 8: Esfera após uso, comparada à esfera sem uso**

Hamed *et al.* (2002), relacionam a quantidade de esferas perdidas e esferas danificadas ao mau desempenho do TC, ou a falhas internas do sistema que podem comprometer a integridade das esferas durante sua circulação pelos dutos.

A figura 9 indica, com base na experiência, a quantidade de esferas (deterioradas e perdidas) em função do total de horas de teste.



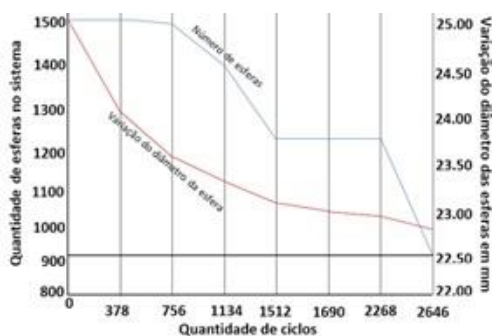
**Figura 9: Total de esferas por ciclo de limpeza**

Fonte : *MSF desalination plants - current status and future prospects* (Hamed et al., 2002)

## 2.8.

### Período de atividade

Um sistema de limpeza em atividade contínua certamente ocasiona desgastes nos instrumentos e nos tubos do trocador de calor. Hamed *et al.* (2002), discutem aspectos importantes de suas pesquisas relacionados ao processo de limpeza. Observaram que, a partir de 300 horas de pleno funcionamento do equipamento, ocorre expressiva deterioração dos componentes do sistema de limpeza. A figura 10 resume resultados críticos dessas observações.



**Figura 10 : Desgaste das esferas por ciclo de limpeza**

Fonte : *MSF desalination plants - current status and future prospects* (Hamed et al., 2002)

## 2.9.

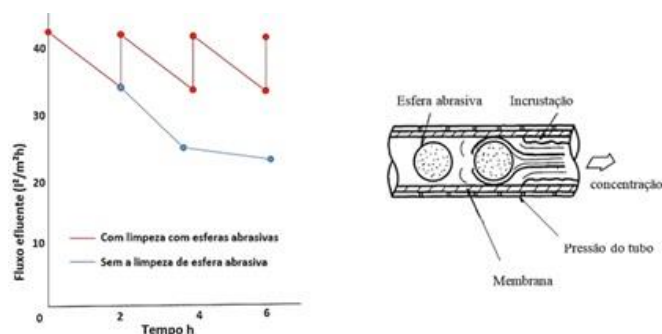
### Inutilização ou perda de esferas

A inutilização de esferas acarreta os seguintes efeitos negativos: consumo excessivo de agentes de limpeza; aumento do custo associado ao processo de limpeza; ineficiência da limpeza, o que implica na formação de *fouling*. O

desgaste das esferas é geralmente causado pela rugosidade que resulta da corrosão nos dutos ou acúmulo de incrustações, devido a inobservância no período de limpeza, ou não circulação das esferas por um considerável período.

Dentre as possíveis manobras para reduzir as perdas Leung (2002), recomenda: (i) evitar ponto morto no trocador de calor, considerando que em algumas partes da caixa de água utilizada a velocidade é muito baixa; (ii) evitar detritos (restos de materiais orgânicos), que impedem a circulação das esferas nas entradas dos tubos obstruídos; (iii) limitar a velocidade do escoamento da água, para evitar colisão das esferas com a superfície da tela de proteção, ou que passem direto por ela.

Para assegurar que o processo de limpeza ocorra com a eficácia esperada, a técnica de higienização *on-line* deve ser aplicada logo após um processo de limpeza tradicional, ou seja, retirando as incrustações por um processo manual. Garante-se, assim, que o processo de limpeza inicie-se sem nenhuma incrustação já ancorada nos tubos. Neves (2013), destaca que o processo de limpeza pode ficar comprometido se existir excesso de depósitos antes mesmo do início da técnica alternativa. A figura 11 demonstra o decaimento do fluxo no interior do tubo induzido pelo aumento da perda de carga que resulta da incrustação. Em azul, o decaimento do fluxo da água quando não há utilização das esferas abrasivas. Já a linha em vermelho, representa o ciclo de limpeza com a inserção periódica de esferas abrasivas.



**Figura 11: Ciclos de limpeza por esferas abrasivas**

Fonte: *Efeitos da limpeza por esferas abrasiva* (Kikuchi et al., 1977)

## 2.10. Seleção do tipo de esfera a ser utilizada

De acordo com as experiências acima relatadas, que refletem as melhores práticas de limpeza, a esfera a ser utilizada é a esfera do tipo padrão, que denota o

modelo mais utilizado em destiladores ar-água. Construídas com material resiliente capaz de suportar temperaturas de até 80 °C para limpeza contínua. As esferas testadas possuem massa de 1,72 g e diâmetro é de 22,5 mm, que demonstraram bom desempenho nos testes realizados com sucesso (volume da esfera seca da ordem de 5.964 mm<sup>3</sup> e densidade de 0,28 g/mm<sup>3</sup>). A figura 12 mostra o modelo de esfera adotado para a limpeza interna dos trocadores de calor.



**Figura 12: Corte da esfera tipo padrão**

Uma importante característica da esfera é a sua porosidade, permitindo que esta se adapte aos tubos circulando com interferência pelos tubos internos do TC, assim facilitando a limpeza por atrito com a superfície. Na realidade, a higienização com esferas abrasivas é uma forma de manutenção do processo de limpeza com o objetivo de prolongar o intervalo entre as limpezas *off-line*, pois essas jamais serão autossuficientes para mitigação do *fouling* que acarretam na inatividade plena do sistema.

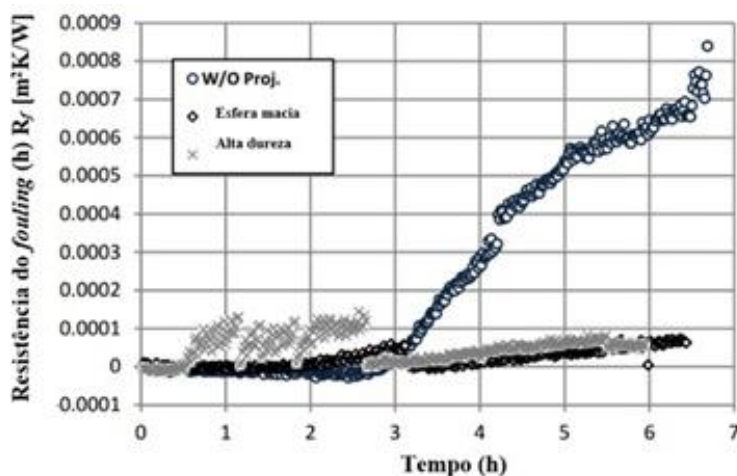
As esferas abrasivas possuem cavidades na estrutura do seu material esponjoso, cavidades essas que contribuem para a remoção incrustações por um mecanismo simples de raspagem direta das paredes internas dos dutos do trocador de calor. Parte da impureza retorna para o afluente do rio, porém uma pequena fração destes *fouling* permanece aderida no corpo da esfera. Essas impurezas agregadas às esferas são removidas por colisão entre as esferas quando no seu retorno à unidade coletora após um ciclo de limpeza e removidas na água de dreno que é renovada a cada ciclo de operação.

## **2.11.**

### **Rigidez da esfera e sua eficiência na limpeza**

O tamanho e rigidez das esferas abrasivas são dados fundamentais para influenciar a ação de limpeza das esferas abrasivas no sistema. Porém, a dureza

das esferas não proporciona uma melhor limpeza, i.e. Abd-Elhady e Malayeri (2015), verificaram que esferas macias possuem uma melhor capacidade de higienização em tubos. A figura 13 traz informações de comparação no aumento da resistência do *fouling* nos tubos em três situações diferentes. Em testes realizados sem a inserção de esferas, notou-se que houve um esperado aumento da incrustação. Em seguida a continuidade dos testes com esferas macias e por último com esferas de alta dureza. Verificou-se que as esferas macias são mais eficientes na manutenção do sistema, pois conseguem manter por um período maior a baixa resistência do *fouling*. Isso indica que o desempenho do processo de limpeza não tem qualquer relação com a força de cisalhamento exercida pela esfera. Além disso, a esfera de alta dureza aumenta a probabilidade da formação de depósito quando comparado com o sistema sem a inserção de esferas e oferece risco de danos à superfície interna dos tubos do trocador de calor. Para concluir a pesquisa também afirma que a dureza é inversa a velocidade de progressão nos tubos e que projeteis macios possuem maior estabilidade, assim maior contato com a superfície aumentando a capacidade de limpeza dos tubos.



**Figura 13: Desempenho das esferas macias vs. de alta dureza**

Fonte: *A criterion for the selection of projectiles for cleaning tubular heat exchangers* (Abd-Elhady e Malayeri, 2015)

## 2.12. Número ótimo de esferas

O total de esferas para assegurar que todos os tubos do sistema sejam visitados durante o processo de higienização constitui parâmetro crítico relevante do processo de limpeza. Müller-Steinhagen, Malayeri e Watkinson (2011),



ressaltam que para assegurar um processo de limpeza eficiente, a quantidade de esferas em circulação deve variar entre 10 e 50% do número de tubos de arrefecimento do trocador de calor. Abd-Elhady, Malayeri e Jalalirad (2014), afirmam que o aumento da taxa de injeção de esferas intensifica a eficiência de limpeza e diminui a resistência a da incrustação, recomendando uma taxa de injeção de 1 injeção a cada 20 minutos para uma resistência de incrustação do *fouling* ( $R_f$ ) de 0 a 0,7 m<sup>2</sup>/kW.

Para escolher a esfera ideal na limpeza do sistema de refrigeração, e optar pelo ótimo de esferas para limpeza, é necessário conhecer fatores importantíssimos como Resistência do *fouling* e tempo de crescimento da incrustação (Zubair e Shah, 2004). Para isso desenvolveu-se um sistema de monitoramento de temperatura pressão e vazão da água para que será explorado no capítulo seguinte.

### 3

## Monitoramento da incrustação: estudo do caso

No caso da usina Fontes Nova, instalada no Município de Pirai, RJ, de propriedade da Light Energia, o monitoramento da formação de *fouling* nos trocadores de calor do tipo tubular vertical água-ar (água: fluido quente; ar: fluido frio) se deu pelo monitoramento *on-line* de propriedades do escoamento que são afetadas pelo *fouling*. Mais especificamente, pelo monitoramento de variação da:: (i) vazão da água de resfriamento que circula nos trocadores; (ii) queda de pressão medida entre as seções de entrada e saída do trocador de calor em observação; (iii) temperatura ambiente e temperatura da água de resfriamento medida em diferentes posições do trocador e temperatura de componentes críticos do sistema de geração (e.g.: mancais da turbina, temperaturas de entrada e saída do ar de resfriamento dos hidrogeradores). Um sistema de medição capaz de realizar medições remotas em tempo real foi desenvolvido e instalado na unidade hidrogeradora C (Turbina Francis acoplada a um Gerador com capacidade de geração de 44 MWh) da usina Fontes Nova.

A figura 14 ilustra de forma pictórica o sistema de medição remota desenvolvida e instalado na usina, mostrando o seu sistema de transmissão de dados *on-line* para o Laboratório da PUC-Rio, onde os dados foram processados e interpretados.

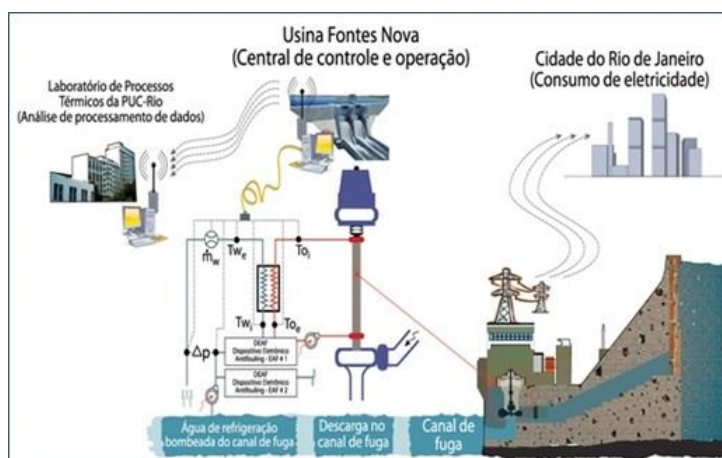


Figura 14: Medição remota e transmissão *on-line* de dados

A medição da temperatura pressão e vazão possui extrema importância para o monitoramento das incrustações no interior dos tubos. Estes dados são obtidos por meio de dispositivos eletrônicos de medição dessas grandezas físicas, em que monitoram o desempenho do trocador de calor 24 horas por dia durante 365 dias por ano. O conjunto de medidores formam o sistema de medição SISMED, a seguir caracterizados.

### 3.1. Transmissão remota de dados

Tendo em vista que a usina Fontes Nova localiza-se fora do perímetro urbano, em zona não coberta pelo acesso à rede de Banda Larga convencional, optou-se pela comunicação e transmissão de dados via tecnologias de telefonia móvel. No desenvolvimento do software de transmissão de dados, uma rotina está encarregada do envio de dados ao centro de processamento e análise dos dados (PUC-Rio). No sistema foi instalado um modem 3G, via pela qual a rotina no software envia, diariamente, os dados médios computados ao longo de 1 hora de medição contínua.

### 3.2. O sistema de medição SISMED/SIMPAR

Na figura 15 é mostrada a arquitetura do sistema de medição SISMED integrada com o simulador de paradas SIMPAR. Esse sistema está compreendido por vários subsistemas que são detalhados nas subseções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3.

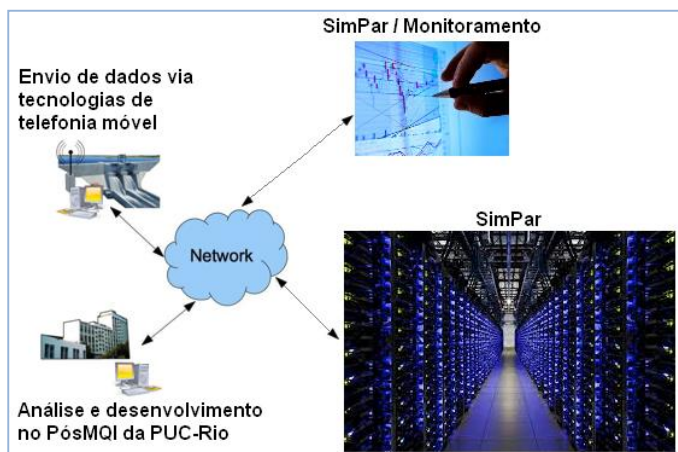


Figura 15: Componentes SISMED/SIMPAR do sistema de medição

### 3.2.1. Hardware do sistema SISMED

Esquemáticamente representado na figura 16, o sistema de medição SISMED está composto de (i) instrumentos de medição; (ii) sistema de controle e aquisição de dados Beckhoff e (iii) terminal PC (*host computer*), este encarregado do pré-processamento e envio remoto de dados para o centro de processamento e análise dos dados (Laboratório de Controle da Medição da PUC-Rio) via tecnologia de telecomunicações 3G.

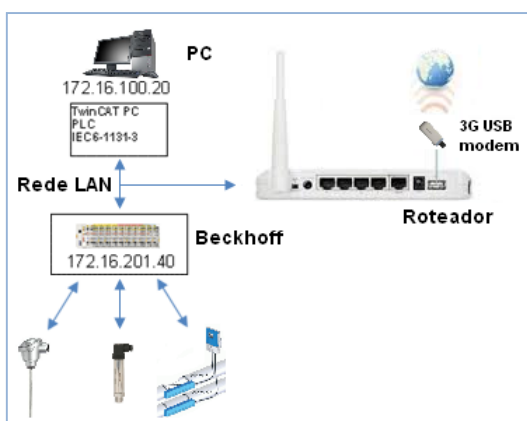


Figura 16: Comunicação BECKHOFF/Protocolo TCP/IP

### 3.2.2. Sistema de aquisição de dados e controle modular Beckhoff

O sistema de aquisição de dados foi configurado a partir dos módulos da Beckhoff Automation, a seguir descritos:

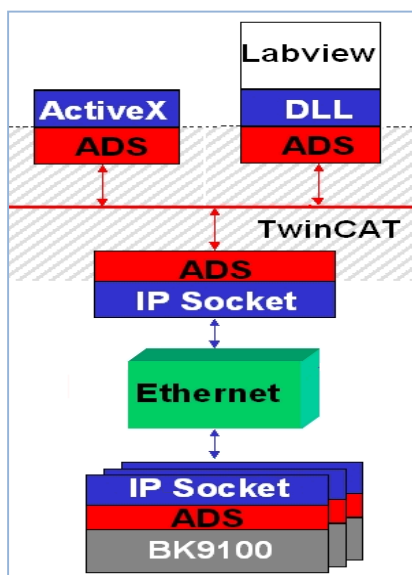
- **BK9100 Ethernet TCP/IP Bus Coupler** – Módulo de acoplamento com os módulos KL3458 e KL3204 de aquisição de dados e a rede Ethernet TCP/IP (IEEE 802.3);
- **KL3458 8-channel analog input terminals 4/20 mA** – Módulo para leitura de corrente. Usado para leitura dos transmissores de pressão e vazão de água. O sinal de corrente isolado eletricamente é digitalizada com resolução de 12 bits;
- **KL3204 4-channel input terminal PT100 (RTD)** – Módulo para leitura dos sensores de temperatura PT-100
- **KL4004 4-channel analog output terminal 0/10 V** – Módulo de controle de válvulas solenoide do sistema de limpeza com esferas abrasivas.

A comunicação entre os nós do sistema (Beckhoff-computador) é realizada por meio de uma camada de transporte proprietário, o *ADS Automation Device*

*Specification.* Esse protocolo opera acima do protocolo convencional TCP/IP (IEEE 802.3). O *software* Beckhoff TwinCAT (*The Windows Control and Automation Technology*) disponibiliza uma variedade de métodos que permite trocar dados com outras ferramentas de *software* (C++, VB etc.).

### 3.2.3. O pré-processamento de dados

O processo contínuo de aquisição e acondicionamento de dados foi desenvolvido no *software* LabView® da *National Instruments* NI. Uma distribuição de um arquivo executável deste *software* foi instalado em um computador *PC-desktop* com sistema operativo Windows XP® de 32 bits. A figura 17 ilustra o diagrama de blocos do sistema de comunicação Beckhoff-PC e o *software* LabView.



**Figura 17: Sistema de comunicação Beckhoff-PC - LabView**

Os dados de temperatura, pressão e vazão, são registrados pelo *software* a cada 60 min, e cada arquivo gerado compreende um período de 24 h. Ao final das 24 h, é aberto um novo arquivo para gravação dos registros e o anterior é enviado via tecnologias de telefonia móvel de longo alcance para o laboratório da PUC-Rio. No computador são mantidas cópias destes arquivos/registros, que podem ser acessados remotamente. Localmente no computador, é mostrada uma tela de monitoramento em tempo real dos dados registrados nos trocadores de calor de estudo e de referência mostrados na figura 18.

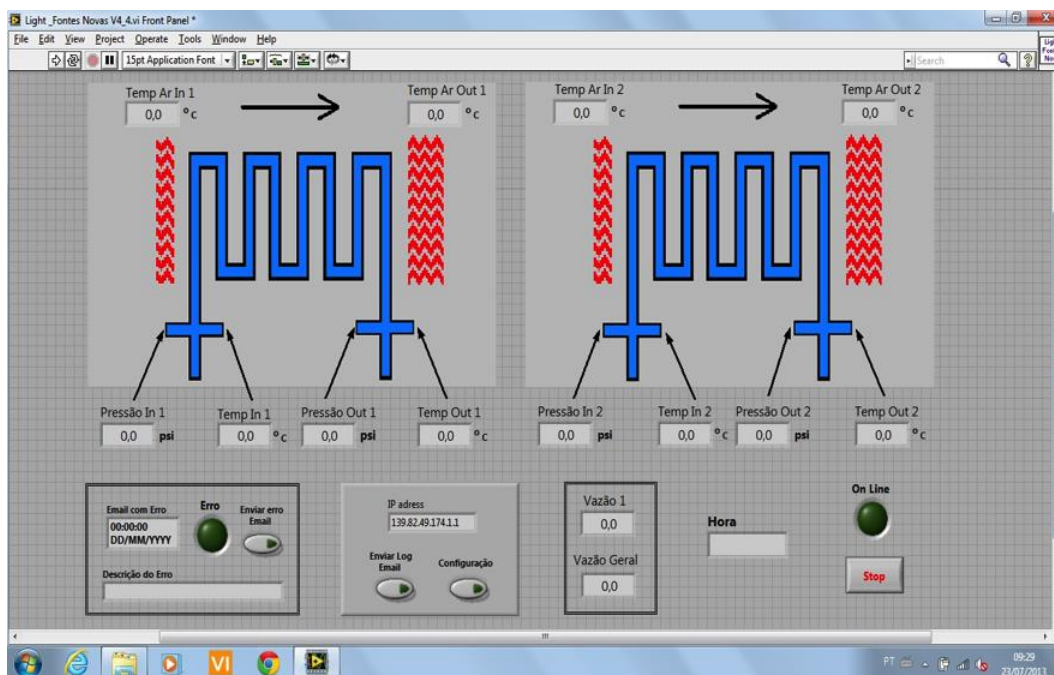


Figura 18: Tela do sistema de monitoramento local na usina

### 3.3. Medição de temperatura

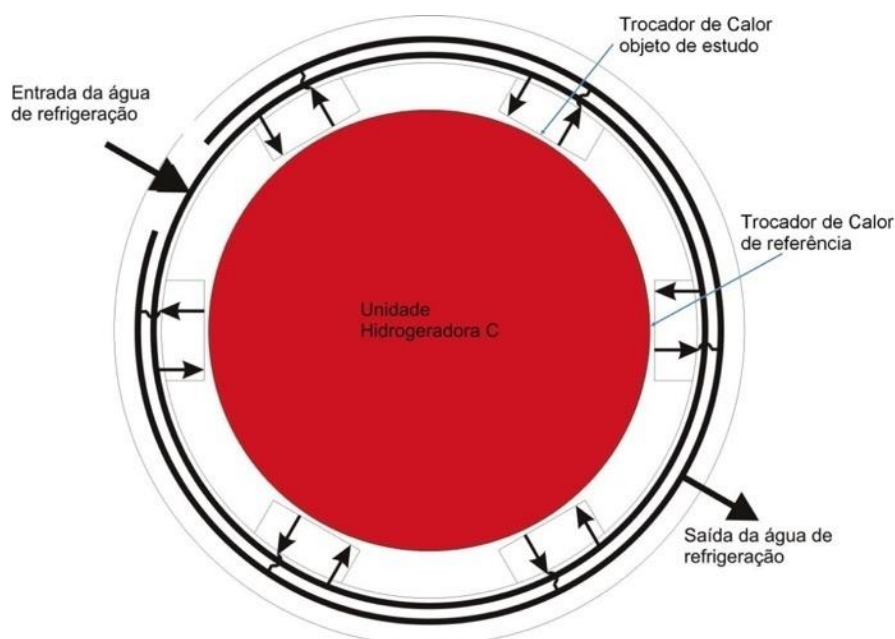
As medições de temperatura dos fluidos de trabalho do trocador de calor foram realizadas por meio de um sistema de termoresistências PT-100, instalados na entrada e na saída do trocador de calor tubular água-ar. Para assegurar o adequado grau de exatidão da medição, essas termoresistências foram utilizadas na medição direta do diferencial de temperatura experimentado pela água de resfriamento desde a entrada até a saída do trocador. Medições preliminares de suporte ao projeto do SISMED indicaram que a máxima diferença de temperatura observada é da ordem de 6 °C, reduzindo-se para uma diferença máxima de 2 °C na condição de trocador de calor limpo (sem incrustação). A termoresistência utilizada é do tipo PT100, 100 ohms, classe A simples, ligação 3 fios, bainha em aço inox 304, diâmetro 3 mm, com comprimento “u” = 110 mm, pote liso em inox (25x11 mm), conexão ao processo ajustável (bucim) em inox com rosca de 1/4” NPT com comprimento de ±40 mm, rabicho flexível de 5000 mm (3x24 AWG, isolamento interno e externo em teflon).

### 3.3.1. Medição de pressão

Transmissores de pressão com 0,25 % de exatidão foram utilizados para viabilizar a medição da queda de pressão experimentada pela água de refrigeração ao circular pelos pontos extremos (entrada e saída) do trocador de calor. A medição da queda de pressão constitui indicador do grau de incrustação do trocador já que o *fouling* impõe resistência ao escoamento. O transmissor de pressão é fabricado pela *Zurich*, tipo *pressure transducer* (wet/wet), com margem de erro de 0,25% F.E.; faixa de medição (range): 0-150 psi; saída: 4-20 mA; *pressure ports*: 1/8 NPT macho, com terminação elétrica de 1,5 m de cabo.

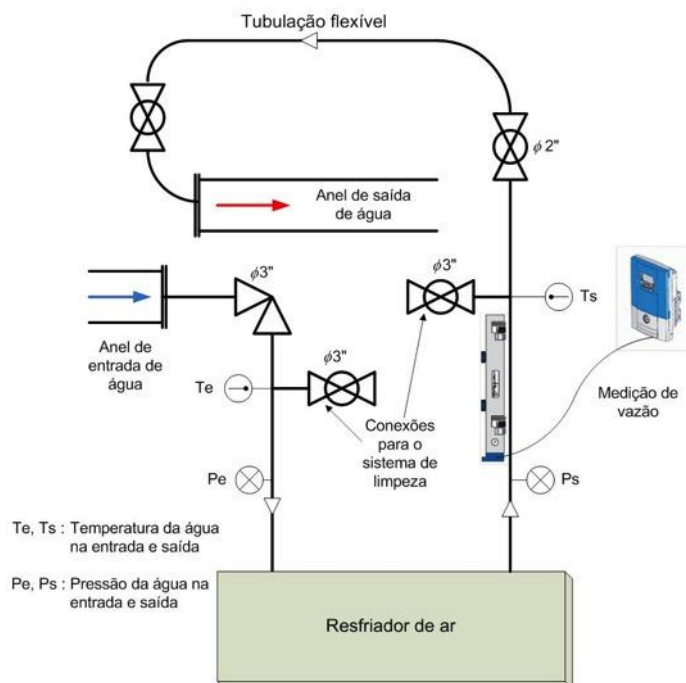
### 3.3.2. Monitoramento da vazão da água de resfriamento

A medição da vazão da água de resfriamento foi realizada por meio de um medidor do tipo ultrassônico que, por sua característica de instrumento não-invasivo, representa a tecnologia mais adequada para medição de vazão nessas situações. A figura 19 ilustra, de forma esquemática, os seis trocadores de calor responsáveis pelo arrefecimento do hidrogerador da Unidade Geradora C, trocadores de calor esses simultaneamente alimentados pelo circuito da água de resfriamento que é bombeada do canal de fuga. Esse sistema possui dois anéis, um de alimentação e outro de escapamento da água de resfriamento. A água, utilizada como fluido de trabalho (“fluido-quente”) do trocador de calor (TC), circula pelos seis trocadores de calor água/ar instalados e troca calor com o ar (“fluido-frio”) que, por sua vez, circula em circuito fechado nos hidrogeradores promovendo o efeito térmico de arrefecimento.



**Figura 19: Sistema de água de refrigeração dos trocadores**

O sistema de monitoramento por ultrassom atua em conjunto com os anéis de refrigeração. A figura 20 ilustra o posicionamento dos instrumentos que compõem o medidor de vazão e as estações de medição utilizadas no monitoramento.

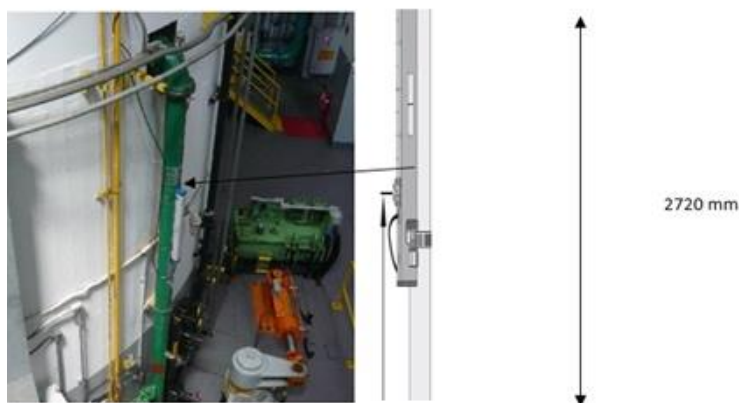


**Figura 20: Componentes do sistema de medição**

Um segundo medidor de vazão de maior capacidade foi instalado no ramal de alimentação principal (de 0,15 m de diâmetro) do circuito da água de

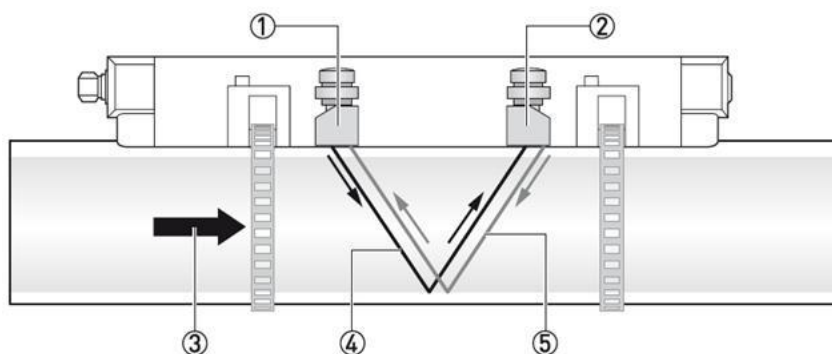


refrigeração dos trocadores de calor (água/ar), conforme ilustrado na figura 21. Como observado, em conformidade à norma técnica e às boas práticas aplicáveis que visam assegurar a condição de escoamento desenvolvido, o medidor de vazão da água de refrigeração foi instalado numa posição a jusante de um elemento de tubo reto de pelo menos 10 vezes o valor do diâmetro do tubo, seguido de um comprimento de tubo reto de 5 diâmetros a sua montante.



**Figura 21: Posicionamento do medidor de vazão**

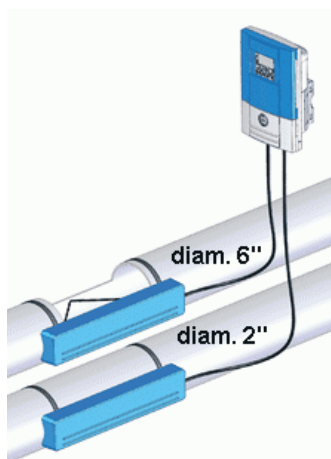
O medidor de vazão utilizado, é do tipo ultrassônico modelo OPTISONIC 6000, Este é um sistema conveniente pela sua característica não intrusiva. Fundamenta-se no tempo de trânsito da propagação de sinais de ultrassom no escoamento. Esta técnica está baseada na medição da diferença dos tempos de trânsito percorridos entre duas sondas ultrassônicas emissor/receptor nas duas direções possíveis. Os períodos de tempo de trânsito medidos são (i) no sentido de fluxo do escoamento e (ii) no sentido de volta, em sentido contrário ao fluxo, conforme ilustrado na figura 22, que explica o seu princípio de funcionamento. Esta diferença de tempo é diretamente proporcional ao fluxo volumétrico do fluido e às propriedades termofísicas dos meios físicos atravessados pelo sinal emitido pela fonte de ultrassom. Este dispositivo apresenta um nível de exatidão adequado à medição pretendida.



**Figura 22: Princípio de funcionamento do medidor ultrassônico**

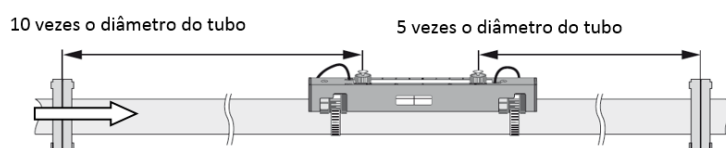
(1): transdutor A; (2): transdutor B; (3): sentido do escoamento com velocidade  $V$ ; (4): percurso do sinal associado ao tempo de trânsito do transdutor A para B; (5): percurso do sinal associado ao tempo de trânsito do transdutor B para A.

Como mostrado nesta figura, o sistema de medição de vazão resulta da combinação de dois sensores do tipo *clamp-on* e do conversor do sinal ultrassônico (transmissor). A figura 23 ilustra os componentes do medidor de vazão e a montagem das sondas Optisonic 6000 e do conversor de sinal UFC 300W, utilizado para a medição de vazão.



**Figura 23: Sondas e conversor de sinal do medidor ultrassônico**

Na figura 24 pode-se comprovar a conformidade às recomendações da norma aplicável, que determina comprimentos críticos de tubo reto (condição hidrodinâmica de escoamento completamente desenvolvido) a montante (10 diâmetros) e a jusante (5 diâmetros) do medidor de vazão.



**Figura 24: Esquemático da instalação do medidor de vazão**

Para assegurar o adequado funcionamento do medidor de vazão, o seu elemento sensível deve ser instalado em superfície limpa do duto (i.e.: as superfícies internas da tubulação no local de instalação do medidor de vazão devem estar isentas de corrosão ou incrustações). Para assegurar tal condição, o sensor deve ser montado adequadamente logo após a parada de manutenção para limpeza dos trocadores de calor (o que ocorreu pela primeira no início do processo de coleta de dados, quando a tubulação de 6 polegadas de diâmetro foi inspecionada revelando a presença de cristalização/precipitação de sais de material inorgânico e corrosão, devidamente removidos permitindo a adequada instalação do sensor de vazão).

A figura 25 ilustra os ajustes disponíveis no medidor de vazão para especificação das condições existentes da parede da tubulação transportadora do fluido cuja vazão se deseja medir no local de instalação do sensor.

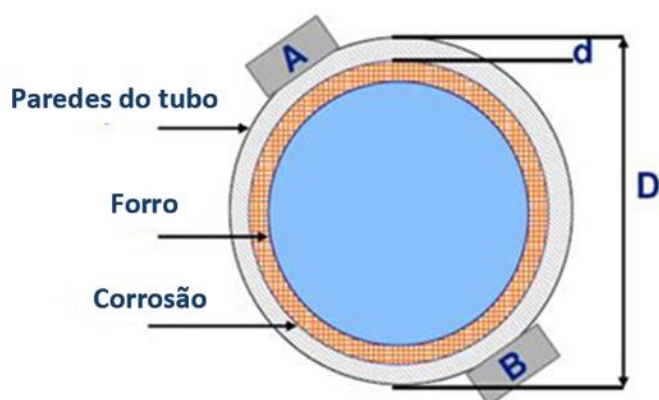


Figura 25: Parede da tubulação de transporte do fluido

### 3.4.

#### Estudo de desempenho do sistema de trocadores de calor

O processo de levantamento e processamento de dados teve início com uma fase de teste e validação do sistema de medição para adequá-lo à realidade da Usina. Medições preliminares registraram uma variação monótona das medições realizadas. Para viabilizar um entendimento robusto do desempenho do SISMED, um período longo compreendido desde o dia 05/01/2012 (início da medição validada) até o dia 16/12/2014, assim monitorando o desempenho dos sistemas de

arrefecimento da Usina Fontes Nova. Análise dos dados permite, por exemplo, identificar as paradas técnicas de manutenção programada pelos operadores da Usina Fontes Nova. Numa dessas paradas técnicas, consideradas estratégicas para intervenção na Usina, foi possível realizar ajustes no sistema instalado, criando, assim, uma condição de referência para estudo do desempenho dos trocadores limpos (incrustações removidas), definindo um novo período de testes.

A título de ilustração, pôde-se, por exemplo, observar pelo registro dos dados, confrontados com os relatórios de manutenção da usina que, após a limpeza realizada em 25/08/2012, os seguintes eventos críticos foram registrados: substituição dos tubos com superfície estendida (aletados) devido à redução de espessura da parede de cobre e danos na integridade estrutural das superfícies estendidas; redução na geração de carga de 44 MW (nominal) para 20 MW com o objetivo de realizar manutenção corretiva em diferentes elementos do hidrogerador. Isto pode ser observado nos gráficos que serão mostrados a seguir.

Como era de se esperar, as medições realizadas são coerentes com os eventos documentados. Inicialmente a vazão da água de resfriamento diminui com o decorrer do tempo de operação do hidrogerador. Esta é uma constatação de um dos efeitos causado pelas incrustações nas tubulações do trocador de calor. Os dados mostram, claramente, que a vazão da água se restabelece às condições nominais após a limpeza mecânica ter sido efetuada após a parada do hidrogerador.

Na figura 26 pode ser observado que o gráfico foi construído com base nos resultados das medições da vazão de água no circuito de alimentação e no trocador de calor objeto de estudo (posicionados no anel do circuito de refrigeração do sistema global, onde dois trocadores de calor foram instrumentados: o selecionado para o estudo e o trocador de referência para comparação).

O argumento utilizado ao referir-se à figura anteriormente apresentada explica a razão pela qual não é observada uma redução na vazão da água de refrigeração após a substituição das tubulações do trocador de calor (paredes isentas de qualquer vestígio de incrustação).

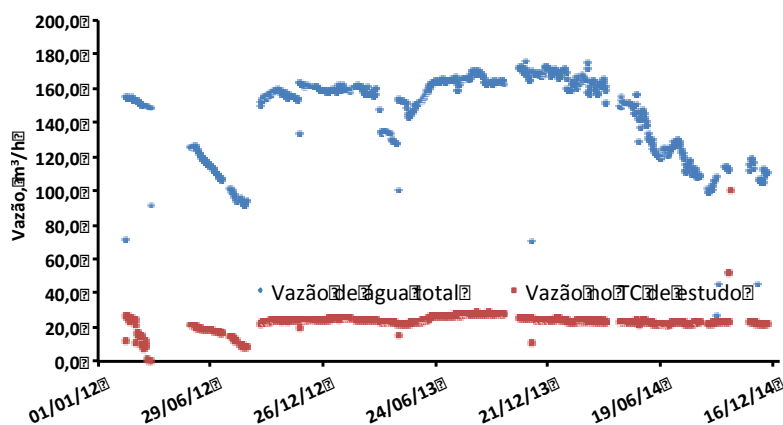


Figura 26: Vazão de água no trocador de calor

As figuras 27 e 28 mostram, respectivamente, a variação da temperatura da água de refrigeração na entrada e saída dos dois trocadores de calor selecionados (trocador de calor objeto do estudo e trocador de referência). Esses dados, referentes à medição da temperatura da água de alimentação proveniente dos reservatórios da usina, refletem a sazonalidade das águas de alimentação, mostrando que o trocador cumpre o seu papel de resfriar o ar que arrefece o hidrogerador. Como observado, a temperatura da água de resfriamento aumenta de um valor entre 3 e 6 °C, confirmando que a água resfria o ar utilizado para arrefecer componentes do sistema hidrogerador.

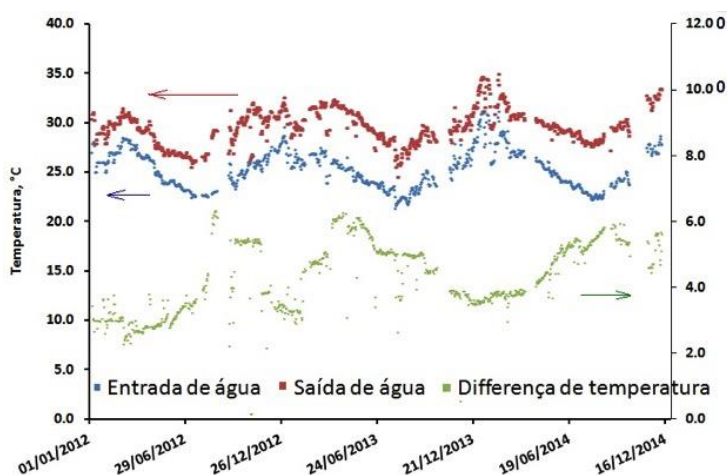


Figura 27: Temperatura da água no trocador de teste

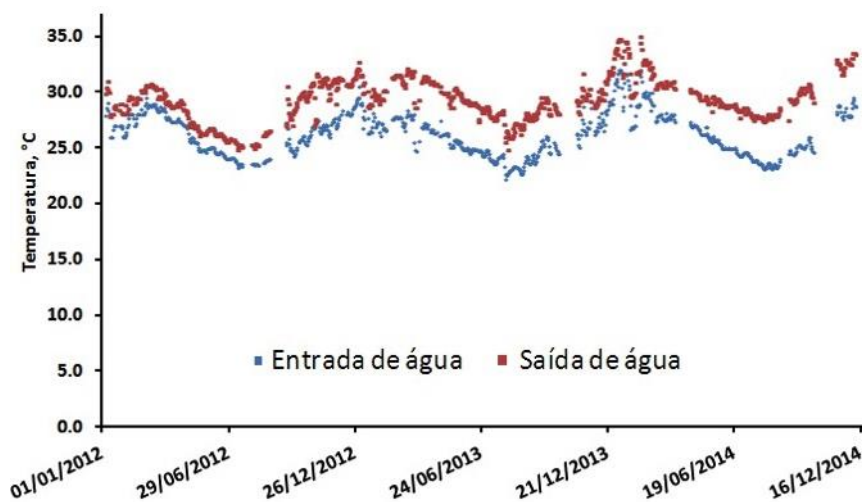


Figura 28: Temperatura da água no trocador de referência

As figuras 29 e 30 mostram a variação da temperatura do ar na entrada e saída dos trocadores de calor de estudo e de referência. Os resultados da medição mostraram claramente que a redução da efetividade dos trocadores de calor (efeito da incrustação) causa a elevação da temperatura do ar.

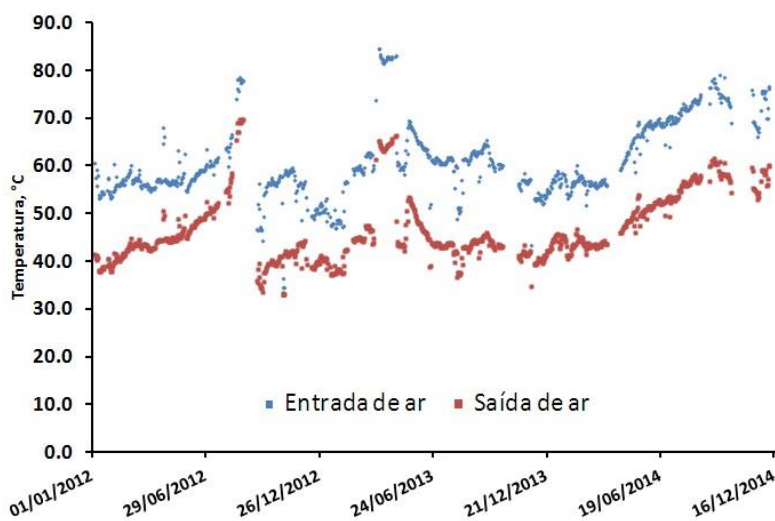
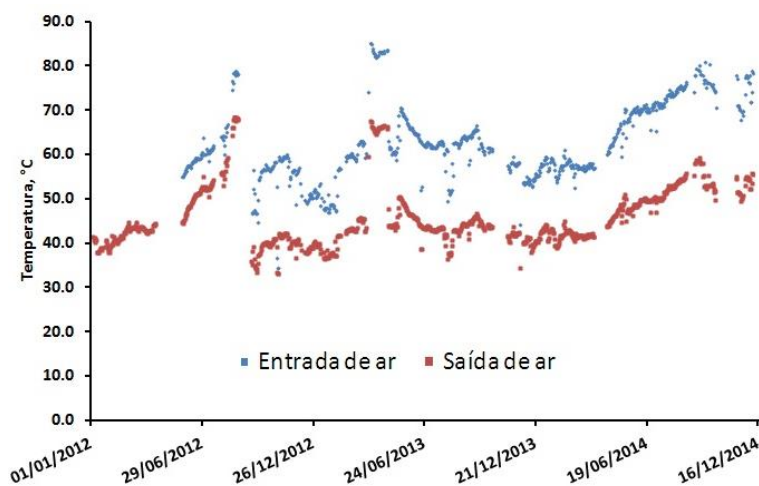
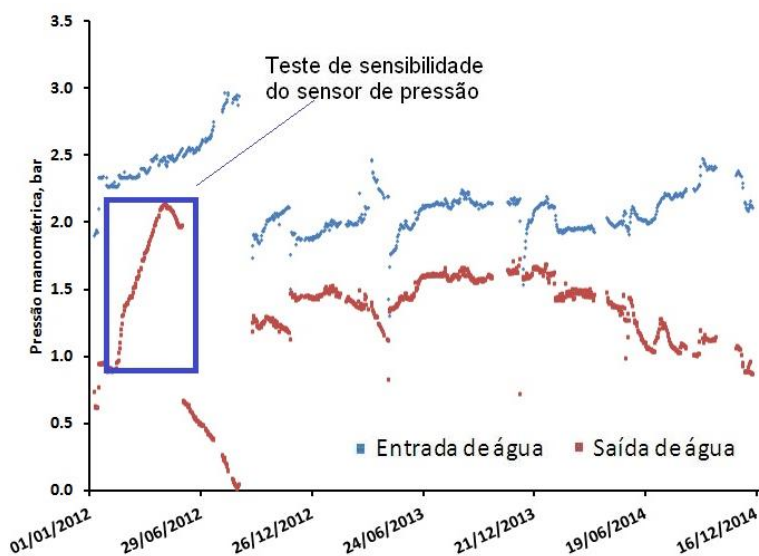


Figura 29: Temperatura do ar no trocador de teste

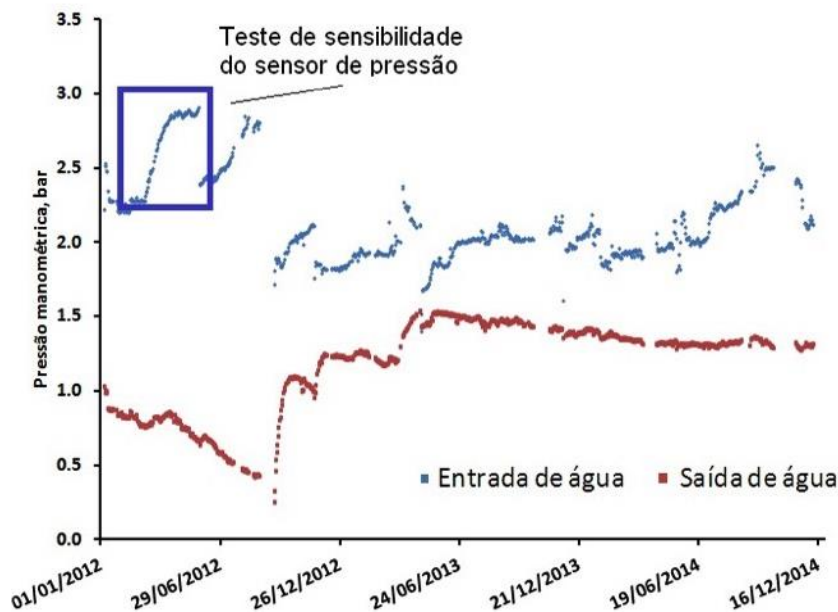


**Figura 30: Temperatura do ar no trocador de referência**

As figuras 31 e 32 mostram a variação da pressão da água na entrada e na saída dos trocadores de calor. Cabe aqui lembrar que a alimentação da água de resfriamento origina-se de um reservatório elevado (que mantém constante a pressão hidrostática) assim funcionando como um “pulmão de água que regulariza o nível de pressão na entrada dos trocadores”. Como será demonstrado mais adiante, é de se esperar que o incremento das incrustações cause uma elevação da pressão na entrada do trocador de calor e seja observada uma redução correspondente na saída. E, conseqüentemente, um aumento na queda de pressão no trocador de calor. Este raciocínio pode ser constatado ou validado observando a evolução da pressão nos gráficos mostrados.



**Figura 31: Pressão da água no trocador de teste**



**Figura 32: Pressão da água no trocador de referência**

Na figura 33 é mostrado o resultado da estimativa da vazão de ar na seção interna do hidrogerador. No sistema de resfriamento do hidrogerador o ar circula em um circuito fechado forçado por pás, solidariamente fixadas no rotor do hidrogerador. O ar escoia pelos bobinados do rotor e estator produzindo o efeito de resfriamento destes componentes quando, finalmente, esta energia térmica é transferida para a água de refrigeração nos trocadores de calor. A velocidade de rotação do rotor na máquina elétrica síncrona é constante e por esta razão é de se esperar que a vazão interna de ar seja aproximadamente constante. Pode existir uma variação da vazão caso haja mudanças nas propriedades termofísicas do ar (viscosidade) devido à variação de sua temperatura. Neste caso, foi observado que o aumento das incrustações provoca a elevação da temperatura do ar do trocador, porém, não foi observado variação na vazão estimada do ar no interior do hidrogerador. A variação abrupta da vazão observada na figura 34 é atribuída à substituição das tubulações com superfície estendida dos trocadores de calor e, possivelmente, também, a um processo de limpeza realizada simultaneamente.



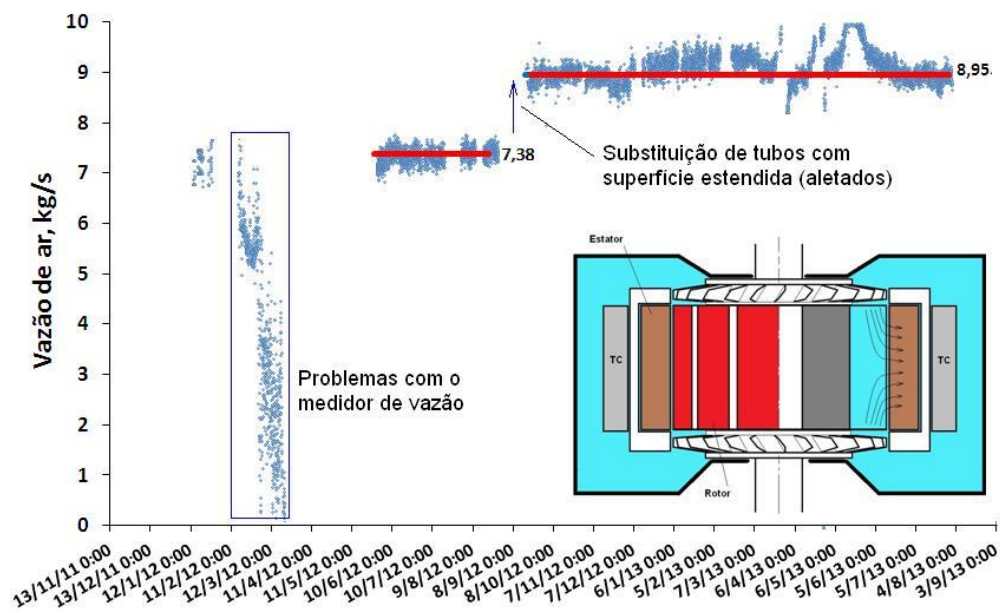


Figura 33: Vazão de ar de resfriamento do hidrogerador

A figura 34 mostra a variação relativa da razão  $\Delta P/\dot{m}^2$  em relação à condição de trocador sem incrustações (limpo). Uma redução abrupta desta razão significa que ocorreu um desprendimento de camadas de incrustações de baixa aderência. No período de indução, teoricamente ilustrado na figura 36, a força de adesão entre os cristais que formam a incrustação ainda é de reduzida magnitude.

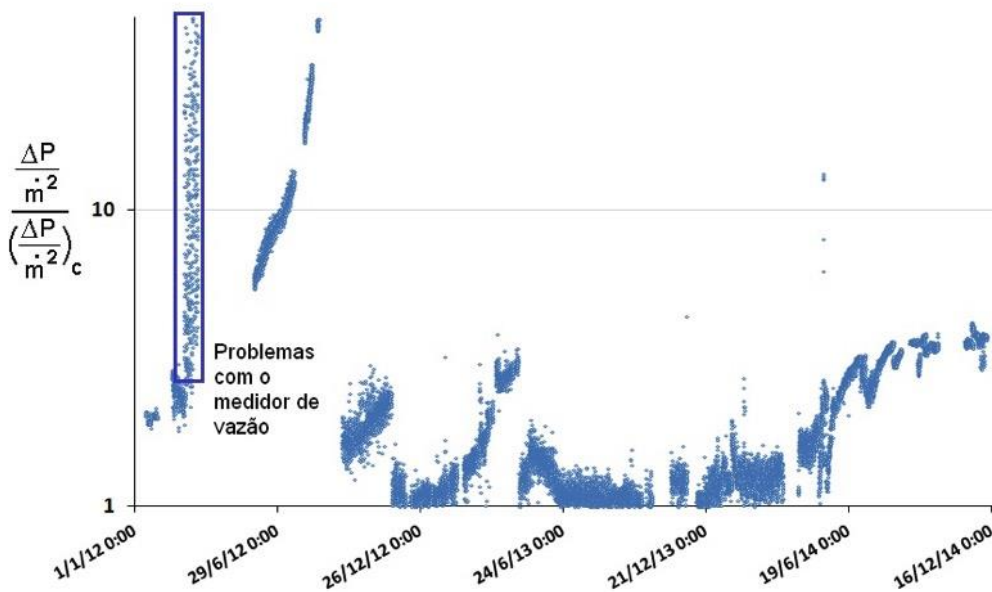


Figura 34: Evolução da razão  $\Delta P/\dot{m}^2$

A figura 35 mostra a evolução da resistência térmica das incrustações com dados coletados pelo SISMED. Como observado pelos dados que expressam a razão  $\Delta P/\dot{m}^2$  (parâmetro normalizado na condição de trocador limpo; i.e.: antes após o processo de limpeza), os dados mostrados também permitem observar reduções abruptas na resistência térmica, o que reforça a evidência de desprendimento de incrustações das paredes do trocador de calor no período de indução após a substituição das tubulações dos trocadores de calor.

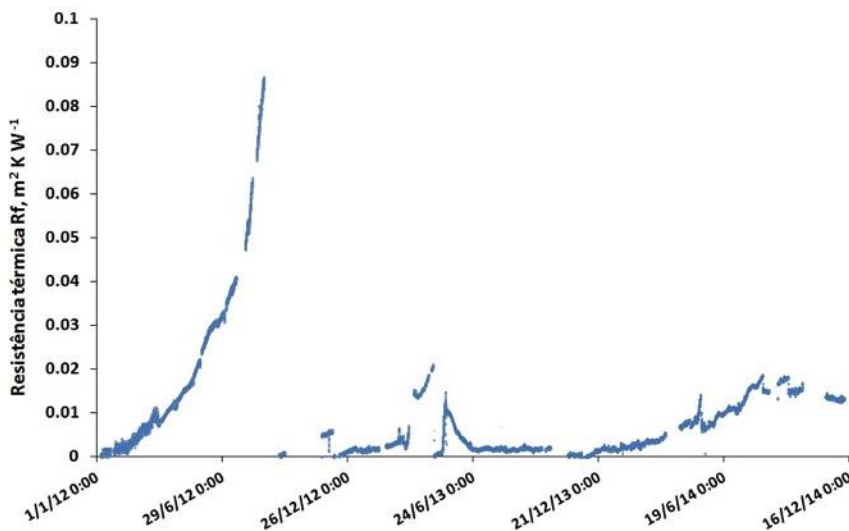


Figura 35: Resistência térmica induzida pela incrustação

### 3.4.1. Simulador de paradas (SIMPAPAR)

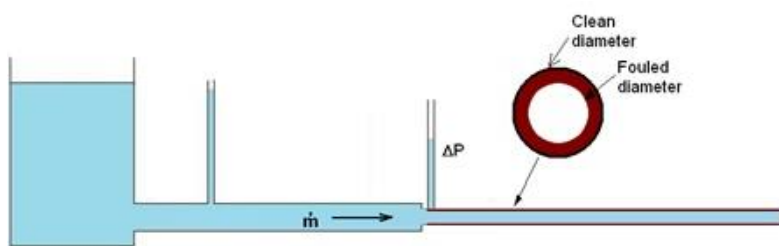
O simulador de paradas SIMPAR (em sua versão 2.0) está baseado no monitoramento da resistência térmica das incrustações, cuja presença drasticamente afeta a eficácia dos mecanismos de troca de calor. Para essa análise os parâmetros críticos são: a resistência térmica ( $R_f$ ) e a razão  $\Delta P/\dot{m}^2$ , que refletem o parâmetro hidrodinâmico de interesse (razão entre a queda de pressão induzida pela incrustação e o quadrado da vazão da água de resfriamento). Ambas as relações podem ser interpretados como indicadores do indesejável fenômeno da incrustação atuando para reduzir a eficácia dos mecanismos de transferência de calor e da hidrodinâmica do escoamento (Madi, Negrão e Massoqueti, 2004).

Métodos clássicos descritos na literatura especializada definem a resistência térmica pela equação (1):

$$R_f = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_l} \quad (1)$$

Nesta equação,  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor medido na operação. O termo  $U_l$  é o coeficiente global medido na condição de trocador limpo, sem incrustações. O aumento desta resistência térmica univocamente representa o aumento da deposição de incrustações nas superfícies internas do trocador de calor.

Já o efeito da razão  $\Delta P/\dot{m}^2$  pode ser compreendido à luz do esquema simplificado da figura 36, que modela o arranjo hidráulico do sistema de resfriamento dos hidrogeradores. O reservatório de água assegura pressão hidrostática constante (o “pulmão” de alimentação) a montante da alimentação da água de resfriamento que entra nos trocadores. A tubulação de saída do reservatório representa o anel de distribuição de água da usina, enquanto a tubulação de menor diâmetro representa uma tubulação típica dos trocadores de calor água/ar. Esse é o arranjo, que embora simplificado, permite explicar os efeitos indesejáveis da incrustação no desempenho térmico e hidrodinâmico dos trocadores de calor.



**Figura 36: Esquema do modelo de resfriamento do hidrogerador**

A figura 37 mostra o efeito das incrustações no regime de escoamento da água de refrigeração dos trocadores de calor. Nos gráficos ilustrados nessas figuras é possível observar a variação de parâmetros de operação em relação às condições de operação nominal de um trocador limpo (i.e.: isento de incrustações). A diminuição da razão entre os diâmetros do tubo sujo ( $d$ ) em relação ao tudo limpo ( $d_c$ ) é dado por  $d/d_c$  representa um aumento da espessura das incrustações nas paredes do trocador de calor. A curva altura-capacidade na

entrada do trocador de calor é denominada curva do sistema, curva essa que diminui com a vazão devido a perdas por atrito e perdas localizadas nas tubulações de alimentação de água na usina. O ponto de operação do sistema se estabelece no equilíbrio da curva de operação com a curva de perda de pressão do trocador de calor. Como pode ser observado, o aumento das incrustações reflete-se no aumento da razão  $\Delta P/\dot{m}^2$ , o que qualifica essa razão como parâmetro crítico de interesse no controle do grau de incrustação.

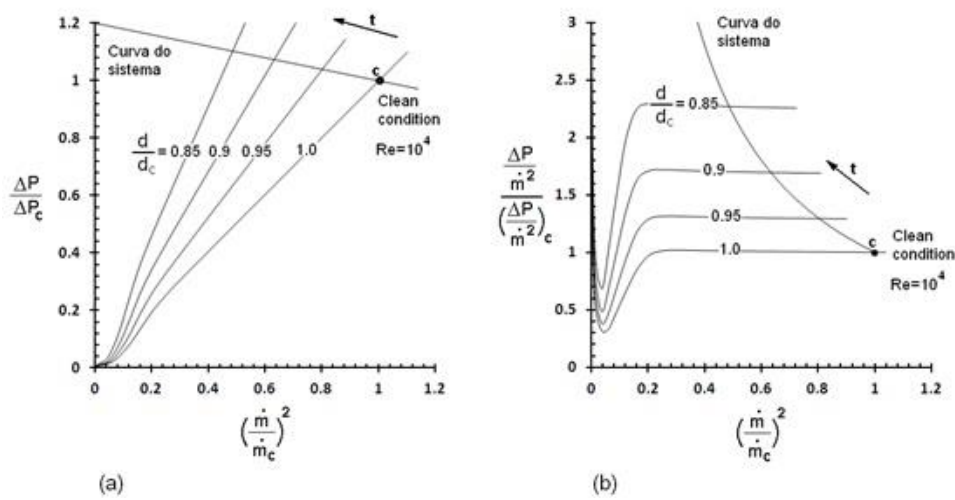


Figura 37: Esquema do sistema hidráulico de resfriamento

### 3.4.2.

#### Correlação entre resistência térmica e índice de incrustação

A avaliação inicial (primeiros dados do SISMED) da resistência térmica das incrustações utilizando a Equação 1 não foi satisfatória devido à elevada incerteza associada à medição da temperatura dos fluidos de trabalho (água/ar). O problema foi corrigido após entendimento da sua causa: acondicionamento ou tratamento numérico do sinal elétrico do sensor de temperatura. Na literatura especializada Jerônimo *et al.* (1997) propuseram um método indireto para avaliar a resistência térmica das incrustações. Esta metodologia requer simplesmente a medição de quatro medições da temperatura e da vazão do fluido de trabalho do trocador. Com base nessa metodologia define-se o Fator de Incrustação, dado pela Equação (2), a seguir:

$$F_I = \frac{\varepsilon_{limpo} - \varepsilon}{\varepsilon_{limpo} - \varepsilon_{sujo}} \quad (2)$$

Nessa expressão,  $\varepsilon$  é a efetividade do trocador de calor em operação, avaliado apenas com medições de temperatura do fluido de trabalho. Os sub-índices indicam os valores da efetividade do trocador de calor nas condições de operação na ausência e na presença de incrustações (“limpo” e “sujo”).

Isto significa que quando este Fator de Incrustação assume o valor zero o trocador de calor está isento de incrustações (limpo); já o valor 1 deste Fator corresponde à condição de trocador incrustado (sujo). A efetividade  $\varepsilon_{\text{sujo}}$  é um valor arbitrário obtido a partir de observações, neste caso, o valor da efetividade do trocador de calor antes de passar por um processo de limpeza mecânica.

Madi, Negrão e Massoqueti, (2004) demonstraram que existe uma correlação entre a resistência térmica da incrustação e o fator de incrustação. A figura 38 e 39 ilustra características dessa correlação de interesse para fundamentar o desenvolvimento do Simulador de Paradas, que constitui objeto de estudo desta dissertação.

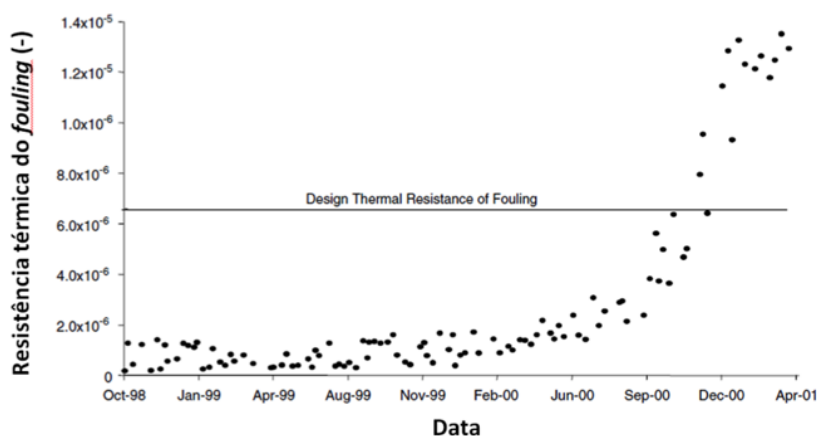
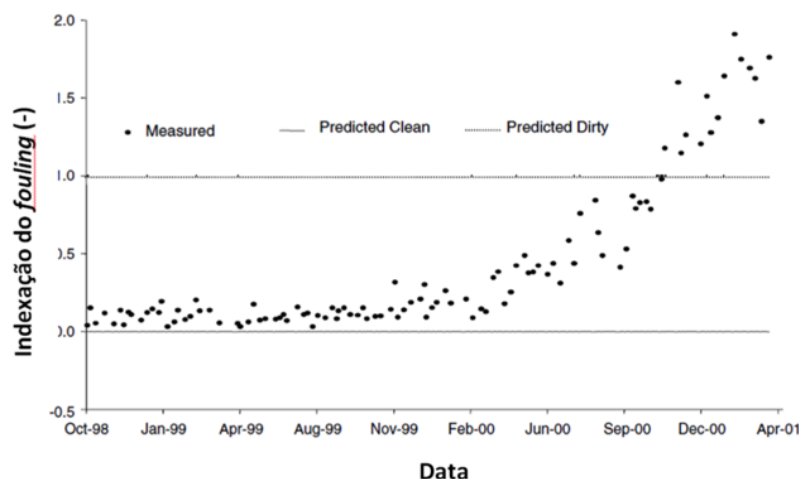


Figura 38: Sistema na ausência de *fouling*



**Figura 39: Resistência térmica vs. fator de incrustação**

Neste capítulo foram abordadas todas as etapas do monitoramento remoto para aquisição de dados entre a PUC-Rio e a usina de Fontes Nova. Dentre as medições críticas realizadas, o capítulo destacou a medição da variação de fluxo pela técnica não invasiva de ultrassom, e outras grandezas físicas do escoamento (temperatura, pressão e vazão). Foram ainda caracterizadas as etapas do sistema de processamento de dados e traz resultados importantes com o estudo do desempenho do sistema para aquisição de dados iniciais para subsidiar o desenvolvimento do sistema de limpeza alternativo que este trabalho se propõe a formular e que constitui objeto do próximo capítulo.

## 4

### Alternativa tecnológica de limpeza do trocador de calor

A motivação deste trabalho para a construção de um sistema automático de limpeza de trocadores de calor é evitar a interrupção da geração de energia durante o processo de limpeza. Antes de descrever a proposta do sistema alternativo de limpeza, caracteriza-se, a seguir, um dos trocadores de calor do tipo tubular utilizado na usina Fontes Nova para realizar o arrefecimento do hidrogerador (a usina Fontes Nova opera com três hidrogeradores movidos, cada um, por turbina Francis de eixo vertical).

#### 4.1.

##### Caracterização do trocador de calor utilizado

Para simular condições de operação similares às que ocorrem na usina, um dos trocadores de calor (reserva) da Usina Fontes Nova foi transferido para o laboratório de sistemas hidráulicos e de potência da PUC-Rio para ser utilizado nos ensaios de desempenho do equipamento concebido para realizar a sua limpeza, equipamento-protótipo esse que será discutido neste capítulo.

O trocador de calor cedido pela usina é do tipo casco e tubo, utilizado para refrigeração do ar utilizado como “fluido refrigerante” do arrefecimento do hidrogerador, fluido esse que, ao passar por fora dos tubos aletados, é resfriado por um fluxo de água que circula internamente nos dutos aletados internos do trocador, conforme ilustrado na figura 40.

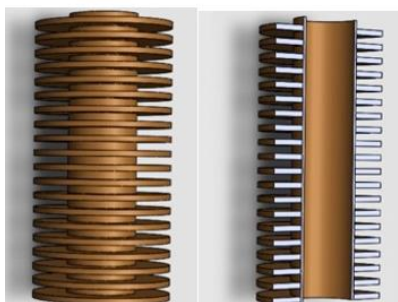


Figura 40: Corte longitudinal do tubo aletado



Trocadores de calor de tubos aletados são comumente empregados quando um dos fluxos trabalha em alta pressão e possui um coeficiente de transferência de calor maior comparado ao outro fluido de trabalho. Geralmente o coeficiente de transferência de calor do lado do líquido é maior que o do lado do gás, favorecendo que as aletas sejam posicionadas do lado do fluido que possui maior resistência térmica, no caso da usina Fontes Nova, o ar.

A figura 41 ilustra um desses trocadores em processo de limpeza pelo tedioso método de varetagem, que requer parada das turbinas para viabilizar a sua manutenção resultando em perda de receita.



**Figura 41: Processo convencional de limpeza**

A figura 42 mostra a plaqueta de identificação do trocador de calor cedido pela Light para os testes realizados no laboratório da PUC-Rio.



**Figura 42: Identificação do trocador de calor testado**



Fabricado pela Tubal Tubos Aletados Ltda., o trocador utilizado na pesquisa opera com uma pressão de trabalho de 2,0 kg/cm<sup>2</sup>, resistindo a uma pressão máxima de teste de 6,0 kg/cm<sup>2</sup> (pressão de teste de estanqueidade). A pressão de teste indicada na placa do TC é a que foi adotada para o teste de operação extrema do sistema, logo após a limpeza manual dos dutos do trocador. A bomba utilizada no Sistema Injetor/Recuperador de Esferas Abrasivas concebido (SIREA) foi especificada para permitir velocidades de esfera, porém respeitando a pressão máxima de segurança do trocador de calor.

#### 4.2.

#### **O sistema de injeção e recuperação de esferas**

Esta seção descreve o Sistema de Injeção e Recuperação de Esferas Abrasivas (SIREA), concebido, construído e validado para viabilizar a alternativa tecnológica de limpeza proposta. Uma característica importante desta proposta é a sua não agressão ao meio ambiente já que o dispositivo desenvolvido não faz uso de produtos e agentes químicos e tampouco descarta resíduos uma vez que esses são armazenados em um sistema de ejeção de impureza. Dentre as características inovadoras do SIREA, destacam-se:

- ineditismo do processo de limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores, no cenário nacional;
- operação em modo contínuo, a técnica pode ser utilizada sempre que a efetividade térmica do trocador estiver comprometida;
- adequação da técnica de esferas abrasivas às características da tenacidade do *fouling* presente nos dutos dos trocadores, o que permite ajustar a abrasividade das esferas às características das paredes dos dutos;
- economicidade resultante do baixo investimento na adequação do sistema de limpeza dos trocadores de calor;
- manutenção da geração, já que a alternativa proposta não requer a interrupção da geração de energia;
- simplicidade operacional, já que o sistema de limpeza pode ser acionado por simples manobra de válvulas.

As características do SIREA, bem como dos periféricos que o sistema envolve são discutidos neste capítulo.

### 4.3.

#### Caracterização do sistema injetor de esferas abrasivas

O sistema de injeção/recuperação de esferas foi concebido para realizar a limpeza dos tubos do trocador de calor de forma dinâmica e por ciclos de limpeza, assim reduzindo o tempo de limpeza e, conseqüentemente, os custos de manutenção. Esse processo de limpeza visou, também, ganhos de produtividade no processo industrial.

### 4.4.

#### Fluxo de transporte das esferas abrasivas

Fazendo uso de uma bomba hidráulica centrífuga, as esferas são impulsionadas por um fluxo de água de refrigeração em um circuito paralelo que força as esferas para o interior dos dutos do trocador de calor. Esta bomba assegura níveis de vazão e pressão suficientes para que as esferas circulem pelos tubos com controlada interferência (o diâmetro da esfera é ligeiramente maior que o diâmetro interno dos dutos) e que vençam as perdas de carga que são inerentes do sistema em operação, assegurando que as esferas naveguem com uma velocidade pré-determinada para garantir a eficácia do processo de limpeza por abrasão mecânica realizada pelas esferas abrasivas macias.

### 4.5.

#### Vazão volumétrica e velocidade de escoamento

A vazão volumétrica  $\dot{Q}$  da água de resfriamento que circula pelo trocador é dada pela seguinte expressão:

$$\dot{Q} = V \cdot A \quad (3)$$

Desta equação calcula-se a velocidade média do escoamento por uma das equações abaixo:

$$V = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\dot{Q}}{n \cdot A_{tubes}} \quad (4)$$

$$V = \frac{\dot{Q}}{n_{tubes} \cdot \pi / 4 \cdot d_t^2} \quad (5)$$

Segundo informações do fabricante das esferas utilizadas, a velocidade média mínima de 2 m/s nos tubos do trocador de calor assegura um grau de abrasividade suficiente para remover o *fouling* em formação, ainda em sua fase incipiente de formação; ou seja, incrustação que ainda não foi cristalizada nas paredes internas do trocador. A vazão volumétrica necessária para assegurar essa velocidade mínima (por exemplo, num trocador com 13 tubos) é então calculada pela expressão a seguir:

$$\dot{Q} = VA = 2 \cdot n \cdot A_{tube} = 2 \cdot 13 \text{ tube} \cdot 0,0225^2 \cdot 3600 = 37 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (6)$$

Com base nas curvas típicas fabricante de Ksb Bombas (2015), o sistema hidráulico do trocador de calor e do sistema de limpeza desenvolvido (SIREA) requer uma bomba de notável desempenho para a indução do fluxo e consequente circulação das esferas pelo interior dos tubos do trocador. A escolha da bomba correta, requer, também, determinação das perdas de carga a serem vencidas no interior do sistema injetor de esferas e do trocador de calor.

#### 4.6.

#### **Concepção, construção, operação e validação do SIREA**

Esta seção resume os aspectos das fases de concepção, construção e validação do sistema injetor/recuperador de esferas abrasivas (SIREA).

##### 4.6.1.

##### **Concepção do SIREA**

As figuras 43 e 44 (representação plana de um modelo tridimensional) ilustram projeções do sistema injetor/recuperador de esferas abrasivas (SIREA) concebidas para realizar a limpeza dos trocadores de calor utilizados na refrigeração dos hidrogeradores da Usina Fontes Nova, sem a necessidade de parada da turbina. Compõem o SIREA os seguintes subsistemas:

- Bomba centrífuga (B) - responsável pela circulação das esferas abrasivas pelo interior dos tubos do trocador de calor assegurando uma vazão ideal do fluido de resfriamento do trocador (impulsor das esferas);

- Reservatório intermediário (RI) - compartimento usado para armazenamento das esferas abrasivas entre cada ciclo de operação do sistema injetor de esferas abrasivas;
- Lançador de esferas (LE) – câmara para introdução das esferas de forma controlada pelo escoamento do circuito da água de resfriamento;
- Unidade coletora (UC) - compartimento utilizado para a coleta das esferas após um ciclo de limpeza;
- Joelho (J) - dispositivo para desviar parte do fluxo (impulsionado pela bomba de circulação) para o reservatório intermediário;
- Válvulas (V1 e V2) - válvulas para contenção e liberação do fluxo: permanecem totalmente abertas durante a operação de limpeza e totalmente fechadas durante a operação de transferência das esferas abrasivas;
- Válvulas (V3 e V4) - válvulas para contenção e liberação do fluxo: permanecem totalmente fechadas durante a operação de limpeza e totalmente abertas durante a operação de transferência das esferas abrasivas;
- Válvula reguladora (VR) – regula o escoamento para um nível pré-determinado de vazão (uma vez encontrada a vazão ideal para assegurar um ritmo desejado de liberação das esferas no lançador de esferas, essa válvula permanece numa posição fixa);
- Dreno (DR) - dispositivo que permite descartar parte da água de resfriamento do sistema injetor de esferas abrasivas para o afluente durante a operação de transferência;
- Conector de entrada (CE) - conector do trocador de calor ao SIREA; permite o retorno da água de resfriamento e das esferas abrasivas após circularem pelo trocador;
- Conector de saída (CS) - conector do lançador de esferas ao trocador de calor; permite a entrada da água de resfriamento e das esferas abrasivas no trocador.
- Válvula de dreno para expulsar volumes presos de ar no sistema (VSAR) – permite o preenchimento total do SIREA com água descartando o ar inicialmente comprimido pelo líquido em seu interior.

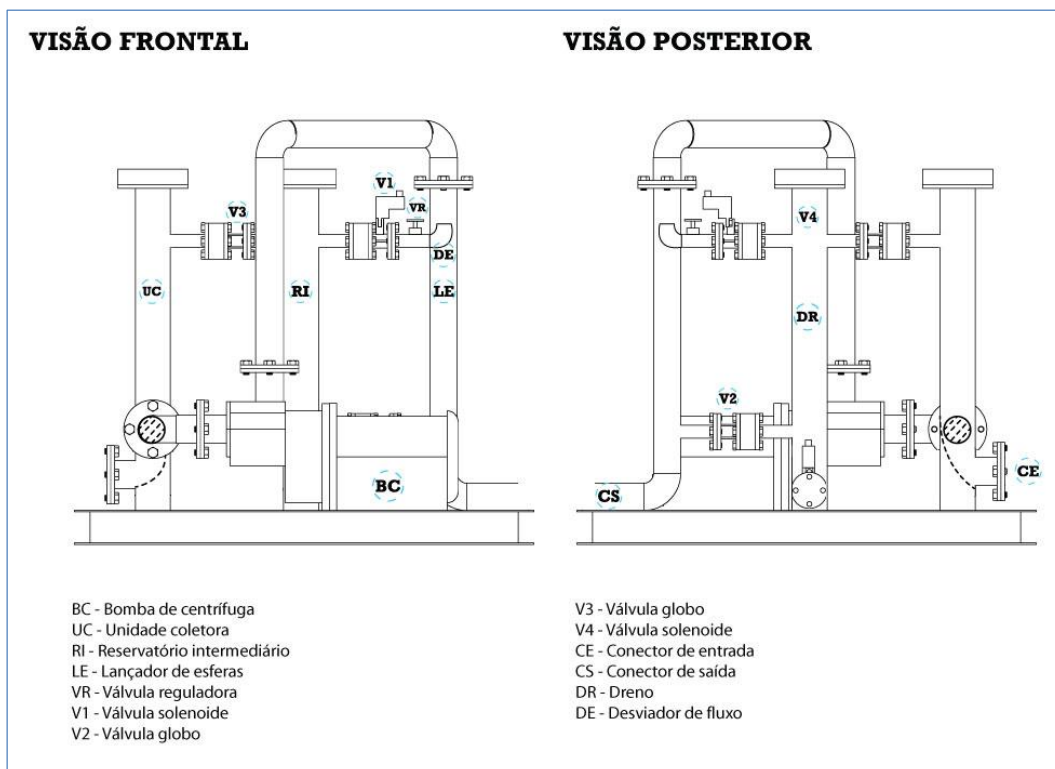


Figura 43: Esquemático e componentes do SIREA

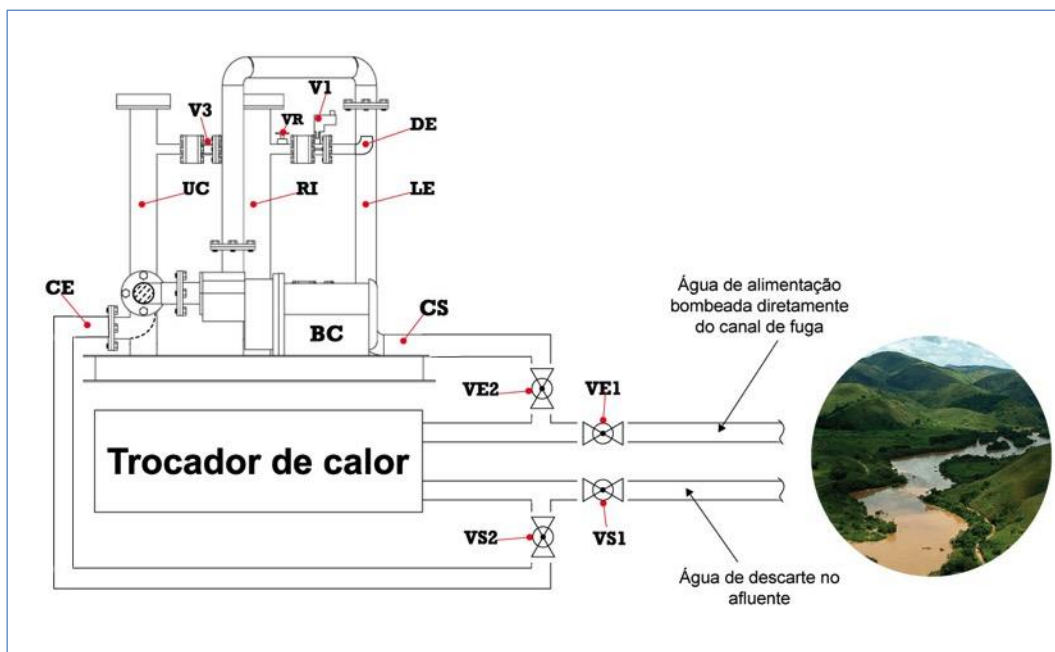


Figura 44: SIREA acoplado ao trocador de calor

O Sistema injetor e recuperador de esferas abrasivas (SIREA) foi concebido para se deslocar com facilidade para facilitar o seu acoplamento nos

trocadores de calor existentes nas diferentes unidades geradoras existentes na usina, assim atribuindo portabilidade ao protótipo.

#### 4.6.2.

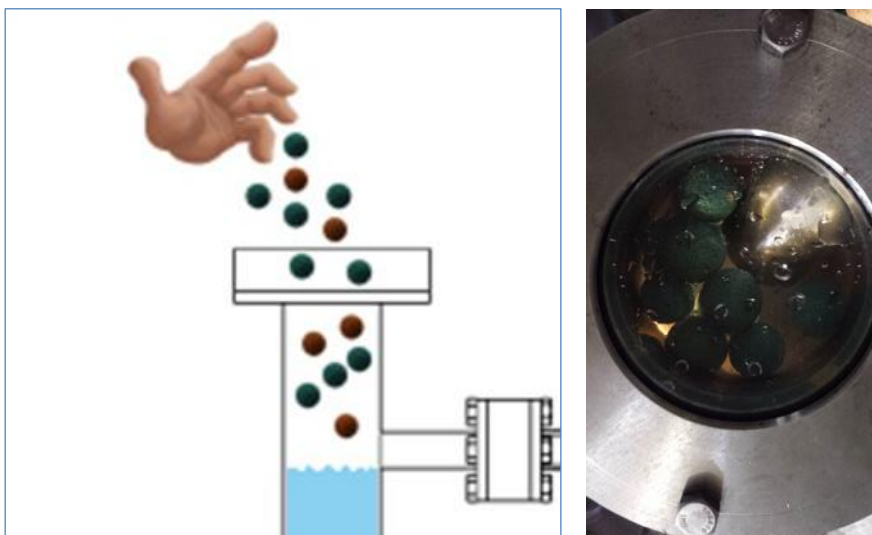
#### Construção do protótipo e descrição da operação do SIREA

A figura 45 ilustra o equipamento construído para injetar e recuperar esferas abrasivas (SIREA) no interior dos dutos do trocador de calor com o propósito de remover o *fouling* neles depositados.



**Figura 45: Versão preliminar do equipamento construído (SIREA)**

A principal característica do sistema de limpeza projetado é a sua facilidade de operação. Na realidade, o processo de limpeza dos tubos se inicia com a alimentação do sistema, ou seja, as esferas abrasivas são introduzidas manualmente pelo reservatório intermediário (RI), conforme ilustrado na figura 46. Antes de a operação de limpeza ser realizada, faz-se necessário preencher todos os tubos e câmaras com água. Neste momento, a válvula de saída de ar ( $V_{SAR}$ ) tem a função de permitir que o líquido preencha por completo o sistema realizando a permuta entre ar e água até uma rápida vazão de estanqueidade, logo após fecha-se a válvula e o sistema pode ser direcionado para os testes orientado pelas recomendações a seguir descritas.



**Figura 46 Alimentação de esferas no sistema de limpeza**

Uma vez alimentado com as esferas abrasivas e devidamente conectado ao trocador de calor que se pretende limpar, realiza-se a conexão do SIREA por meio de engates rápidos e manobra de válvulas, que permitem o acoplamento rápido. A bomba hidráulica é então acionada movimentando o fluido de trabalho que, por sua vez, em circuito adjacente, impulsiona as esferas abrasivas para dentro dos dutos internos do trocador, removendo, assim, o *fouling* presente ainda em estado incipiente de formação.

Para que o fluido percorra o sistema, é necessário que a manobra de válvulas seja precisa e respeite a ordem definida no passo-a-passo anteriormente caracterizado. Assim, a água que sai do trocador (juntamente com as esferas abrasivas que circularam pelo trocador de calor) retornam ao SIREA onde são recuperadas por um dispositivo de tubos concêntricos perfurados para evitar que sejam perdidas por descarga no afluente. Ou seja, a água de resfriamento e as esferas retornam ao SIREA pelo duto de entrada (DE); após passar pela bomba, seguem para o lançador de esferas LS, onde o fluxo é dividido em duas correntes. Uma que segue o fluxo de queda normal e outra impulsionadora, direcionada para a saída do lançador de esferas (LE) desviada pelo joelho J para o reservatório intermediário. A vazão do escoamento é regulada pela válvula VR, que com uma posição fixa, controla a frequência de saída das esferas. Quanto maior a abertura da válvula, maior será o fluxo de água pelo reservatório e, consequentemente, maior a quantidade de esferas que deixarão o reservatório intermediário RI, em

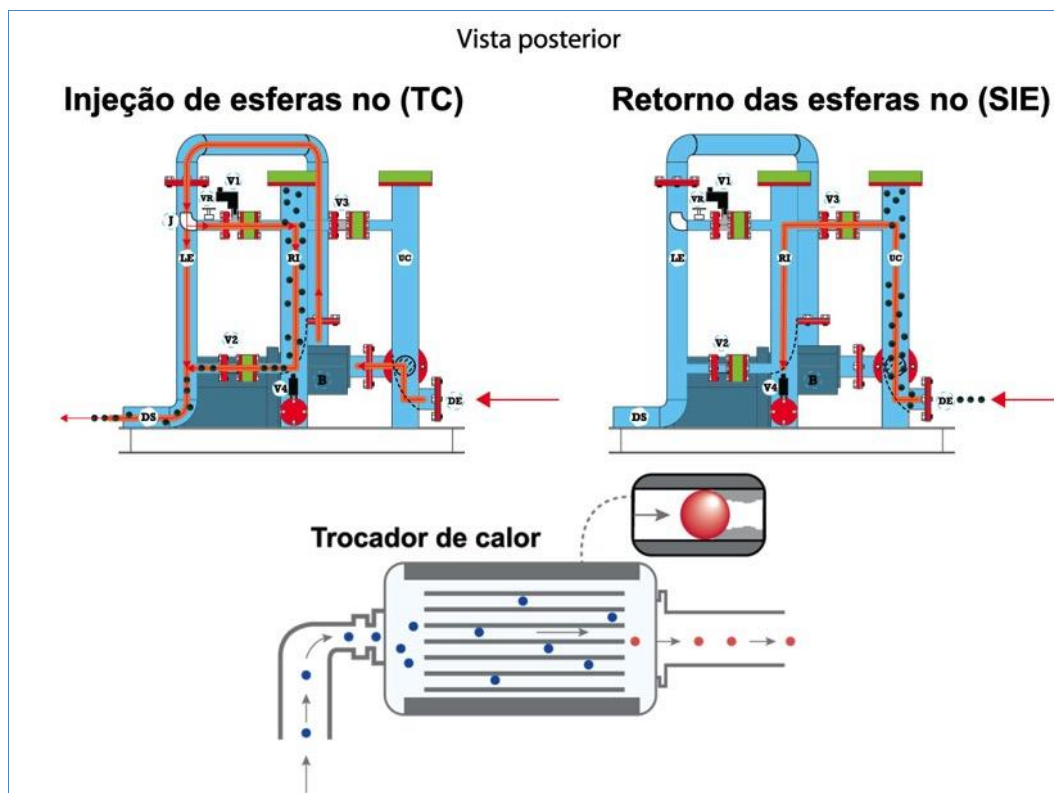
direção ao trocador de calor. Durante a operação de limpeza as válvulas V1 e V2 permanecem totalmente abertas, logo, as válvulas V3, V<sub>SAR</sub> e do dreno (DR) permanecem fechadas evitando o desvio do fluxo de água. O procedimento de manobra com as válvulas de operação está caracterizado na quadro 1.

**Quadro 1: Condições de operação e manobra das válvulas do SIREA**

Válvulas	Operação de limpeza	Operação de transferência
V1	Aberta	Fechada
V2	Aberta	Fechada
V3	Fechada	Aberta
V4	Aberta	Fechada
VE1	Aberta	Aberta
VE2	Aberta	Aberta
VS1	Aberta	Aberta
VS2	Aberta	Aberta
DR	Fechada	Parcialmente aberta
V <sub>SAR</sub>	Fechada	Fechada

A trajetória das esferas abrasivas juntamente com o fluxo de água de refrigeração, é ilustrada na figura 47. Após sua rápida passagem pelo trocador de calor, as esferas abrasivas retornam ao SIREA pelo DE sendo então retidas na tela da UC. Assim que todas as esferas forem recolhidas por completo no compartimento UC, o processo de limpeza deve ser interrompido e as esferas abrasivas transferidas de volta ao reservatório intermediário RI. Abrem-se as válvulas V3 e mantenha o dreno DR parcialmente aberto fecham-se as válvulas V1 e V2 mantendo o parcialmente aberto o dreno DR. Nessa condição, o fluxo de água através do SIREA é impulsionado pela queda de água que circula pelo TC em condições normais de operação. A água entra pelo DE e sobe pela unidade coletora UC impulsionando as esferas de volta para o reservatório intermediário RI. Como a válvula V2 manteve-se fechada, a água é obrigada a deixar o reservatório intermediário RI pela saída inferior, em direção ao dreno, já que a válvula V4 manteve-se aberta. Com isto, as esferas abrasivas ficam retidas no reservatório intermediário RI. Com a conclusão do processo de transferência é possível reverter a manobra de válvulas reiniciando a operação com um novo ciclo de limpeza.





**Figura 47: Esferas abrasivas no interior do sistema injetor**

Um visor tipo janela transparente embutido para a inspeção visual das esferas possibilita o seu monitoramento e o correto momento para abertura e fechamento das válvulas. Visores de acrílico maciço foram instalados no Reservatório Intermediário (RI) e na Unidade Coletora (UC) permitindo monitorar o tempo de saída das esferas e a quantidade de esferas introduzidas e que retornam ao sistema e, também, o tempo decorrido entre o lançamento e o retorno das esferas ao longo de um ciclo de limpeza. As interligações entre os tubos V1, V3 e V4 permitem a transferência de esferas da UC para RI; o visor em V3 indica se há desvio do fluxo da água para RI; V4 completa o ciclo de visualizações com o escoamento da combinação entre água e esfera, enquanto dois pequenos visores acoplados no corpo do RI e UC permitem o uso de lanternas para iluminação indireta do interior das câmaras do sistema.

#### 4.7.

#### **Operação do Sistema Injetor de esferas acoplado ao trocador**

A seleção da bomba hidráulica mais adequada para funcionar o Sistema Injetor/Recuperador de Esferas Abrasivas (SIREA) requereu dois conjuntos de

experimentos distintos: (i) visualização do escoamento da água de refrigeração no interior do trocador de calor, assim permitindo a visualização das esferas impulsionadas pela água bombeada e (ii) experimentos com diferentes bombas para refinamento da pressão ótima de trabalho e da velocidade ideal capaz de de circulação das esferas abrasivas de sorte a conseguir remover o *fouling* incrustado no interior das passagens internas do trocador. Cada um desses conjuntos de experimentos será discutido nas seções a seguir.

#### 4.7.1.

##### **Visualização do escoamento no interior do trocador**

Considerando que o trocador de calor possui diversos tubos em cujo interior circula a água de refrigeração, faz-se necessário dimensionar criteriosamente o número de ciclos de limpeza e o número de esferas abrasivas a serem introduzidas no SIREA para assegurar que todos os tubos sejam visitados pelas esferas abrasivas lançadas no circuito de água do trocador, assim garantindo a remoção do *fouling* em todos os tubos. Considerando que o trocador de calor, de uma maneira geral, possui mais de um passo (número de vezes que a água circula pelo trocador) e que cada passo, que se inicia e se encerra nas chicanas instaladas na extremidade do trocador, possui um número limitado de tubos, cujo fluxo é direcionado por difusores para guiar as esferas de um passo para o subsequente, optou-se por realizar a visualização na extremidade superior do trocador, o que foi conseguido pela substituição da placa de aço de fechamento da chicana por uma placa de acrílico devidamente instalada com uma junta de vedação para evitar vazamentos. No caso do trocador de calor estudado, existem 96 tubos de 22 mm de diâmetro, agrupados em 3 conjuntos de 32 separados por difusores, assim definindo 6 passos, que visam aumentar o tempo de circulação da água de refrigeração para aumentar a efetividade térmica do trocador. A figura 48 ilustra o topo do trocador de calor após substituição da tampa de aço pela tampa transparente de acrílico, assim permitindo amplo campo de visão para as esferas que surgem da base do trocador por um tubo e, após se movimentar pela chicana, desce por um outro tubo.



**Figura 48: visualização das esferas abrasivas em ação**

Estatisticamente pode-se dizer que, resultado do movimento randômico das esferas no interior da chicana, todos os tubos serão visitados pelas esferas abrasivas se o número de esferas e o tempo de cada ciclo de circulação for cuidadosamente dimensionado. Baseado na inspeção visual do escoamento, mantido sob diferentes níveis de pressão imposta pela bomba instalada no SIREA, conseguiu-se identificar as condições de operação mais favoráveis. Após diversos experimentos realizados conseguiu-se especificar a bomba mais adequada para operar o SIREA, conforme é discutido na seção subsequente.

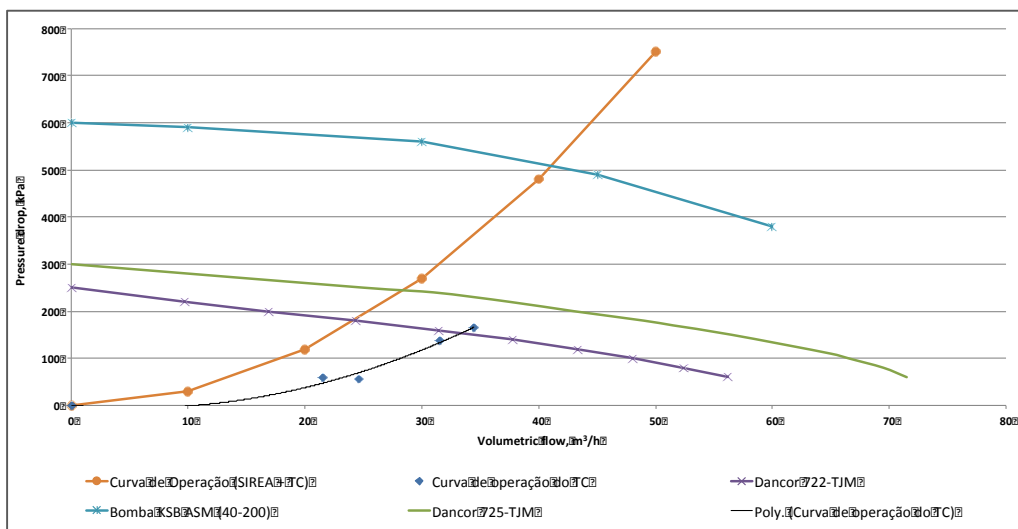
#### **4.7.2.**

##### **Dimensionamento da bomba de operação do SIREA**

O SIREA foi exaustivamente testado em laboratório para identificar os níveis de pressão e vazão ótima da água de resfriamento que impulsiona as esferas abrasivas pelo interior do trocador de calor para remover o *fouling* depositado. Três sequências de experimentos foram realizadas para se chegar aos parâmetros técnicos de dimensionamento da bomba ideal. Experimentos realizados com uma bomba do tipo escorvante (Fabricante: Dancor, ora operada com um motor trifásico de 5,0 CV (configuração bomba-motor 722-TJM), ora operada com um motor de 7,5 CV (configuração bomba-motor 725-TJM), mostraram que a vazão da bomba não era suficiente para que as esferas vencessem a perda de carga do

sistema e tampouco para garantir uma velocidade ideal de circulação das esferas capaz de remover o *fouling* e fluir ao invés de ficarem presas na tubulação impregnada de *fouling*. Esse conjunto de testes mostrou que não apenas o tipo da bomba (escorvante), mas também, o nível de pressão imposta não conseguiu atender as expectativas de operação. Na sequência, um novo conjunto de testes foi realizado com uma bomba hidráulica do tipo centrífuga, concebida para trabalhar com níveis de pressão e vazão mais elevada. Após pesquisa junto aos fabricantes disponíveis, a bomba do fabricante KSB, modelo 40-200, megabloco, com motor de 20 CV de potência e 3500 rpm de rotação, sucção de 2 ½, recalque de 1 ½”, tensão de 220 V/760 V e rotor com 182 mm de diâmetro foi instalada no SIREA em substituição à bomba escorvante e resultados almejados como velocidade da esfera e fluxo ideal da água fossem alcançados.

A figura 49 ilustra o gráfico altura manométrica versus vazão das três bombas testadas. Nesse mesmo gráfico são também mostradas curvas reais de operação (i) do acoplamento do Sistema Injetor de Esferas Abrasivas (SIREA) – trocador de calor objeto do estudo (na condição de trocador em operação antes do processo de limpeza) e (ii) apenas do trocador de calor logo após o processo de limpeza pelo método tradicional (varetagem) foi realizado.



**Figura 49: Curvas características das bombas testadas**

Os dados da tabela 2 resumem características técnicas da operação com as três bombas testadas. Os experimentos e as inspeções visuais realizadas confirmaram que a nova bomba (KSB, modelo 40-200, energizada pelo motor de

20 CV), de fato atendeu aos requisitos de projeto pré-estabelecidos; ou seja, permitiu às esferas abrasivas vencer as resistências impostas ao seu movimento e imprimindo às esferas uma velocidade de deslocamento de esfera que foi capaz de “arrancar” o *fouling*, removendo-o.

**Tabela 2: Características técnicas das bombas testadas**

Bomba acoplada ao SIREA	Especificação da bomba hidráulica acoplada ao SIREA			Dados para cálculo da velocidade da esfera				
	PotM [CV]	H <sub>man</sub> [mca]	Vazão [m³/h]	H <sub>TC</sub> [m]	ε	δ esfera [m]	Δt [s]	Vesfera [m/s]
Dankor; Autoescovante; Série: AAE	5	18	23	2,42	0,17	2,59	11,4	1,42
Dankor; Autoescovante; Série: AAE	7,5	25	28	2,42	0,17	2,59	12,1	1,66
KSB, modelo 40-200	20	51	40	2,42	0,17	2,59	18,2	2,72

**Nomenclatura da Tabela**

**PotM:** Potência do motor acoplado à bomba hidráulica

**H<sub>man</sub>:** Altura manométrica da bomba testada no SIREA

**H<sub>TC</sub>:** altura do Trocador de Calor (TC)

**ε:** espaço (na horizontal) percorrido pela esfera entre dois paços do Trocador de Calor

**δ esfera = (2H<sub>TC</sub> + ε):** espaço percorrido pela esfera no intervalo de tempo Δt

**Vesfera:** Velocidade média de circulação da esfera no interior do Trocador de Calor

Os resultados constantes desta tabela representam valores médios dos experimentos realizados com cada uma das três bombas hidráulicas testadas.

Os experimentos realizados mostraram que o *fouling* é mais facilmente removido para valores de velocidade entre 2,5 e 2.8 m/s, critério de operação esse que não foi atendido pela bomba do tipo escovante para os níveis de pressão-vazão testados. O SIREA foi finalmente validado para operação com a Bomba KSB Modelo 40-200, que viabilizou uma velocidade de escoamento das esferas de V- 2,78 m/s, valor esse comparável ao valor  $V \approx 2$  m/s recomendado por outros pesquisadores que fizeram uso de esferas abrasivas para limpeza de outros equipamentos (Müller-Steinhagen, 2000; Abd-Elhady, Malayeri e Jalalirad, 2014). A figura 50 mostra a bomba KSB Modelo 40-200.



**Figura 50: Bomba selecionada para operação do SIREA**

Fonte: Catálogo do fabricante KSB (Modelo 40-200)

Os parâmetros críticos da bomba (altura manométrica, vazão, potência e o diâmetro do rotor) são especificados pelo fabricante por meio das curvas características da bomba. A figura 51 ilustra a família de bombas centrífuga do fabricante KSB, destacando a bomba selecionada e sua faixa de operação. Já a figura 52 apresenta as características técnicas de desempenho da bomba selecionada.

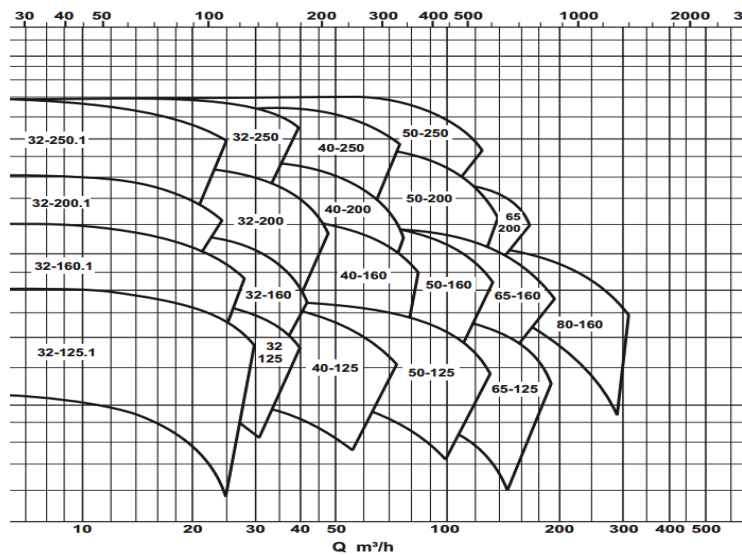


Figura 51: Diagrama para seleção da bomba KSB

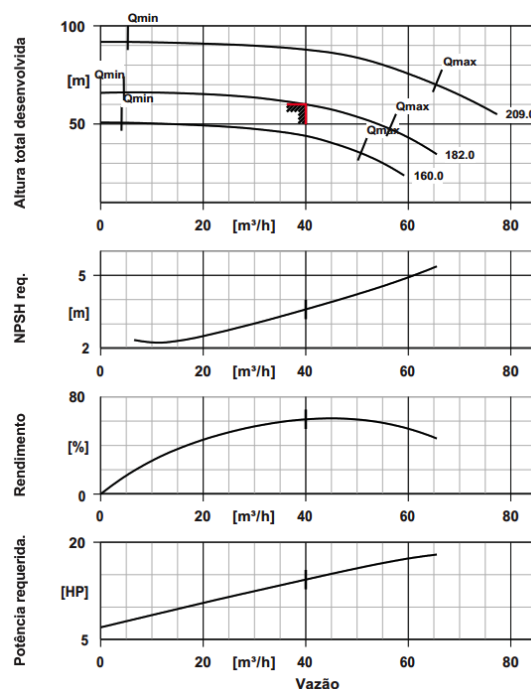


Figura 52: Curvas características da bomba KSB 40-200.

Fonte: *Project Pumps Brasil, folha de dados compacta; (Ksb Bombas, 2015)*

#### 4.8.

#### Introdução de melhorias incrementais no protótipo do SIREA

A figura 53 ilustra a nova versão do projeto modificado do SIREA, que inclui a nova bomba centrífuga especificada e melhorias incrementais introduzidas no protótipo do sistema injetor de esferas, melhorias essas identificadas durante as fases preliminares de investigação da pressão e vazão ótima de operação.



Figura 53: Ilustração da versão final do protótipo do SIREA

Nas avaliações realizados no ambiente do laboratório da PUC-Rio, verificou-se a necessidade de uma nova intervenção para ajustes vitais para a melhoria de desempenho do sistema de recuperação de esferas, a partir de observações na velocidade medida no período de verificação de desempenho do sistema. A alteração da velocidade das esferas abrasivas no interior dos tubos foi a principal motivação para desencadear mudanças realizadas com objetivo inicial de aproximar a medida da velocidade das esferas da velocidade mínima recomendada pelo fabricante, de 2 m/s. As alterações ocorridas são evidenciadas no tópico a seguir.

##### 4.8.1.

##### Implementação de melhorias incrementais no SIREA

As modificações realizadas têm o propósito de oferecer maior eficácia na limpeza dos tubos do trocador de calor, agilidade para locomoção do equipamento e seu acoplamento ao trocador de calor, bem como retirada dos bolsões de ar confinado no interior do SIREA. Dentre as principais melhorias incrementais realizadas nesta fase destacam-se:



- Ajustes no ponto de operação da bomba para assegurar a velocidade ótima de circulação das esferas. Diversos experimentos permitiram variar esta velocidade do valor 1,6 m/s para 2,0 m/s, valor conseguido apenas após a substituição da bomba escorvante (motor de 7,5 CV) para a bomba centrífuga, motor de 20 CV. A figura 55 ilustra a pressão medida na saída do trocador, pressão essa positiva pois simula a pressão do anel de circulação da água de resfriamento na usina.
- Substituição das rodas de borracha para rodas de aço. Esta substituição garantiu maior estabilidade e reduziu risco na operação do protótipo do SIREA já que o equipamento aumentou significativamente o seu peso após a troca da bomba, o que causou deslocamento do centro de gravidade do sistema.
- Substituição de flanges aparafusados por engates rápidos. Para facilitar o acoplamento do protótipo no trocador de calor, os sistemas de encaixe do tipo espigão foram substituídos por engates rápidos.
- Substituição dos flanges aparafusados de acesso às câmaras de injeção e recuperação das esferas abrasivas por engates rápidos. A figura 56 ilustra a nova configuração desses sistemas de acesso rápido às câmaras.
- Eliminação do volume morto no topo da câmara de injeção de esferas. O aumento da espessura do visor de acrílico, montado com chaveta para manter o alinhamento, eliminou o espaço morto que gerava recirculação das esferas no interior da câmara dificultando a sua injeção no sistema.
- Redução da perda de carga no sistema separador de esferas na câmara de sucção da bomba. Modificações no projeto foram realizadas para aumentar o espaçamento entre os dutos concêntricos do separador de esferas, substituindo este dispositivo tubular por um câmara usinada, ilustrado na figura 57.

A figura 54 mostra exatamente a alteração da câmara de recuperação e a pressão medida após o reparo.



**Figura 54: Pressão de teste na câmara de recuperação**





**Figura 55: Câmara de alimentação de esferas**

A figura 56 ilustra o protótipo do SIREA em seu estágio final, após implementação das melhorias incrementais listadas acima.



**Figura 56: Melhorias no sistema injetor de esferas abrasivas**

As modificações realizadas qualificaram o protótipo para ser submetido ao teste de validação final no ambiente da usina Fontes Nova, o que será discutido no próximo capítulo.

## 5

### Avaliação do protótipo do SIREA no ambiente da usina

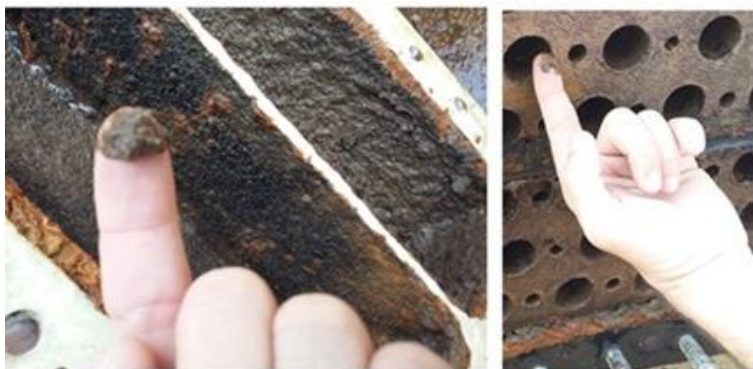
Após a implementação das melhorias incrementais identificadas durante a fase de testes no ambiente do laboratório, o Sistema Injetor/Recuperador de Esferas Abrasivas (SIREA) foi transferido para a usina Fontes Nova onde foi submetido a um teste decisivo para avaliar o seu desempenho em condições adversas de operação no ambiente da própria usina. Este capítulo descreve detalhes desse teste realizado com o propósito de validar o protótipo desenvolvido quando acoplado a um trocador de calor impregnado com *fouling*, imediatamente após a sua retirada da operação na usina após 12 meses de funcionamento. O trocador de calor utilizado foi retirado do Grupo Gerador C, desempenhando o seu papel de resfriar o ar de arrefecimento do hidrogerador acoplado à turbina Francis de eixo vertical.

#### 5.1.

##### Estado de incrustação pelo processo de limpeza tradicional

Simulando condições reais de operação, o teste de desempenho do Sistema Injetor de Esferas Abrasivas (SIREA) foi realizado acoplando-o ao trocador de calor que foi imediatamente removido do grupo gerador para ser submetido ao processo de limpeza com o propósito de resgatar suas condições hidrodinâmicas e térmicas de operação. Entretanto, ao invés de ser submetido ao processo clássico de limpeza manual por varetagem, este trocador foi acoplado ao protótipo construído do SIREA.

Para ilustrar o estado de obstrução que pode ocorrer com esses trocadores após esses longos períodos de uso, as imagens da figura 57 mostram situações típicas documentadas de outros trocadores similares (já que o trocador de teste somente foi aberto após o teste realizado). Conforme exhaustivamente discutido nesta dissertação, a indesejável presença dessas incrustações drasticamente comprometem a eficiência hidrodinâmica do trocador, com consequentes prejuízos à sua efetividade térmica.



**Figura 57: Trocador de calor após 365 dias de operação**

## **5.2.**

### **Teste do protótipo do SIREA na usina hidrelétrica**

O teste de desempenho do Sistema Injetor de Esferas Abrasivas (SIREA) em condições adversas de operação foi realizado não apenas para testar o equipamento em condições limites de operação, mas, também, pela impossibilidade de realizar o seu acoplamento no hidrogerador em operação na Usina Fontes Nova, já que esta operação iria requer uma nova parada da turbina para completa desobstrução do trocador em operação. Optou-se, portanto, por acoplar o SIREA a um trocador de calor montado recém-retirado de operação após 365 dias de intenso uso, montagem essa que foi realizada em área reservada da usina para limpeza dos trocadores. As figuras 58 e 59 ilustram a montagem realizada na Usina Fontes Nova mostrando, lado-a-lado, o SIREA e o trocador de calor, interconectados por mangueiras e válvulas, com acesso à caixa d'água.



**Figura 58: Acoplamento do SIREA no trocador da usina**



**Figura 59: Testes de desempenho do SIREA na usina**

As fotos que compõem as figuras 58 e 59 mostram preparativos para a entrada em operação do teste de desempenho do conjunto SIREA-Trocador de Calor, teste esse que contou com expressiva colaboração de profissionais da equipe de manutenção da usina.

Nessas ilustrações pode-se observar que o SIREA é montado num carro móvel que facilita o seu posicionamento e que os acoplamentos são todos feitos por mangueiras conectadas por engate rápido. Observa-se também que, por simplicidade de operação, o trocador de calor foi posicionado na horizontal para facilitar o acesso visual de suas extremidades onde encontram-se instaladas as chicanas de direcionamento do fluxo de água de resfriamento.

Por meio da câmara injetora de esferas instalada no SIREA, as esferas abrasivas são normalmente introduzidas nos dutos do trocador pelo fluxo de água de limpeza que circula em sistema de circuito fechado forçado pela bomba principal montada na estrutura de suporte do SIREA (bomba centrífuga, 20 CV, altura manométrica 60 mca, modelo KSB 40-200, megabloco 3500 rpm de rotação, sucção de 2 ½", recalque de 1 ½", tensão de 220 V/760 V e Rotor com 182 mm de diâmetro).

Uma caixa d'água com capacidade de 1000 litros montada atrás do box utilizado para realizar os experimentos (não aparece na foto) simula a função do anel de água de refrigeração existente na usina, cuja água é bombeada para o flange de saída do trocador de calor por meio de outra bomba centrífuga que trabalha submersa dentro da caixa d'água, garantindo assim uma pressão positiva na saída do trocador (pressão da ordem de 5 kgf/cm<sup>2</sup> (50 mca). A figura 56 mostra

o manômetro instalado na seção de sucção da bomba principal (20 CV), confirmando essa pressão positiva. Por meio de uma conexão T, a saída do trocador de calor é também conectada ao tubo de sucção da bomba do SIREA, assim permitindo que as esferas retornem à câmara de captação das esferas existente no SIREA. O retorno das esferas ao SIREA após sua circulação pelo interior dos dutos do trocador depende, portanto, da diferença de pressão imposta por essas duas bombas centrífugas que pressurizam entrada e saída do trocador.

### **5.3. Trabalho Experimental**

Fazendo uso do aparato experimental discutido na seção anterior, detalham-se, a seguir, os experimentos realizados com o SIREA acoplado ao trocador de calor em condição adversa de operação.

#### **5.3.1. Experimentos realizados**

É importante ter em mente que este teste de desempenho extrapola as condições ideais de operação do SIREA, originalmente concebido e construído para remover filmes de *fouling* ainda em seus processos incipientes de formação. Dada a impossibilidade momentânea de realizar o teste nessas condições ideais (já que os gestores da usina não planejam parar nenhum grupo gerador no curto prazo) optou-se por um teste mais radical em condição adversa de operação (incrustação já depositada ao longo de 365 dias de operação).

Quatro experimentos foram realizados para fundamentar a avaliação de desempenho planejada. Antes de introduzir um conjunto de esferas abrasivas na câmara de lançamento de esferas do SIREA, o teste de desempenho do equipamento iniciou-se com o SIREA bombeando água (proveniente da caixa d'água que simula o anel de resfriamento) para o interior do trocador de calor com o propósito de remover parte da incrustação existente.

Este teste na ausência das esferas prestou-se não apenas para eliminar a incrustação de fácil remoção, mas, também, para documentar os níveis individuais de operação do sistema.

Na sequência dos experimentos planejados para fundamentar a avaliação de desempenho do SIREA, ciclos de limpeza com diferentes quantidades de esferas abrasivas foram realizados para avaliar diferentes estágios desse processo de limpeza. Esses ciclos são caracterizados a seguir de forma sucinta:

- **Ciclo de limpeza #1** – de um total de 20 esferas inseridas nas passagens internas do trocador, 11 retornaram à unidade coletora do SIREA; ou seja, 9 esferas ficaram retidas por não terem vencido num primeiro fluxo a resistência imposta pelo *fouling* já consolidado no interior dos dutos. Um novo fluxo de água (desta vez na ausência de esferas abrasivas) foi impulsionado conseguindo resgatar mais 2 das esferas originalmente retidas.
- **Ciclo de limpeza #2** – adicionalmente às 7 esferas que não retornaram do ciclo anterior, outras 33 novas esferas foram adicionadas à câmara injetora do SIREA (assim totalizando 40 esferas no sistema). Após recolocar em operação o equipamento, destas 40 esferas 26 retornaram à unidade coletora; i.e.: 14 esferas não conseguiram vencer a resistência do *fouling* e ficaram prisioneiras no interior dos dutos incrustados. Nesta fase do experimento não houve uma nova circulação de água sem esferas como tentativa de um novo resgate.
- **Ciclo de limpeza #3** – adicionalmente às 14 esferas que permaneceram aprisionadas no sistema, 46 novas esferas foram introduzidas, assim totalizando 60 esferas no circuito de limpeza. Ao tentar religar o sistema injetor, observou-se que 8 destas 60 esferas estavam indevidamente alocadas no duto de recalque da bomba (fato não esperado e que será explicado mais adiante), impedindo o correto funcionamento do sistema. Após retiradas por uma válvula de alívio, permaneceram no sistema 52 esferas. Na sequência, um novo ciclo bem sucedido de operação circulou as 52 esferas, das quais 37 retornaram (uma delas aprisionada no dreno de purga da unidade coletora). Na tentativa de resgatar algumas das 15 esferas que permaneceram aprisionadas, nenhuma foi capaz de vencer a resistência do *fouling* após 3 novos ciclos de bombeamento somente com água (não houve nova adição de esferas).

Os dados da tabela 3 resumem os níveis de pressão medido nas seções de entrada e de saída da bomba principal (60 mca), da bomba auxiliar (que simula o anel da água de refrigeração existente na usina) e nas câmaras de injeção e recuperação de esferas. Medições foram realizadas para três condições de operação: (i) sistema operado apenas pela bomba principal (altura manométrica: 60 mca); (ii) operado apenas com a bomba secundária (altura manométrica: 13,1 mca) e (iii) operado simultaneamente com ambas as bombas em funcionamento.



Tabela 3: Níveis de pressão na operação do SIREA

Bomba em operação no acoplamento SIREA-Trocador	Pressão de operação da bomba		Pressão medida nas câmaras	
	Sucção	Recalque	Injeção esferas	Recuperação
	[Kgf/cm <sup>2</sup> ]	[Kgf/cm <sup>2</sup> ]	[Kgf/cm <sup>2</sup> ]	[Kgf/cm <sup>2</sup> ]
Bomba do SIREA (60 mca)	0	2,5	2,5	0
Bomba Caixa d'água (13 mca)	2,5	1,5	0	2,5
Ambas as bombas	3,5	5	1,5	2,5

\* A bomba instalada na caixa d'água simula a pressão do anel de água de refrigeração da usina

Conforme pode ser observado, a bomba trabalha com pressão positiva na sucção, pressão essa que, na condição de operação na usina, é dada pela pressão existente no circuito do anel de água de resfriamento.

### 5.3.2.

#### Desempenho do SIREA: inspeção dos tubos pós limpeza

Concluídos esses três ciclos de limpeza, o trocador foi finalmente aberto para inspeção das passagens internas do trocador. As fotos que compõem a figura 61 ilustram momentos do processo de abertura da tampa da chicana, assim permitindo acesso visual aos 96 tubos do trocador de calor no interior dos quais circula a água de resfriamento.



Figura 60: Trocador de calor submetido ao processo de limpeza

A figura 61, a seguir, documenta duas fotos que ilustram o trocador de topo logo após a sua abertura para inspeção dos 96 tubos por onde circula a água de resfriamento, tubos esses que se comunicam entre si pela câmara da chicana.

A inspeção visual comprovou que, a despeito do longo período de uso dos trocadores, os tubos que de fato foram visitados pelas esferas abrasivas tiveram parte expressiva da incrustação removida, o que comprova a eficácia da técnica alternativa de limpeza mesmo nessa condição adversa de operação.



**Figura 61: Inspeção do TC após passagem das esferas**

Tendo em vista que o número de ciclos de limpeza foi (intencionalmente) reduzido (apenas 66 esferas circularam num trocador com 96 tubos), foi também possível observar a formação do *fouling* nos dutos não visitados por nenhuma esfera abrasiva, assim estabelecendo uma base de comparação entre os tubos visitados e os não visitados pelas esferas abrasivas durante os testes realizados.

Durante a inspeção visual realizada procurou-se, também, encontrar as 15 esferas que não haviam sido recuperadas durante os experimentos realizados. De fato, todas as 15 esferas que não haviam retornado ao SIREA foram encontradas dentro do trocador, algumas na chicana e outras impregnadas de lama no interior dos tubos que não foram desobstruídos. A figura 62, mostra a recuperação por varetagem das esferas restantes do lote de 15 que ficaram aprisionadas no interior de alguns tubos que permaneceram obstruídos.





Figura 62: Eficácia da limpeza por esferas

A figura 63 mostra um zoom de algumas dessas esferas encontradas no meio do *fouling*, provendo evidências concretas de sua capacidade de impulsionar o *fouling* no interior dos dutos do trocador de calor.



Figura 63: Grau de impregnação das esferas abrasivas

### 5.3.3. Refinamento da limpeza: lavagem com água sob pressão

Após a inspeção visual, os dutos que permaneceram com incrustação foram desobstruídos pelo processo convencional de limpeza; ou seja, “varetados”, escovados e lavados com jato de água sob pressão.

As fotos que compõem a figura 64 ilustram o processo final de lavagem dos tubos por meio de um jato d’água sob pressão, completando, assim, o processo de limpeza que não foi concluído pelas esferas abrasivas neste teste parcial realizado.



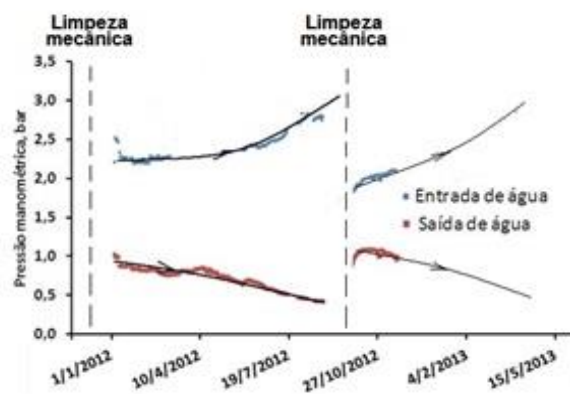
**Figura 64: Limpeza do trocador pela técnica convencional**

Conforme demonstrado acima, a técnica alternativa de limpeza proposta mostrou-se eficaz a despeito de nem todos os tubos terem sido visitados por essas esferas durante o teste parcial realizado. Como será discutida na seção subsequente, esta aparente limitação não deve ser considerada para denegrir a técnica proposta, já que o teste não foi realizado nas condições mais adequadas de operação, mas sim na presença de incrustações já solidificadas no interior dos dutos. Esta aparente controvérsia é discutida, na seção seguinte.

#### **5.4. Considerações finais sobre o teste realizado**

Medições realizadas diretamente na usina, na saída do trocador de calor quando este esteve acoplado ao Grupo hidrogerador C durante seu regime normal de operação, confirma que a pressão de saída do trocador de calor é da ordem de 1 kgf/cm<sup>2</sup> (10 mca), lembrando-se, aqui, que a pressão atmosférica apenas será atingida na saída do trocador quando medida na seção de descarga da água de resfriamento circulante, ou seja, no canal de fuga das turbinas onde a água de arrefecimento dos trocadores é renovada. Esse valor de pressão medida na saída do trocador de calor (dada pelo anel do circuito de água de resfriamento) é confirmada pelos dados da figura 65, que documenta um extrato de medições de pressão realizadas no trocador de calor durante a fase de seu monitoramento na usina (conforme discutido no Capítulo 3 desta dissertação) logo após a limpeza mecânica realizada pela técnica convencional pela equipe de manutenção da usina. Experimentos preliminares realizados com o SIREA acoplado ao trocador de calor disponibilizado pela usina durante a fase de investigação realizada no ambiente laboratorial da PUC-Rio (Capítulo 4) mostrou a importância de se

manter este nível de pressão positiva na saída do trocador, condição que assegura o correto funcionamento do SIREA, notadamente o processo de recuperação das esferas após cada ciclo de limpeza.



**Figura 65: Pressão positiva na saída do trocador em operação**

Importante registrar nesse capítulo que descreve o teste de desempenho do SIREA na condição adversa de operação recentemente realizado na usina Fontes Nova, que os pequenos e indesejáveis acidentes ocorridos durante os experimentos (travamento da bomba ocorrida no experimento com 66 esferas; retorno indevido de esferas para o duto de recalque da bomba e alguns vazamentos) jamais teriam ocorrido tivesse sido respeitada a pressão ideal de trabalho na saída do trocador; fato que não ocorreu já que a bomba secundária utilizada no teste (a única que estava disponível na usina no dia do teste) foi uma bomba de 50% mais potente que a desejável, bomba essa que imprimiu na seção de saída uma pressão de 15 mca, conforme documentado na Tabela 3, que registra pressões medidas pelos manômetros instalados no protótipo.

## 6

### Conclusões e recomendações

Em sintonia com o objetivo originalmente proposto, esta dissertação concebeu e validou uma alternativa tecnológica *on-line* que faz uso de esferas abrasivas para mitigar indesejáveis incrustações em trocadores de calor utilizados no arrefecimento de hidrogenadores sem a necessidade de interromper a operação da usina.

#### 6.1.

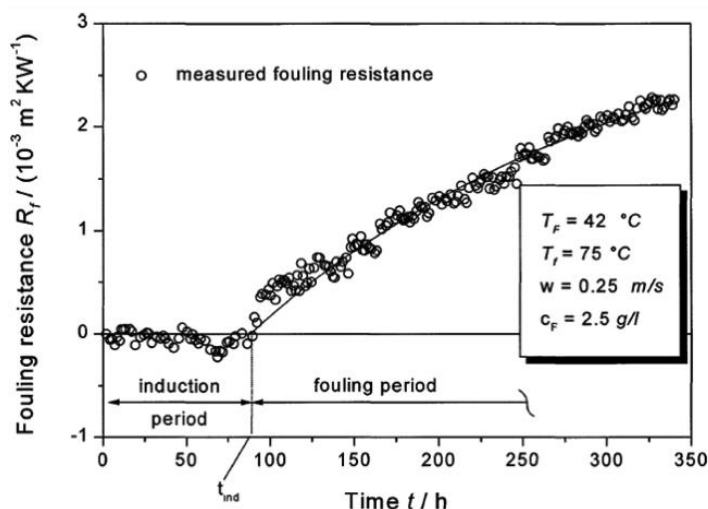
##### Conclusões e recomendações

Objetivos específicos foram igualmente perseguidos como estratégia de atingir o objetivo central acima caracterizado. Nesse sentido, no curso de desenvolvimento do trabalho, um protótipo de um sistema capaz de introduzir e remover esferas abrasivas no interior de trocadores de calor sem a necessidade de paradas técnicas de manutenção foi projetado e construído à luz dos requisitos técnicos da instalação existente na usina hidrelétrica Fontes Nova, selecionada como estudo de caso da presente investigação. A eficácia de operação do protótipo do sistema injetor de esferas abrasivas (SIREA) foi avaliada no laboratório da PUC-Rio com o propósito de fazer os ajustes necessários para adequar a sua operação às condições da usina Fontes Nova. Conforme discutido no capítulo anterior, após uma sequência de experimentos com três bombas hidráulicas distintas, concluiu-se que o piloto do SIREA deve operar com uma bomba hidráulica capaz de assegurar uma altura manométrica de 51 mca (499,8 kPa), vazão da água de circulação de 40 m<sup>3</sup>/h, assim garantindo que as esferas circulem a uma velocidade de 2,72 m/s, identificada como velocidade adequada para fazer a remoção da incrustação.

Validado o protótipo em condições laboratoriais, este foi testado no ambiente da usina, porém em condições mais severas que aquelas que serão normalmente encontradas na usina, já que, com a crise energética atual não foi

possível interromper a usina para fazer a instalação do protótipo à época de finalização desta dissertação de mestrado.

Conforme discutido em outros capítulos desta dissertação, na pesquisa realizada junto à escassa literatura especializada sobre o tema confirmou que poucos são os trabalhos conclusivos associados ao fenômeno relacionado ao crescimento da resistência imposta pela incrustação (*Fouling Resistance*,  $R_f$ ). Dentre os trabalhos inéditos publicados, destaca-se o notável trabalho, Förster, Augustin e Bohnet (1999), que mostram, de forma convincente, que a incrustação tende a permanecer desprezível durante os primeiros dias da operação, caracterizando o que denominaram de período de indução da incrustação (*fouling induction period*). Conforme ilustrado pelos resultados de Förster, Augustin e Bohnet (1999), reproduzidos na figura 66 abaixo para balizar a presente argumentação, a resistência imposta pela incrustação é influenciada pela taxa de nucleação e força de adesão entre os cristais que formam a incrustação nas superfícies internas de troca de calor do trocador.



**Figura 66: Resistência térmica no período de incubação**

Fonte: Influence of adhesion force Crystal heat exchanger surface on fouling mitigation (Förster, Augustin e Bohnet, 1999).

Esses processos de remoção e deposição dependem do que Förster, Augustin e Bohnet (1999), denominam *interfacial free energy crystal/heat transfer surface*. Neste período de transição, que pode durar de horas a vários dias, ou não há formação de incrustações ou estas se encontram no seu estágio incipiente de formação. Fazendo alusão a fluidos não newtonianos complexos, poder-se-ia dizer que essa é a memória da incrustação, o tempo requerido para que

ela se consolide como incrustação e, somente a partir desse intervalo de tempo crítico, é que passa a se desenvolver e impregnar as paredes dos dutos durante a operação do trocador de calor. Essas pesquisas mostraram, também, que o período de indução é maior em paredes de tubulações novas ou adequadamente limpas (remoção de depósitos).

Esse é o fundamento teórico que orientou a construção do Sistema Injetor/recuperador de esferas abrasivas (SIREA) para operar durante essa fase de incipiência da formação do *fouling*, e não durante a fase de *fouling* já cristalizado. Entretanto, por razões circunstanciais já justificadas, o teste de desempenho do SIREA foi realizado em condições absolutamente adversas de operação, mais precisamente, a técnica alternativa proposta foi testada para realizar a limpeza de um trocador de calor que já acumulava incrustações durante um longo período de 365 dias de operação.

Surpreendentemente, mesmo nessas condições adversas de operação, o teste de desempenho recentemente realizado na usina Fontes Nova mostrou-se eficaz. Essa foi também a percepção da equipe de manutenção da usina Fontes, que participou efetivamente da realização desta avaliação de desempenho do Sistema Injetor de Esferas Abrasivas (SIREA) realizada na usina. A técnica alternativa proposta, bem como o equipamento construído para viabilizá-la, mostraram-se promissores como estratégia para racionalizar a limpeza dos trocadores de calor dos hidrogeradores da Usina Fontes Nova sem a necessidade de interromper a geração e de abrir o trocador de calor para submetê-lo ao tedioso processo de varetagem. Desse processo de racionalização esperam-se ganhos de eficiência e economias no processo de manutenção, sem interrupção da geração.

Tendo em vista que a técnica alternativa proposta elimina a necessidade de paradas técnicas de manutenção, é fácil comprovar o impacto econômico positivo que resulta do uso desta técnica. Assim, de forma conservadora, se um único dia de parada técnica para manutenção puder ser evitado, economiza-se com a não interrupção na geração de energia elétrica. Ou seja, a para parada de manutenção de uma única turbina em apenas um dia de operação ( $44 \text{ MW} \times 24 \text{ h} = 1056 \text{ MWh}$ ) representa cerca de R\$ 360 000 (trezentos e sessenta mil reais) por dia se for utilizado um preço médio (entre a tarifa residencial e a industrial) de R\$ 0,341 /kWh. Em outras palavras pode-se dizer que esta energia evitada com a parada de manutenção equivale ao consumo de 70,8 famílias durante 1 mês (o consumo de

energia mensal de uma família é da ordem de 14,9 MWh), o que comprova expressivo impacto econômico.

Conforme discutido, o protótipo do sistema injetor/recuperador de esferas abrasivas (SIREA) foi, portanto validado para operação no ambiente da usina, o que comprova que o objetivo da dissertação foi plenamente atingido.

Mesmo ciente de que esta técnica alternativa de limpeza por esferas abrasivas apenas mostra-se eficaz quando utilizada no período ainda incipiente de formação do *fouling*, o teste de desempenho aqui relatado comprovou a sua aplicação mesmo quando utilizada para realizar a limpeza já em fases tardias em que parte da incrustação já foi cristalizada. Daí explica-se o aprisionamento parcial de parte das esferas utilizadas no teste realizado.

## **6.2. Recomendações para desdobramentos futuros**

A evolução do protótipo para a cabeça de série do equipamento proposto – uma sequência natural na evolução da cadeia de inovação tecnológica de qualquer equipamento – certamente requer esforços adicionais de pesquisa e desenvolvimento. Na sequência desses desenvolvimentos, entende-se que um futuro desdobramento desta pesquisa deverá não apenas (i) implementar outras melhorias incrementais que se mostraram necessárias (blindagem dos drenos para evitar esmagamento de esferas; instalação de válvula de retenção para impedir retorno de esferas pela via de recalque; desbalanceamento de pressão entre a entrada e a saída do trocador; redimensionamento das câmaras de injeção e recolhimento das esferas abrasivas; fortalecimento das esferas abrasivas para atribuir-lhe maior resiliência, dureza, elasticidade, capacidade absorviva e maior ciclo de vida), bem como (ii) a completa automação do sistema para atribuir agilidade e eficácia ao sistema alternativo proposto.

ABD-ELHADY, M. S.; MALAYERI, M. R. Impact of hardness and surface texture on cleaning action of various projectiles. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 94, p. 153–163, February 2015 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2014.07.022> >.

ABD-ELHADY, M. S.; MALAYERI, M. R.; JALALIRAD, M. R. Intensification of the cleaning action of structurally different projectiles by multiple injections and changing injection rate. **Desalination**, v. 337, p. 52-59, 3/17/ 2014. ISSN 0011-9164. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916414000277> >.

AL-BAKERI, F.; EL HARES, H. Experimental optimization of sponge ball cleaning system operation in Umm AI Nar MSF desalination plants. **Desalination**, v. 94, n. 2, p. 133-150, 12// 1993a. ISSN 0011-9164. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0011916493EO126I> >.

\_\_\_\_\_. Optimization of sponge ball cleaning system operation and design in MSF plants. **Desalination**, v. 92, n. 1–3, p. 353-375, 7// 1993b. ISSN 0011-9164. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001191649380090A> >.

ARNAL, J. M. et al. Ultrafiltration membrane cleaning with different chemical solutions after treating surface water. **Desalination and Water Treatment**, v. 7, n. 1-3, n. 1944-3994, p. 198-205, 2012.

BEJAN, A.; KRAUS, A. D. **Heat transfer handbook**. 1. 2003. ISBN 978-0-471-39015-2.

BOTT, T. R. **Fouling of Heat Exchangers**. Elsevier, 1995. ISBN 0080531903. Disponível em: < <https://www.elsevier.com/books/fouling-of-heat-exchangers/bott/978-0-444-82186-7> >.

FROTA, M. N. et al. O papel da qualidade da água em trocadores de calor: estudo de caso em sistemas de arrefecimento de hidrogeradores. ENQUALAB RESAG, 2014, São Paulo. Enqualab, 14: REMESP. p.141-149.

FÖRSTER, M.; AUGUSTIN, W.; BOHNET, M. Influence of the adhesion force crystal/heat exchanger surface on fouling mitigation ☆. v. 38, n. Issues 4–6, p. 449–461, September 1999 1999. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701\(99\)00042-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701(99)00042-2) >.



HAMED, O. A. et al. **SWCC MSF Desalination plants - current status and future prospects**. Head of Thermal Dept., R&D Center, Saline Water Conversion Corporation (SWCC): 13 p. 2002.

JALALIRAD, M. R.; ABD-ELHADY, M. S.; MALAYERI, M. R. Cleaning action of spherical projectiles in tubular heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 57, n. 2, p. 491-499, 2013. ISSN 0017-9310. Disponível em: <  
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793101200837X >.

JERÔNIMO, M. A. S. et al. Monitoring the thermal efficiency of fouled heat exchangers: a simplified method. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 14, n. 4, p. 455-463, 1997. ISSN 0894-1777. Disponível em: <  
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089417779600146X >.

KIKUCHI, M. et al. Development of a laundry waste treatment system. **Nuclear Engineering and Design**, v. 44, n. 3, p. 413-420, 1977.

KLAUS, E. et al. **Cleaning member for cleaning the interior of heat exchanger tubes** 1983.

KSB BOMBAS. **Manual de Curvas Características**. Performance curves booklet. KSB. São Paulo: 75 p. 2015.

LEUNG, M., LAI, G., CHAN W.H., QIN, J.Y., LEE, S.Y. Sponge-Ball Automatic Tube Cleaning Device for Saving Energy. **International energy Journal**, v. 3, p. 9, 2002. Disponível em: <  
http://www.swireproperties.com/webs/ehs2006/02-Sponge-Ball%20Automatic%20Tube%20Cleaning%20Device%20for%20Saving%20Energy.pdf >.

LOPES, A. D. A. D. **Influencia de incrustações na eficiencia de trocadores de calor**. 1995. 101 (Mestrado profissional em engenharia elétrica). UFPA, Belém.

MADI, M.; NEGRÃO, C. O. R.; MASSOQUETI, R. **Análise do crescimento da resistência térmica da incrustação em trocadores de calor**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica Belém - PA , Brasil: 10 p. 2004.

MÜLLER-STEINHAGEN, H.; MALAYERI, M. R.; WATKINSON, A. P. Recent advances in heat exchanger fouling research, mitigation, and cleaning techniques. **Heat Transfer Engineering**, v. 28, n. 3, p. 173-176, 2007. Disponível em: <  
http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33847101049&partnerID=40&md5=3c7352b0ff5b2c0873ffe59123252cc9 >.

\_\_\_\_\_. Heat exchanger fouling: Mitigation and cleaning strategies. **Heat Transfer Engineering**, v. 32, n. 3-4, p. 189-196, 2011. Disponível em: <  
http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78650652158&partnerID=40&md5=5533aaf713e85e38118b0079cb6155ea >.

MÜLLER-STEINHAGEN, H. M. **Handbook of Heat Exchanger Fouling: Mitigation and cleaning technologies**. 2000. ISBN 0852954360. Disponível em: [https://books.google.com.br/books/about/Handbook\\_of\\_Heat\\_Exchanger\\_Fouling.html?hl=pt-BR&id=e5ah-CL-0q4C](https://books.google.com.br/books/about/Handbook_of_Heat_Exchanger_Fouling.html?hl=pt-BR&id=e5ah-CL-0q4C) >.

NEVES, A. V. **Mitigação de incrustação em trocadores de calor de hidrogeradores: estudo de caso da usina de Fontes Nova**. 2013. 118 (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.

OKOUCHI, I. et al. **Cleaning system for heat conductive conduits of a heat exchanger**. Japan: Hitachi, Ltd., Tokyo, Japan: 8 p. 1983.

OLIVEIRA, V. H. J. et al. Alternativa tecnológica para mitigação de biofouling em trocadores de calor de hidrogeradores. VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL e o IV Seminário de Eficiência Energética no Setor Elétrico - SEENEL, 2015, Fortaleza. VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica.

PSOCH, C.; SCHIEWER, S. Direct filtration of natural and simulated river water with air sparging and sponge ball application for fouling control. *Desalination*, v. 197, n. 0011-9164, p. 190-204, 2005.

SHAH, R. K., SEKULIĆ, D. P. **Fundamentals of heat exchanger design**. Lexington, Kentucky: 2006. ISBN 9780471321712.

SOMEAH, K. S.; WHITE, T. L. AUTOMATIC ON-LINE MECHANICAL CLEANING SYSTEMS FOR CONDENSERS AND HEAT EXCHANGERS. American Society of Mechanical Engineers, Power Division (Publication) PWR, 1987. p.169-175.

TONIN, P. C. **Metodologia para monitoramento do desempenho térmico de redes de trocadores de calor**. 2003. 128 (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Brasil.

ZUBAIR, S. M.; SHAH, R. K. Fouling of Plate-and-Frame Heat Exchangers and cleaning strategies. **International Journal of Heat Exchangers**, v. 5, n. 1, p. 129-156, 2004. Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-4043115488&partnerID=40&md5=9f4aadde1bfc2dc065bb557785311dd4> >.