



Anderson Viana Neves

**Mitigação de incrustação em trocadores de calor de
hidrogeradores: estudo de caso da usina Fontes Nova**

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. Mauricio Nogueira Frota
Co-Orientador: Dr. Epifanio Mamani Ticona
Co-Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro, 20 de dezembro de 2013



Anderson Viana Neves

**Mitigação de incrustação em trocadores de calor de
hidrogeradores: estudo de caso da usina Fontes Nova**

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. Mauricio Nogueira Frota
Orientador
PUC-Rio

Dr. Epifanio Mamani Ticona
Co-Orientador
PUC-Rio

Prof. Sergio Leal Braga
Co-Orientador
PUC-Rio

Dr. José Eduardo Rocha
PNPD/CAPES (Pós-MQI)

Dr. Vicente Guimarães
Light Energia

Jose Eugênio Leal
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de dezembro de 2013

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

Anderson Viana Neves

Formado em Desenho Industrial (2011) pela Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio. Gerente Técnico Substituto (Desde 2012) do Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM/ITUC/PUC-RIO). Pesquisador do Projeto de P&D Light/Aneel 06/2007 (*Proposição de solução inovadora para o sistema de resfriamento dos hidrogeradores da usina Fontes Nova*).

Ficha Catalográfica

Neves, Anderson Viana

Mitigação de incrustação em trocadores de calor de hidrogeradores: estudo de caso da usina Fontes Nova / Anderson Viana Neves; Orientador: Mauricio Nogueira Frota; Co-orientador, Epifanio Mamani Ticona; Co-Orientador. Sergio Leal Braga - 2013.

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

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação, 2013.

Incluí bibliografia

1. Metrologia – Tese. 2. Trocadores de calor. 3. Mitigação de incrustações. 4. Dispositivo eletrônico *antifouling*. 5. Hidrogeradores. 6. Efetividade térmica. 7. Esferas abrasivas. I. Frota, Mauricio Nogueira. II. Ticona, Epifanio Mamani. III. Braga, Sergio Leal. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. V. Mitigação de incrustação em trocadores de calor de hidrogeradores: estudo de caso da usina Fontes Nova.

CDD.389.1

Agradecimentos

Para a realização deste trabalho contribuíram várias pessoas, às quais não poderia deixar de agradecer.

Em primeiro lugar, aos meus familiares, pelo constante incentivo durante a realização do mestrado.

À CCPG/PUC-Rio, pela bolsa de estudos que custeou meus estudos de pós-graduação no Programa de Pós-Graduação em Metrologia.

À ANEEL e à Light, pela oportunidade criada com o desenvolvimento do Projeto de P&D Light/Aneel Ref. OKE 06-07 intitulado *Tecnologia de tratamento de água de refrigeração da Usina Fontes Nova*, que suscitou o desafiante tema para desenvolvimento desta Pesquisa de Mestrado.

Em especial ao professor Maurício, pelo permanente incentivo e oportunidade de cursar o Mestrado em Metrologia para Qualidade e Inovação. Um processo decisivo na consolidação da minha carreira profissional.

Ao Co-orientador Epifânio Mamani Ticoná, pelo apoio, ideias inovadoras, interesse e disponibilidade durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Co-orientador e diretor do Instituto Tecnológico (ITUC), professor Sergio Leal Braga, pela oportunidade de participar da equipe de profissionais do Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM).

Aos profissionais com quem convivi, pelo companheirismo durante o período das aulas, pesquisa e desenvolvimento de dissertação.

À dedicada e comprometida equipe da usina Fontes Nova, pelo acesso as instalações e por manter um clima permanente de expectativa favorável à obtenção de resultados de interesse à melhoria dos processos de limpeza dos trocadores de calor. Um agradecimento especial ao Eng. José Rodrigo da Costa Azevedo Neto, Eng. Renato Osório Ferreira, Eng. Gilson Valente, Elmo José Fcamidu e Gabriel, da equipe da Usina Fontes Nova.

Aos funcionários do Pós-MQI, pelo constante apoio administrativo.

Resumo

Neves, Anderson Viana. Frota, Mauricio Nogueira. Braga, Sergio Leal. Ticona, Epifanio Mamani ***Mitigação de incrustação em trocadores de calor de hidrogeradores: estudo de caso da usina Fontes Nova***. Rio de Janeiro, 2013. 118p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A dissertação de mestrado tem por objetivo estudar a indesejável formação do *fouling* no sistema de arrefecimento dos hidrogeradores da usina hidrelétrica Fontes Nova com vistas a propor técnicas alternativas para a sua mitigação. Mais especificamente, avaliar o desempenho de uma técnica *antifouling* que expõe o escoamento à ação de um campo elétrico externo. A pesquisa foi motivada (i) pela perspectiva de contribuir para o entendimento do complexo fenômeno de formação e mitigação do *fouling* e (ii) pelo desafio de propor um método on-line, não invasivo, de simples operação, em contraposição aos métodos de limpeza mecânica e química normalmente ofensores do meio ambiente e que requerem a interrupção da geração. Desenvolvido no contexto do projeto de P&D Light/Aneel Ref. OKE 06-07 intitulado *Tecnologia de tratamento de água de refrigeração da usina Fontes Nova*, a pesquisa, de natureza experimental e quantitativa, desenvolveu-se com base numa metodologia que avalia o desempenho hidrodinâmico e térmico do trocador de calor quando submetido à ação do dispositivo *antifouling* estudado. Os resultados do trabalho permitiram concluir que a incrustação predominante é de natureza Bio (*biofouling*) e que embora o dispositivo não invasivo iniba a formação dos indesejáveis micro-organismos que obstruem o trocador e afetam a sua eficácia de operação ele não elimina o problema. A partir dessa constatação, uma técnica alternativa de limpeza on-line que faz uso de esferas abrasivas foi concebida e projetada para promover a limpeza do trocador de calor em operação.

Palavras-chave

Metrologia; trocadores de calor; mitigação de incrustações; dispositivo eletrônico *antifouling*; hidrogeradores; efetividade térmica; esferas abrasivas.

Abstract

Neves, Anderson Viana. Frota, Mauricio Nogueira (Advisor) Braga, Sergio Leal (Co-advisor). Ticona, Epifanio Mamani (Co-advisor) *Mitigation of fouling in heat exchangers of hydrogenerators: case study of the Fontes Nova power plant*. Rio de Janeiro, 2013. 118p. MSc. Dissertation - Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of the master thesis is to study the undesirable formation of fouling in the cooling system of hydroelectric generators of Fontes Nova Power Plant with the view to propose an alternatives techniques for its mitigation. more specifically, to assess the performance of an antifouling device that exposes the flow to the action of an external electric field. The research was motivated by the perspective of contributing to the understanding of the complex phenomenon associated with the formation and mitigation of fouling and by the challenge of proposin an alternate on-line, non-invasive method, of simple operation, contrasting to conventional of mechanical and chemical cleaning methods that normally offender the environment and requires interruption of the generation. Developed in the context of the project R&D light/aneel Ref. OKE 06-07 entitled Technology for treatment of refrigeration water of the Fontes Nova Power Plant, the research, of quantitative and experimental nature, was developed based on a methodology that assess the of hydrodynamic and thermal performance of the heat exchanger when submitted to the action of the antifouling device studied. The results of the work support the conclusion that the fouling is of a biological nature (biofouling) and that although the non-invasive device inhibits the formation of the unwanted microorganisms that block the exchanger and affect its effectiveness of operation it does not eliminate the problem. An alternative on-line cleaning technique that makes use of abrasive spheres was designed and engineered to clean the heat exchanger in operation.

Palavras-chave

Metrology; heat exchangers; abrasive balls; biofouling; hydrogenerators; thermal effectiveness; mitigation of biofouling.

Sumário

1 Introdução	13
1.1. Definição do problema da pesquisa	16
1.2. Caracterização do problema	17
1.3. Objetivos: geral e específicos	18
1.4. Metodologia	19
1.5. Motivação	20
1.6. Justificativas	21
2 Incrustações em trocadores de calor: estado-da-arte	22
2.1. Fundamentos sobre o processo de formação de incrustação	22
2.2. O fenômeno do <i>biofouling</i>	25
2.3. O conceito de <i>biofouling</i>	26
2.4. Etapas de formação	29
2.5. Mecanismos de formação	31
2.5.1. Resistência térmica da incrustação	32
2.5.2. Fatores que influenciam a formação do <i>biofouling</i>	36
2.6. Impactos econômicos causados pelo <i>biofouling</i>	38
3 Mitigação de <i>biofouling</i> em trocadores de calor	40
3.1. Tecnologias <i>on-line</i> e <i>off-line</i> de limpeza	42
3.1.1. Tecnologias <i>on-line</i>	42
3.1.2. Tecnologias <i>off-line</i> de limpeza	48
4 Avaliação do dispositivo eletrônico <i>antifouling</i>	55
4.1. Estudo do <i>biofouling</i> na usina hidrelétrica Fontes Nova	55
4.1.1. Estudo da qualidade das águas de alimentação	55
4.1.2. Qualidade das águas	57
4.2. <i>Aparatus</i> experimental: sistema de medição desenvolvido	58
4.3. Validação do sistema de medição de vazão	62
4.4. Estudo da eficácia do dispositivo <i>antifouling</i> na usina Fontes Nova	64

4.4.1. Técnica de excitação por campo elétrico	65
4.4.2. Experimentos preliminares com a técnica proposta	65
4.5. Fundamentos da hidrodinâmica e da transferência de calor	68
4.5.1. As bases para a avaliação hidrodinâmica do trocador de calor	69
4.5.2. As bases para a avaliação térmica do acoplamento água-óleo	71
4.6. Estudo do escoamento submetido ao efeito do campo elétrico	75
4.6.1. Caracterização dos três ciclos de medição (circuito água-óleo)	76
4.6.2. Estudo do efeito do dispositivo <i>antifouling</i>	78
4.6.2.1. Comparação #1: dispositivo instalado no circuito adjacente	79
4.6.2.2. Diferenças de temperatura medidas no acoplamento água-óleo	80
4.6.2.3. Medição da vazão da água de arrefecimento	81
4.6.2.4. Taxa de transferência de calor do acoplamento água-óleo	83
4.6.2.5. Avaliação de desempenho térmico do trocador de calor	84
4.6.2.6. Avaliação térmica pela efetividade do trocador água-óleo	85
4.6.2.7. Avaliação de desempenho hidrodinâmico do trocador de calor	88
4.6.3. Comparação #2: dispositivo instalado no circuito principal	91
4.6.3.1. Características dos experimentos	91
4.6.3.2. Efeito do campo magnético na vazão de água de resfriamento	92
4.6.3.3. Efeito do campo elétrico na efetividade dos trocadores de calor	93
4.6.3.4. Efeito do dispositivo antifouling na hidrodinâmica do escoamento	94
4.7. Síntese dos resultados obtidos	95
5 Método alternativo de limpeza de trocadores de calor	102
5.1. Caracterização das esferas abrasivas	103
5.2. Concepção do sistema injetor de esferas	105
5.3. Funcionamento do sistema injetor de esferas abrasivas	108
6 Conclusões e recomendações	113
Referências bibliográficas	115

Lista de figuras

Figura 1- Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos	19
Figura 2 - Progressão do biofilme em escoamento turbulento	23
Figura 3 - Etapas da formação da incrustação	24
Figura 4 - Processo de incrustação	30
Figura 5 - Diagrama do processo de incrustação	30
Figura 6 - Gráfico das curvas de incrustação	33
Figura 7 - Curva típica de incrustação	35
Figura 8 - Ilustração do processo de limpeza por escova	43
Figura 9 - Passagem de uma escova por um tubo de TC	43
Figura 10 - Inserção por fios de arame	47
Figura 11 - Brocas, cortes e ferramentas de desgastes	50
Figura 12 - Técnica de limpeza pelo uso de balas, raspadores e purificadores	51
Figura 13 - Técnica de limpeza mecânica	51
Figura 14 - Exemplo de raspadores	52
Figura 15 - Dispositivo de água	52
Figura 16 - Resultados das análises químicas realizadas	58
Figura 17 - Esquemático do sistema de aquisição de dados desenvolvido	59
Figura 18 - Conjunto de três trocadores de calor tipo placas verticais	61
Figura 19 - Esquemático das estações de medição e nomenclatura utilizada	61
Figura 20 - Detalhes do sistema de medição	62
Figura 21- Processo de seleção do β e medições realizadas	63
Figura 22 – Testes realizados para estudo do efeito da incrustação	64
Figura 23 - Equipamento Dispositivo <i>antifouling</i> , modelo S160	65
Figura 24 - Caracterização dos eventos	66
Figura 25 - Registro evolutivo das temperaturas medidas	67
Figura 26 - Variação do fator de atrito (f) em dutos	70
Figura 27 - Variação do fator de atrito (f) em escoamento entre placas planas	70
Figura 28 - Distribuições de temperaturas do “fluido quente” e do “fluido frio”	73
Figura 29 - Caracterização dos três ciclos de experimentos	77
Figura 30 - Comparação entre as medições	79

Figura 31 - Evolução das diferenças de temperatura da água e do óleo	80
Figura 32 - Desempenho hidrodinâmico do trocador de calor #B	81
Figura 33 - Potência de resfriamento calculada	83
Figura 34 - Desempenho térmico	85
Figura 35 - Relação das capacidades caloríficas do óleo e da água	86
Figura 36 - Diferença de temperatura da água-óleo	87
Figura 37 - Vazão da água e óleo no trocador de calor #B	87
Figura 38 - Decréscimo da efetividade do trocador	88
Figura 39 - Relação entre a queda de pressão ΔP e o quadrado da vazão (m^2)	89
Figura 40 - Comparação entre as medições	91
Figura 41- Comparação dos valores de vazão	93
Figura 42 - Efeito da exposição do fluido de refrigeração a um campo elétrico	94
Figura 43 - Quociente entre a queda de pressão ΔP e o quadrado da vazão (m^2)	95
Figura 44 - Esquema ilustrativo da usina Fontes Nova	96
Figura 45 - Critério hidrodinâmico para avaliação do dispositivo <i>antifouling</i>	97
Figura 46 - Critério para avaliação térmica do dispositivo	99
Figura 47 – Evolução da resistência ao <i>fouling</i>	100
Figura 48 - Uso de esferas abrasivas para limpeza de dutos do TC	103
Figura 49 - Circulação de esferas abrasivas no interior do trocador de calor	104
Figura 50 - Esquemático e componentes do SIE	107
Figura 51 - Circuito fechado com o SIE acoplado no trocador de calor	108
Figura 52 - Alimentação de esferas no sistema de limpeza	108
Figura 53 - Trajetória das esferas abrasivas no interior do sistema injetor	111
Figura 54 - Placa condicionadora de sensores de operação das válvulas	112
Figura 55 - Controle de injeção de esferas abrasivas	112

Lista de tabelas

Tabela 1 - Condutividade térmica de incrustantes típicos	35
Tabela 2 - Estimativa anual dos gastos com incrustação em (1984)	38
Tabela 3 - Estimativa do impacto econômico da incrustação (1992)	38
Tabela 4 - Natureza das incrustações e técnicas de limpeza em trocadores	49
Tabela 5 - Aplicações de dispositivos de perfuração e desobstrução	50
Tabela 6 - Caracterização dos canais do sistema proposto	60
Tabela 7- valores estimados das vazões de água nos subsistemas	75
Tabela 8 - Dados de vazão em função de diferenças entre as placas	82
Tabela 9 – Incerteza da medição associada à razão $\Delta P/m^2$	98
Tabela 10 - Incerteza associada ao cálculo da efetividade ϵ e do índice IF	101
Tabela 11 - Condições de operação e manobra das válvulas do SIE	110

Siglas e 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
CT	Conversor de temperatura
GNP	Produto Interno Bruto
ITUC	Instituto Tecnológico da Universidade Católica
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
P_{be}	Pressão na entrada do bocal
P_{bs}	Pressão na saída do bocal
P_e	Pressão na entrada da tubulação de água
PIG	<i>Pipeline inspection gauges</i>
P_s	Pressão na saída da tubulação de água
PUC	Pontifícia Universidade Católica
SIE	Sistema de injeção de esferas abrasivas
SP	Sensor de pressão
SPE	Substâncias poliméricas extracelulares
ST	Sensor de temperatura
T_{ae}	Temperatura na entrada da água
T_{as}	Temperatura na saída da água
TC	Trocador de calor
TEMA	Tubular Exchanger Manufactures Association
T_{oe}	Temperatura na entrada do óleo
T_{os}	Temperatura na saída do óleo
UC	Unidade coletora
UH	Usinas hidrelétricas
V1 ... V4	Válvulas solenoides para abertura/fechamento automático
VE1 e VE2	Válvulas de entrada do SIE
VR	Válvula reguladora
VS1 e VS2	Válvulas de saída (água de descarte no afluyente)

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 canais 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 tão drasticamente afetam a eficácia de operação desses equipamentos auxiliares, 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. 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 do biofilme quando este atinge uma espessura crítica não tolerável (Bott, 1994).

A indesejável 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. 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.

Locus desta pesquisa de mestrado menciona-se aqui o caso da usina Hidrelétrica Fontes Nova, de propriedade da concessionária Light Energia (localizada no município de Piraí, RJ), que 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 7400 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 hidrogeradoras 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 (Relatório técnico, 2013).

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.

O presente trabalho 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.

Esta dissertação de mestrado em metrologia se insere no contexto de um trabalho realizado a partir de uma demanda da concessionária que estimulou o desenvolvimento de um projeto de P&D para estudar o problema. Surgiu, assim, para desenvolvimento na usina Hidrelétrica Fontes Nova, o Projeto de P&D Light-Aneel proposto pela PUC-Rio: *Tecnologia de tratamento de água de refrigeração da usina Fontes Nova*. P&D Light Energia, Referência P&D OKE 06-07. Usina Fontes Nova, Pirai, RJ.

O objetivo central do P&D foi o estudo da exposição do escoamento da água de refrigeração dos TC (do tipo placas verticais, água-óleo) ao efeito de um campo elétrico induzido pelo equipamento não invasivo (patente inglesa) (HydroPath Technology, 1999). O estudo resultou do interesse da equipe de manutenção da usina Fontes Nova em explorar alternativas de manutenção do sistema de TC frequentemente obstruídos pelo indesejável fenômeno do *biofouling* (incrustações) cuja natureza ainda era pouco compreendida à época.

O projeto de P&D cumpriu o seu propósito de avaliar a eficácia de uma tecnologia alternativa de tratamento de incrustações em TC utilizados em usinas hidrelétricas. A técnica foi testada no trocador de calor (água-óleo) utilizado para resfriar o óleo de arrefecimento dos mancais da turbina. A água utilizada como fluido (frio) de trabalho do TC foi exposta à ação de um campo elétrico induzido por um dispositivo elétrico (disponível pelo seu nome comercial HydroFLOW).

O equipamento avaliado apresentou resultados satisfatórios quando instalado diretamente a montante no duto de captação da água que alimenta os TC. Embora os testes desenvolvidos tenham permitido comprovar a eficácia da tecnologia testada, o controle (em campo) do experimento mostrou-se fortemente sensível à sua posição no escoamento e às condições de operação. O Projeto de P&D mostrou que o sistema HydroFLOW inibe a formação dos indesejáveis micro-organismos que obstruem os TC embora não elimine o problema. Foi a partir dessa constatação que se decidiu pelo desenvolvimento de um trabalho

complementar, mais amplo e sistemático, das águas de resfriamento envolvendo os trocadores de calor água-ar do sistema de arrefecimento dos hidrogeradores e que fortemente impactam a sua eficácia de operação.

Para todos esses desdobramentos do P&D mencionado tornou-se necessário estudar os métodos e tecnologias existentes de mitigação do indesejável efeito das incrustações. Estratégia essa para facilitar a compreensão da essência do fenômeno de formação do *biofouling* que tão drasticamente afeta a operação dos TC acoplados aos hidrogeradores permitindo desenvolver um método capaz de mitigar os indesejáveis efeitos causados pelas incrustações.

Em virtude da demanda de trabalhos futuros provenientes da investigação iniciada no P&D mencionado surgiu a oportuna possibilidade de desenvolver uma pesquisa de mestrado. Essa pesquisa tem como foco o aprofundamento de práticas capazes de mitigar a indesejável formação do *biofouling* e contribuir para o avanço do conhecimento sobre a formação de incrustações em trocadores de calor. Desse modo, a pesquisa de mestrado proposta objetivou responder às seguintes questões:

Quais são os mecanismos de formação do *biofouling* na Usina Fontes Nova e seus impactos adversos na efetividade dos TC utilizados para o arrefecimento dos mancais dos hidrogeradores?

Dentre os métodos utilizados para a prevenção e combate à incrustação em TC, quais são os mais eficazes e como mitigar os depósitos biológicos sem causar danos ao meio ambiente e comprometer a vida útil dos TC?

Que método alternativo à prática usual deverá ser proposto para mitigar os efeitos adversos do *biofouling* nos TC dos hidrogeradores da usina Fontes Nova?

Essas questões suscitadas refletem os objetivos desta pesquisa de mestrado.

1.1. Definição do problema da pesquisa

Paradas técnicas para manutenção são necessárias para limpeza dos trocadores de calor (TC), indesejavelmente ocasionando interrupção na geração de energia, prejuízos de receita e elevados custos de manutenção.

Usualmente, o processo convencional de limpeza requer paradas das máquinas para desobstrução dos TC por meio de varetagem de suas serpentinas

com o uso de escovas com pontas de nylon e jato de água à alta pressão. Geralmente, essas paradas acontecem com uma periodicidade que comprometem a regularidade da operação da usina. As paradas são programadas ao longo do ano e podem levar de dias há meses para limpeza e manutenção dos equipamentos dependendo do grau de comprometimento, tornando-se onerosas e demoradas. Cada método de limpeza possui a sua especificidade e apresenta um problema distinto. Esses problemas podem ser caracterizados quer pelo dano à integridade estrutural dos equipamentos (vida útil devido aos desgastes provocados pelo atrito das limpezas mecânicas) quer pelos riscos de contaminação química dos afluentes próximos à usina. A contaminação química, em particular, torna-se mais agravante quando o tratamento químico corresponde não somente a água de refrigeração (circuito fechado), mas também ao fluido de geração (notadamente quando parte deste é utilizado também para refrigeração). O desenvolvimento de métodos capazes de eliminar ou reduzir o número de paradas para solucionar este problema trará benefícios imediatos ao regime de operação da usina.

1.2. Caracterização do problema

A presença de agentes (resíduos) de natureza orgânica, inorgânica ou de matéria viva, encontrados a partir da sedimentação de partículas espessas de argila, sílica, algas e outras matérias orgânicas presentes nas águas de refrigeração da usina aderem e crescem nas superfícies dos canais internos dos TC. Esses agentes são chamados de *biofouling* quando oriundos de matéria viva. Com o tempo, o *fouling* adere e agrega material de origem orgânica e partículas inorgânicas de sais e produtos corrosivos que o torna, ainda mais, aderente e nocivo ao sistema.

O resultado final da sequência desses eventos é geralmente caracterizado por três etapas distintas, a saber: (i) indução; (ii) aumento exponencial; e (iii) fase plana constante (Bott, 1994).

A primeira fase na formação do fouling resulta da deposição dos resíduos, induzindo à formação de uma fina camada pelo seu acúmulo. A fase subsequente é caracterizada pela progressão (em alguns casos de crescimento logarítmico) de acúmulo de depósitos, podendo resultar na obstrução total das passagens do TC.

Os impactos adversos causados pelo *biofouling* reduzem a capacidade térmica do TC e, conseqüentemente, sua efetividade ao longo do tempo. Isto é consequência da obstrução causada pela camada criada em cima da superfície do canal interno do TC. Logo, a transferência de calor de um meio para o outro fica insuficiente, induzindo (i) redução da vazão da água de refrigeração pela perda de carga que decorre da obstrução na linha de operação e (ii) aumento da temperatura no TC, fatores determinantes na eficácia de operação do sistema como um todo.

É nesse contexto que foi definida a motivação para o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado, ou seja, contribuir para a mitigação dos indesejáveis efeitos de incrustação em TC utilizados no arrefecimento de hidrogeradores.

1.3. Objetivos: geral e específicos

O objetivo geral da dissertação é contribuir para o avanço do conhecimento sobre técnicas de mitigação de incrustação em TC. Mais especificamente, propor método capaz de mitigar a indesejável formação do *fouling* no sistema de arrefecimento dos hidrogeradores da usina Hidrelétrica Fontes Nova, de propriedade da Concessionária Light Energia (localizada no município de Pirai, RJ). Deseja-se que a solução, proposta e testada, seja então adaptada à realidade de outras usinas de similar constituição.

A identificação dos chamados parâmetros instrumentais que caracterizam a formação do *fouling* é importante neste processo, o que, obrigatoriamente, requer a instrumentação de TC em operação na usina. A instrumentação do sistema permite, portanto, a coleta de dados e o monitoramento da operação em regime de tempo real das grandezas vazão, pressão e temperatura de trabalho. A pesquisa avaliou a eficácia de um dispositivo comercial cuja análise de desempenho motivou a proposição de uma tecnologia alternativa que elimina a necessidade de parada das turbinas (interrupção da geração), proposta essa discutida no capítulo 5 e objeto complementar desta pesquisa de mestrado.

1.4. Metodologia

De acordo com as taxonomias propostas por Vergara (2005) e Gil (1999), quanto à sua finalidade, a pesquisa tem caráter descritivo e aplicado. Quanto aos meios de investigação, foram utilizados os seguintes métodos: pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental e pesquisa de campo e quanto a sua natureza, a pesquisa é predominantemente quantitativa.

A Figura 1 apresenta a sequência da pesquisa em suas três grandes fases.

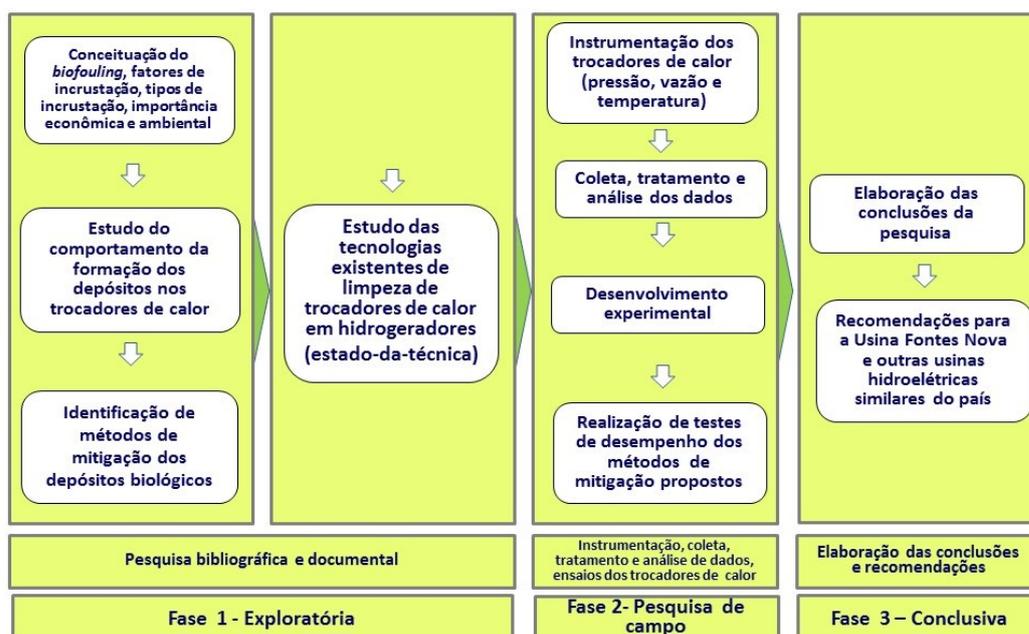


Figura 1- Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos

O desenho da pesquisa caracteriza, para cada fase de seu desenvolvimento, as sequências lógicas do trabalho de revisão bibliográfica, trabalho experimental e os métodos utilizados durante o trabalho de investigação.

- Fase 1: pesquisa exploratória e descritiva – No contexto da fase de pesquisa exploratória e descritiva, a pesquisa bibliográfica e documental (fase #1 do trabalho) teve o objetivo de identificar trabalhos conceituais sobre os temas centrais da pesquisa (fatores, tipos de incrustação, importância econômica e ambiental, origem do fouling)
- Fase 2: pesquisa aplicada – A fase #2 concentrou-se no estudo da formação dos depósitos nos TC e dos métodos de mitigação de depósitos biológicos. Cada método pesquisado mostrou-se associado a uma variedade de tecnologias de limpeza de TC, assim, enfatizando as melhores práticas hoje utilizadas. Subsequente à revisão bibliográfica e documental, essa fase norteou a definição dos objetivos da pesquisa e o desenvolvimento de um modelo preliminar na fase exploratória e descritiva. Ocorreram no curso do desenvolvimento desta fase da pesquisa a concepção e a instalação do sistema para aquisição,

monitoramento e transmissão remota de dados. Esse sistema permitiu a medição e registro das grandezas pressão, temperatura e vazão. Validada em campo (no ambiente real de operação da usina hidrelétrica Fontes Nova) a instrumentação permitiu o levantamento de dados durante a vigência da pesquisa, tendo sido mantida pelos operadores da usina que perceberam o sistema como um provedor de informações úteis à operação da usina. Com base nos resultados (medições de pressão, temperatura e vazão dos fluidos de trabalho dos trocadores de calor) foi possível desenvolver análises hidrodinâmicas e térmicas do desempenho dos TC durante o processo de formação do fouling. Após a etapa de medições do monitoramento do sistema de arrefecimento dos hidrogeradores e, para assegurar a confiabilidade das medições e procedimentos durante a fase de desenvolvimento da alternativa tecnológica proposta, um dos trocadores de calor (do tipo Westinghouse tubos aletados, 920 kg aproximadamente, marca Westinghouse, utilizado na usina hidrelétrica Fontes Nova) foi transferido e instalado no Laboratório do Instituto Tecnológico da PUC-Rio (prestando-se como parte do *aparatus* experimental desta pesquisa de mestrado). O desenvolvimento e validação da tecnologia serão discutidos no capítulo 6 da dissertação

- Fase 3: conclusivo-propositiva – Após a fase da pesquisa aplicada (fase #2 do trabalho) iniciou-se a fase conclusiva propositiva (fase #3). Nessa fase, foram elaboradas as conclusões da pesquisa e encaminhadas recomendações para desdobramentos futuros do trabalho à luz das lições aprendidas.

1.5. Motivação

Desenvolvido no âmbito do Projeto de P&D Light Energia/Aneel (Referência P&D OKE 06-07) intitulado Tecnologia de Tratamento de Água de Refrigeração da Usina Fontes Nova, desenvolvido pela PUC-Rio na usina Fontes Nova, Pirai, RJ., esta pesquisa de mestrado foi motivada pela possibilidade vislumbrada pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia em contribuir para o entendimento do complexo fenômeno de formação e mitigação do biofouling. Fenômeno esse que tão drasticamente compromete a eficácia dos processos de transferência de calor em equipamentos de processos de geração de energia e outros processos industriais. Em particular, o trabalho foi motivado pelo desafio de propor um método que fosse: (i) não poluente (em contraposição aos métodos de limpeza química ofensores do meio ambiente); (ii) de implementação contínua, em contraposição aos métodos de limpeza mecânica que requerem a interrupção da geração; e (iii) de simples operação.

1.6. Justificativas

Os custos associados à limpeza de TC instalados em usinas hidrelétricas (UH) são muito elevados. A simples parada de um dia de operação resulta em consideráveis perdas de receita pela interrupção da geração.

O acúmulo de depósitos em TC pode ser fortemente agravado pela presença de microrganismos presentes nas águas de refrigeração, resultando na formação do *biofouling* (de crescimento mais vigoroso que o fouling resultante de depósitos minerais) que causam perda de eficiência energética do TC pela redução do diâmetro interno dos tubos e, conseqüentemente, redução da vazão, aumento dos custos de bombeamento do fluido refrigerante e aumento da temperatura da água de resfriamento que circula no TC.

A mitigação de depósitos biológicos nos TC constitui parte de uma estratégia promissora para minimizar interrupções na geração por paradas técnicas de manutenção do hidrogenador.

Dependendo do grau de incrustação e dos problemas ocasionados pela obstrução dos trocadores, cerca de 2 a 5 dias podem estar envolvidos no processo de manutenção. De forma conservadora, o impacto econômico que resulta da parada de apenas um hidrogenador (44 MW) em apenas um dia de operação pode ser estimado em $24 \text{ h} * 44 \text{ MW} * 200,00 \text{ R\$/MWh} = \text{R\$ } 211.200,00$, considerando-se, aqui, o preço da energia no mercado regulado de 200,00 R\$/MWh.

Esses custos são na realidade mais elevados tendo em vista que a parada de manutenção pode demandar mais de um dia de interrupção da geração e impacta, também, custos de mão de obra, serviços de terceiros, materiais, impostos etc.

2

Incrustações em trocadores de calor: estado-da-arte

Os trocadores de calor (TC) são equipamentos auxiliares e essenciais em sistemas de geração de energia. Sabidamente, a efetividade do trocador de calor desempenha um papel fundamental na operação do sistema de geração, seja a nível operacional, econômico ou ambiental. Um dos meios comumente utilizados para refrigeração dos sistemas de geração é a água. Esta por sua vez, não é isenta de impurezas que associadas à mesma, com o decorrer do tempo ocasionam a deposição na superfície interna das passagens desses equipamentos, obrigando-os de tempos em tempos serem limpos. Os diferentes processos associados na formação, deposição e remoção de materiais, em especial suas características e origens, ocasionam com o tempo a obstrução do acesso dos fluidos de resfriamento pelas passagens dos trocadores de calor (objeto de estudo), notadamente conhecida como incrustação.

2.1.

Fundamentos sobre o processo de formação de incrustação

Segundo Bryers & Characklis (1980), em processos de transferência de calor e regime de escoamento turbulento a camada de deposição de incrustações devido a biofilmes (*biofouling*), evoluiu na forma de uma curva sigmoideal. Esta evolução apresenta três fases: (i) início da formação do biofilme, (ii) acumulação exponencial e (iii) fase de estado estacionário, ilustrados na Figura 2. Outros autores dividem o processo de formação de *biofouling* em duas etapas: o período de atraso, também conhecido como período de indução, e o período de incrustação propriamente dito (Flemming & Ridgway, 2009); (Tonin, 2003).

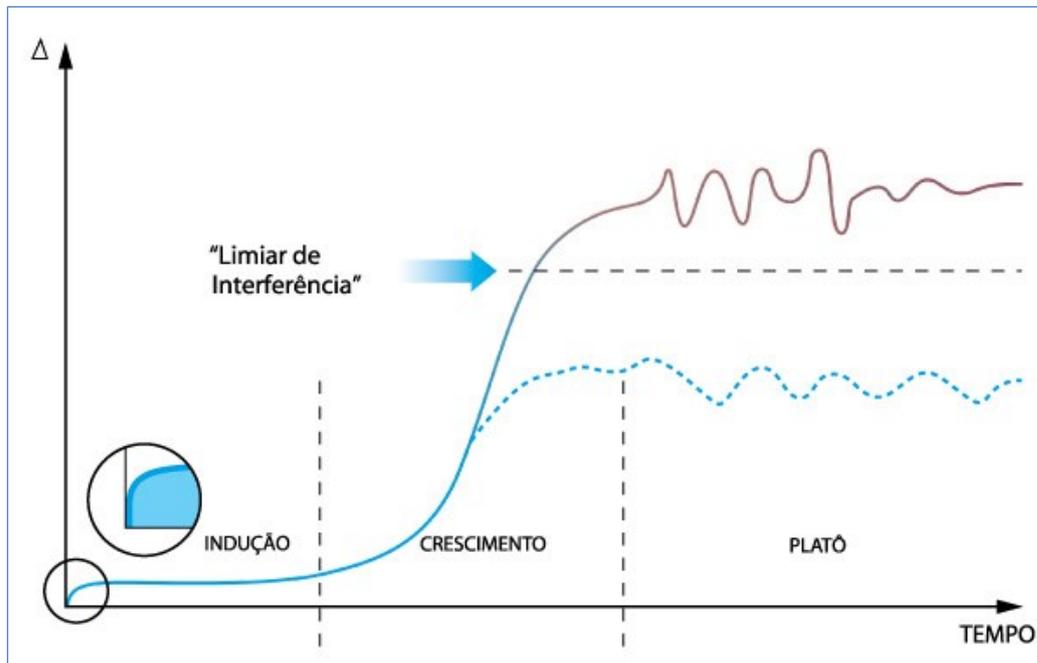


Figura 2 - Progressão do biofilme em escoamento turbulento

Fonte: Reproduzido de Flemming & Ridgway (2009)

Segundo Kern & Seaton (1959), a taxa de formação de incrustação pode ser definida a partir da simples diferença entre a taxa de deposição e a taxa de remoção conforme a Equação 1 e também ilustrada na Figura 3.

$$\frac{dm_f}{dt} = \varphi_d - \varphi_r \quad (1)$$

Nesta expressão, m_f , é a massa de depositada em (kg/m^2). Os termos φ_d e φ_r são as taxas de deposição e remoção de depósitos incrustantes, respectivamente em $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$. A taxa de deposição, φ_d , depende do mecanismo da incrustação, enquanto a taxa de remoção, φ_r , depende da força de adesão do depósito e da tensão de cisalhamento Tonin (2003).

Segundo Kazi (2012), os processos das variáveis descritas na equação 1 ocorrem simultaneamente e dependem das condições de operação. Normalmente, a taxa de remoção aumenta com o incremento da quantidade de depósitos. Por outro lado, as taxas de deposição são independentes da quantidade de material depositado, mas, depende das alterações causadas pelas incrustações como: o aumento da velocidade do fluxo e a rugosidade da superfície.

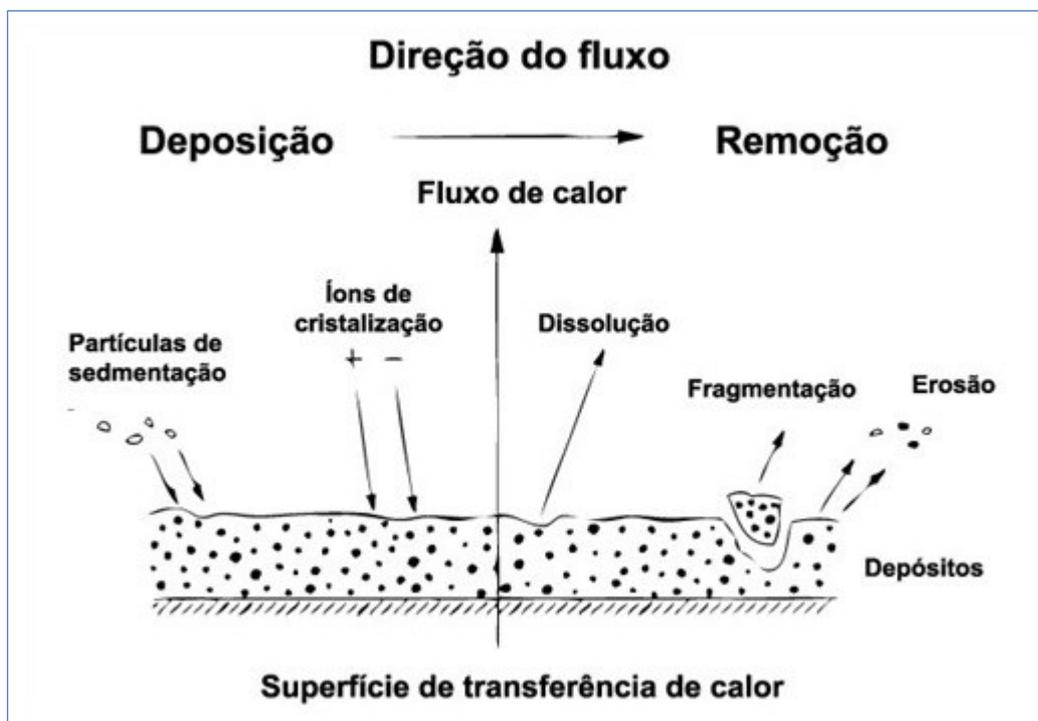


Figura 3 - Etapas da formação da incrustação

Fonte: Mostafa (2011)

Bott (1995) e Tonin (2003) descreve os principais mecanismos de formação da incrustação como sendo:

- Deposição de partículas: mecanismo, que está associado a uma grande influência da geometria, pois a deposição dá-se pela atuação da força da gravidade. Seu efeito é mais acentuado quando a velocidade do escoamento é baixa. Esta incrustação é causada no momento em que a velocidade do fluido cai abaixo de um nível crítico. A montagem do trocador de calor na posição vertical também pode minimizar o efeito que a gravidade tem em puxar as partículas para fora do trocador de calor. Este tipo de incrustação é resistente e aderente à superfície, desse modo, são necessários tratamentos mecânicos e químicos para remoção (Belt & Mueller, 2001)
- Cristalização: processo diretamente ligado à temperatura de trabalho e a solubilidade da solução, ou seja, o aumento da temperatura diminui a solubilidade da solução, os cristais irão se formar nas partes mais quentes do trocador de calor. Desse modo, para que a cristalização seja iniciada, um grau de supersaturação da solução é necessária antes que a precipitação ocorra. Este mecanismo é comum em sistemas aquosos, com sais solúveis, porém não exclusivo de tais situações. Segundo Bott (1997), hidrocarbonetos de origem parafínica quando resfriados tendem a depositar cristais na superfície fria do trocador de calor através da qual o seu aumento ou diminuição poderá atingir um grau de insolubilidade, e assim, ocorrer uma cristalização de sais

- Solidificação: Processo no qual a incrustação é formada pela solidificação de líquidos puros ou de constituintes de uma solução líquida quando em contato com uma superfície de transferência de calor sub-resfriada (formação de gelo)
- Incrustação devido à corrosão: mecanismo o qual a incrustação é formada quando o material do trocador de calor reage com o fluido de refrigeração e forma produtos de corrosão na superfície de transferência de calor. Esses produtos formam uma superfície rugosa que favorece a incrustação por sedimentação e cristalização. Todavia, é diferente da incrustação por reação química (Kazi, 2012). Com a escolha cuidadosa dos materiais de construção, os efeitos podem ser minimizados. Nesse mesmo contexto, uma vasta gama de materiais resistentes à corrosão com base em aço inoxidável e ligas de níquel é proposto
- Reação química: similarmente ao que ocorre na reação por corrosão, a reação química se desenvolve a partir da formação de depósitos na superfície do trocador de calor a partir de reações químicas no próprio fluido de refrigeração ou diretamente na superfície do trocador de calor. Contudo, o material da superfície do trocador não funciona como reagente e, sim, como catalisador (Tonin, 2003). A deposição de asfaltenos, oxidação de óleos lubrificantes, formação de coque durante o craqueamento de hidrocarbonetos leves, formação de lama e deposição de produtos de carvão são as possíveis reações que conduzem à deposição. No caso da formação de lama, tem-se como resultado, da reação química, um polímero geralmente insolúvel. Nos demais casos, têm-se como resultado a deposição do coque, ácidos orgânicos e mais frequentemente grandes moléculas de produtos pesados (Madi, 2005). Este tipo de incrustação é extremamente tenaz e necessita de cuidados especiais de limpeza dos depósitos alojados nos trocadores de calor com o objetivo de restabelecer a operação eficaz e a vida útil dos equipamentos (Bell & Mueller, 2001).
- Crescimento biológico: Este mecanismo pode ser descrito como o crescimento de micro e macro-organismos (bactérias, fungos ou algas), aeróbios e anaeróbios, na superfície de transferência de calor (Tonin, 2003). Segundo Melo e Bott (1996), a preferência pela bactéria em se fixar na superfície do tubo deve-se ao fato de que o material da superfície passa a ser uma fonte de nutrientes absorvidos. Neste mecanismo, a presença de material biológico na superfície dos trocadores de calor (TC) pode originar outros mecanismos de formação de incrustação. É comum encontrar oxidação junto ao crescimento biológico nas superfícies dos trocadores (Madi, 2005).

2.2. O fenômeno do *biofouling*

O ciclo que a água realiza na natureza em contato com a atmosfera e a superfície da terra dissolve uma grande quantidade de substâncias que a tornam impura. Os problemas geralmente encontrados em sistema de água de

resfriamento consistem na corrosão, incrustação ou depósito, além do crescimento microbiano, que causa a diminuição da vida útil dos tubos dos trocadores de calor, aumento do consumo de energia, ou mesmo a parada do processo produtivo (Martins, 2009).

O biofilme é constituído por uma série de células imobilizadas sobre um substrato. Estas células são incluídas em uma matriz orgânica de polímeros extracelulares que são produzidos por microrganismos e genericamente denominados como material polimérico extracelular - MPE (Videla, 2003).

A formação de camadas de depósitos de origem orgânica ou inorgânica resultado do acúmulo do biofilme sobre uma superfície qualquer de equipamentos industriais (e.g.: tubulações) é notadamente conhecida como incrustação (*fouling*). Todavia, o acúmulo indesejável de depósitos biológicos sobre uma dada superfície é usualmente conhecido como *biofouling* (Characklis, 1990).

2.3. O conceito de *biofouling*

"*Biofouling* é conceituado como o acúmulo indesejável de depósitos sobre uma superfície biótica" (Characklis, 1990). Este termo operacionalmente definido por Epstein (1981) foi adaptado a partir da tecnologia dos trocadores de calor e aplica-se tanto à deposição de organismos macroscópicos (algas, cracas ou mexilhões "*macrofouling*") quanto a microrganismos ("incrustação microbiana").

Segundo Mostafa (2011), a incrustação (*fouling*) é definida como a deposição indesejável de material sobre as superfícies, incluindo:

- incrustação mineral (*scaling*): deposição de material inorgânico precipitado em uma superfície
- incrustação biológica: deposição de substâncias orgânicas (e.g.: óleo, proteínas, ácido, substâncias húmicas)
- incrustação de partículas: deposição, e.g.: de sílica, argila, substâncias húmicas e outras partículas
- *biofouling*: é um caso especial de incrustação, no qual micro-organismos podem crescer na expansão de substâncias biodegradáveis na fase da água, tornando-as produtos metabólicos e biomassas (Flemming, 2002).

Geralmente, os diferentes tipos de incrustações mencionados acima ocorrem em conjunto. Nos três primeiros tipos de incrustações descritos, o aumento da

camada de incrustação surge do transporte e acúmulo abióticos sobre uma dada superfície. O que é depositado sobre a superfície origina quantitativamente por meio da água. Nesses três casos, as incrustações podem ser controladas através da eliminação a partir da fase líquida, com o fluxo da água. No entanto, é diferente no caso do quarto tipo de incrustação descrito. Neste caso, os microrganismos que são "pseudopartículas" podem se multiplicar. Eles produzem substâncias poliméricas extracelulares (SPE) as quais permanecem junta-se e grudam-nas na superfície, além de aumentarem a incrustação (Flemming, 2002).

Ainda que 99,99% de todas as bactérias sejam eliminadas por meio de pré-tratamento (e.g.: microfiltração ou aplicação biocida), algumas células sobreviventes irão entrar no sistema, aderir às superfícies e se multiplicarão a custa de substâncias biodegradáveis dissolvidas na fase aquosa em grandes quantidades. Desse modo, os microrganismos convertem a matéria orgânica dissolvida em biomassa localmente por meio de transformações metabólicas.

Esses processos metabólicos entendam-se a biodegradação e o crescimento de superfície, constituem a base dos reatores do biofilme (eg.: membrana biorreatoras, conceito introduzido na década passada). Este é o princípio de sistemas de biofiltração usado em água potável e purificação de águas residuais, assim como muitas outras aplicações biotecnológicas (Flemming & Wingender, 2003).

Nesse contexto, o *biofouling* pode ser considerado como um "reator de biofilme no lugar e hora errado". Todavia, eles são tratados como incrustação. Observa-se em diversos campos, como: cascos de navios, de petróleo, de automóveis, de aço, na produção de papel, de alimento, de bebida industrial para dessalinização de água e no tratamento, armazenamento e distribuição de água potável. (Flemming, 2002; Henderson, 2010).

As substâncias apropriadas como nutrientes que não atuam como incrustações, por si só irão contribuir com a incrustação indiretamente. Esta contribuição se dará ao fato das substâncias serem a potencial fonte de biomassa, base reatora do biofilme. Como é praticamente impossível manter um sistema industrial comum completamente estéril, microrganismos nas superfícies estarão sempre presentes, "a espera" por traços de nutrientes. Assim, todas as substâncias biodegradáveis devem ser consideradas como biomassa potencial.

A fim de compreender os efeitos e dinâmica do *biofouling* e conceber contramedidas adequadas, é importante entender os processos naturais de formação do biofilme e o seu desenvolvimento. De um ponto de vista microbiológico, não existe qualquer organismo incrustante "típico". A contaminação da fase da água é um problema caso a biomassa seja excessiva ou não específica. Desse modo, este será o organismo mais abundante em um determinado local e o principal organismo causador do fouling. Se os produtos metabólicos causarem o problema, tais como baixa quantidade de ácidos graxos de cadeia (sulfureto de hidrogénio ou ácidos inorgânicos) os organismos que produzem estas substâncias irão causar o entupimento.

Novamente, o *fouling* é uma expressão operacional que é definida pelas características físico-químicas e biológicas específicas de um sistema. Quase todos os microrganismos são capazes de formar biofilmes, sendo este um modo universal de vida microbiana. Observações práticas mostraram que as espécies particularmente viscosas de bactérias ambientais podem prevalecer em biofilmes de água (Flemming & Wingender, 2003). Geralmente, a composição dos biofilmes incrustantes é dominada pela flora própria do local (autóctone) que pode diferir profundamente com os diferentes locais e condições incrustantes, incluindo os sistemas cuja flora microbiana tem sido perturbada pela aplicação de biocidas.

Como mencionado acima, a proporção de incrustação pode ser considerável conforme o local de origem (autóctone). Um exemplo é o desenvolvimento da placa dental, ou seja, depósitos minerais nos dentes que são favorecidos por biofilmes. Nesse mesmo contexto, em biofilmes de algas, a precipitação de carbonato de cálcio é elevada principalmente devido ao aumento do valor do pH resultante da fotossíntese (Callow et al., 1988). Conceitualmente, a grande variedade de manifestações de agregados microbianos é notadamente conhecida como biofilme. O biofilme é a mais antiga e mais bem sucedida forma de vida na Terra com fósseis que datam de 3,5 bilhões de anos e representam os primeiros sinais de vida no planeta (Schopf et al., 1983). A ação do biofilme em agregar e associar às superfícies oferecem vantagens ecológicas substanciais aos microrganismos (Flemming, 2008). Praticamente, todas as superfícies em ambientes não estéreis, as quais oferecem quantidade suficiente de água, são colonizadas por biofilmes, mesmo em valores de pH extremos, altas temperaturas,

concentração de sal elevada, intensidades de radiação e de pressão (O'Toole et al., 2000; Flemming, 2008).

Os biofilmes são envolvidos nos ciclos biogeoquímicos de praticamente todos os elementos e são transportados dos ambientais pelo processo de "autopurificação". Esse processo é sempre o mesmo, no qual os microrganismos transformam a matéria orgânica dissolvida em biomassa localmente por meio de transformações metabólicas.

Nos esforços de combate a incrustação, vale a pena ressaltar que os organismos de biofilme desenvolveram estratégias eficazes, versáteis e múltiplas de defesa durante bilhões de anos contra uma grande variedade de tensões. Essas tensões incluem as provocadas, e.g.: por metais pesados, irradiação, biocidas, antibióticos, e os sistemas imunes do hospedeiro. Nesse sentido, a obtenção de sucesso com fácil operação e durabilidade sobre a incrustação não deve ser esperada.

Além disso, tem que ser considerado que o sucesso no combate à incrustação depende do tempo e não é permanente. Mais cedo ou mais tarde, todas as superfícies serão colonizadas por biofilmes microbianos.

2.4. Etapas de formação

As etapas que caracterizam o processo de incrustação em sua forma plena são usualmente caracterizadas pelo resultado de dois sub-processos simultâneos: o processo de deposição e o processo de remoção (*reentrainment*) de materiais em superfícies diversas (Mostafa, 2011). A Figura 4 ilustra o esquema representativo deste processo. Todos os sub-processos podem ser categorizados em:

- formação de depósitos incrustantes no fluido em movimento
- transporte de depósitos incrustantes até a superfície de transferência de calor
- reação de ataque e formação na superfície de transferência de calor
- remoção de depósitos incrustantes (fragmentação ou desfragmentação da camada depositada)
- transporte de depósitos incrustantes da superfície de transferência de calor para o fluido em movimento.

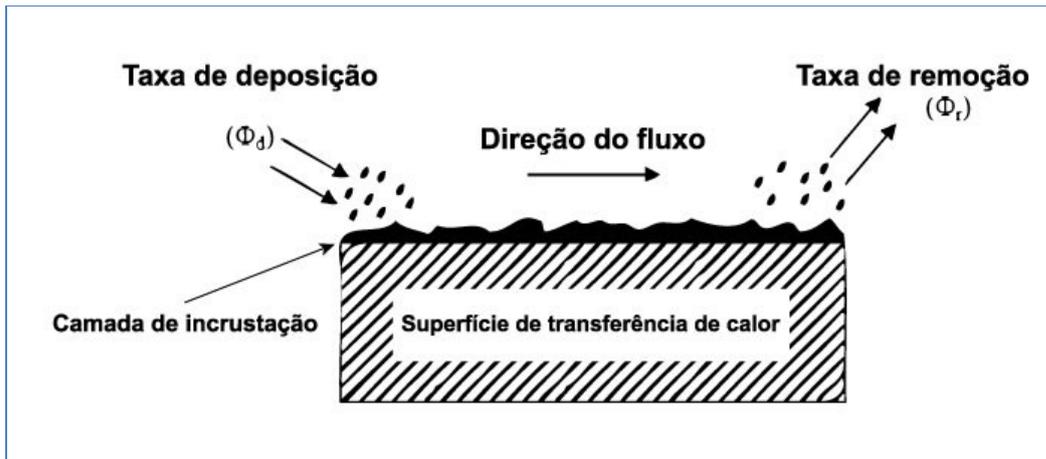


Figura 4 - Processo de incrustação

Fonte: Mostafa (2011)

A Figura 5 a seguir ilustra o diagrama esquemático do processo de incrustação. Alguns destes sub-processos podem não ser aplicáveis em algumas situações, tais como incrustações por corrosão.

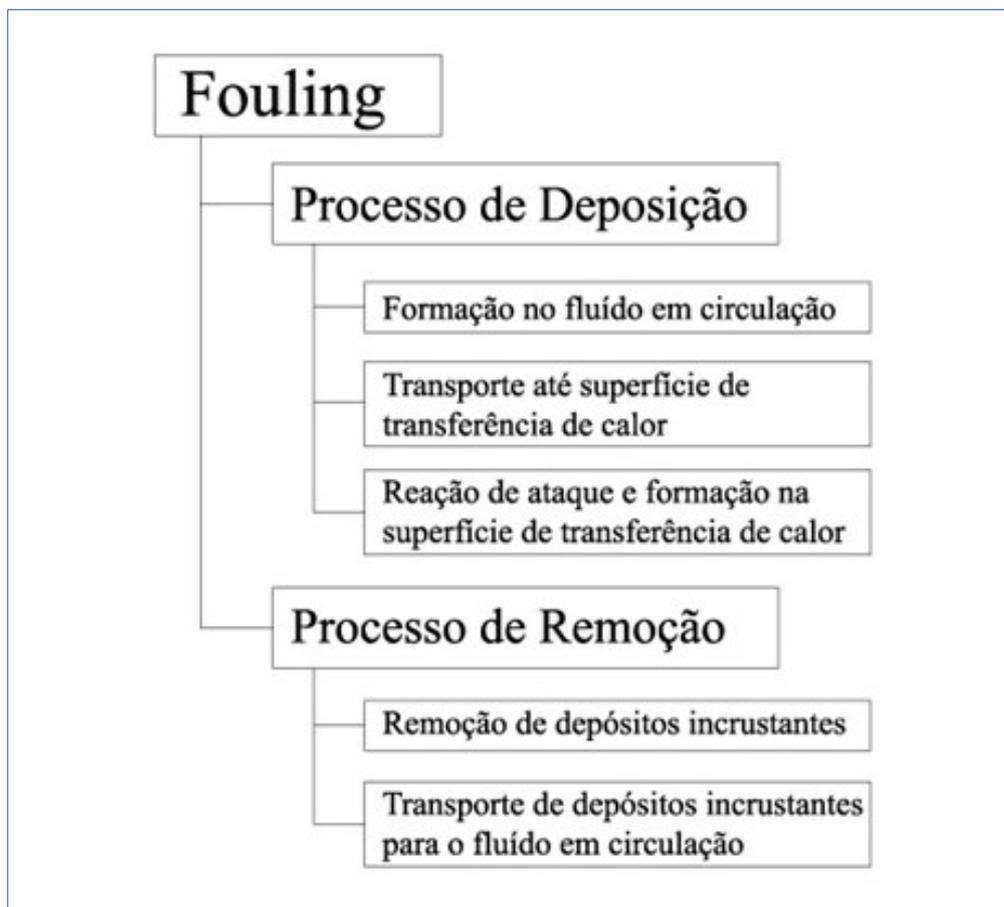


Figura 5 - Diagrama do processo de incrustação

Três estágios básicos podem ser observados em relação à deposição de partículas em superfícies a partir do fluido em movimento (Mostafa, 2011):

- o transporte por difusão de materiais que causam o *fouling* ou que atravessam as extremidades das camadas formadas acima da superfície de transferência de calor e que estão em suspensão no fluido em movimento
- a adesão de depósitos à superfície de transferência de calor e em si próprios
- o transporte de material para local afastado da superfície de transferência de calor.

A soma destes estágios representa o crescimento dos depósitos sobre a superfície de transferência de calor. Segundo Melo & Bott (1996), As taxas do *biofouling* e taxas de outras incrustações são determinadas pela competição entre uma taxa de deposição e uma taxa de remoção, a mais recente representação do processo de cisalhamento. Em termos matemáticos, a taxa de "crescimento de depósito" (resistência térmica da incrustação ou fator de incrustação, R_f) pode ser considerada como a diferença entre as taxas de deposição e remoção de depósitos incrustantes (Mostafa, 2011). Segundo Taborek et al., (1972), as tentativas de se produzir um modelo matemático para o processo de incrustação têm sido baseadas no balanço material entre a diferença da taxa de deposição pela taxa de remoção.

2.5. Mecanismos de formação

A partir de evidências baseadas em experiências envolvendo mecanismos de incrustação, todos esses mecanismos são caracterizados por uma sequência semelhante de eventos (Mostafa, 2011). Os eventos sucessivos que ocorrem na maior parte dos casos encontram-se a seguir ilustrados na Figura 3. Estes eventos norteiam o processo de incrustação pleno e determinam o impacto final sobre o desempenho do trocador de calor.

Em alguns casos, certos eventos dominam o processo de incrustação e têm efeito direto sobre o tipo de incrustação mantido. Os cinco principais eventos, ilustrados na Figura 5, podem ser resumidos brevemente em: (i) Formação de depósitos incrustantes no fluido em movimento ou iniciação da incrustação, (ii) Transporte de espécies, (iii) aderência das diferentes espécies de incrustação à superfície de transferência de calor, (iv) remoção de depósitos incrustantes da

superfície e (v) transporte dos depósitos incrustantes por meio do fluido em movimento.

O primeiro evento no processo de incrustação é precedido por um período de atraso ou período de indução (t_d) como é ilustrado na Figura 6. Este período pode ser caracterizado como o período em que a variação da resistência da incrustação é desprezível, ou seja, este período é caracterizado pelo não crescimento da incrustação devido ao equilíbrio que se estabelece entre as taxas de deposição e de remoção da incrustação (Tonin, 2003). O mecanismo básico envolvido durante este período é a nucleação heterogênea, no qual t_d é mais curto e possui maior taxa de nucleação. Os fatores que afetam t_d são:

- a natureza do fluido
- a vazão
- a composição do fluido incrustado
- a natureza e condição da superfície do trocador de calor.

Em todos os mecanismos de incrustação, t_d diminui a medida que a rugosidade da superfície aumenta, esta diminuição é devido à disponibilidade própria do local para nucleação, adsorção e adesão.

Uma vez que os depósitos são descartados, podem ou não serem transportados da interface depósito-líquido por meio do fluido em movimento, quinto evento do processo de incrustação. Esse fato depende da massa e do volume da porção descartada e da força hidrodinâmica do fluido em movimento. Se a porção descartada é grande o suficiente, ela pode se mover sobre a superfície e depositar-se em outro local. Todos os depósitos que foram removidos devido aos efeitos de erosão serão transportados por meio do volume do fluido em movimento. O processo de remoção não é completo sem esta ação. O parâmetro significativo que afeta a fragmentação dos depósitos é o seu envelhecimento. Esse envelhecimento pode fortalecer ou enfraquecer os depósitos incrustantes.

2.5.1. Resistência térmica da incrustação

O processo global de incrustação é indicado pelo fator de incrustação, R_f resistência térmica da incrustação que é medida ou por uma seção de ensaios ou

avaliada a partir da diminuição da capacidade de operação do trocador de calor (TC) (Tonin, 2003). Este processo é caracterizado pela curva do fator de incrustação no tempo. A Figura 6 a seguir ilustra os diferentes tipos de curvas que caracterizam o processo de incrustação.

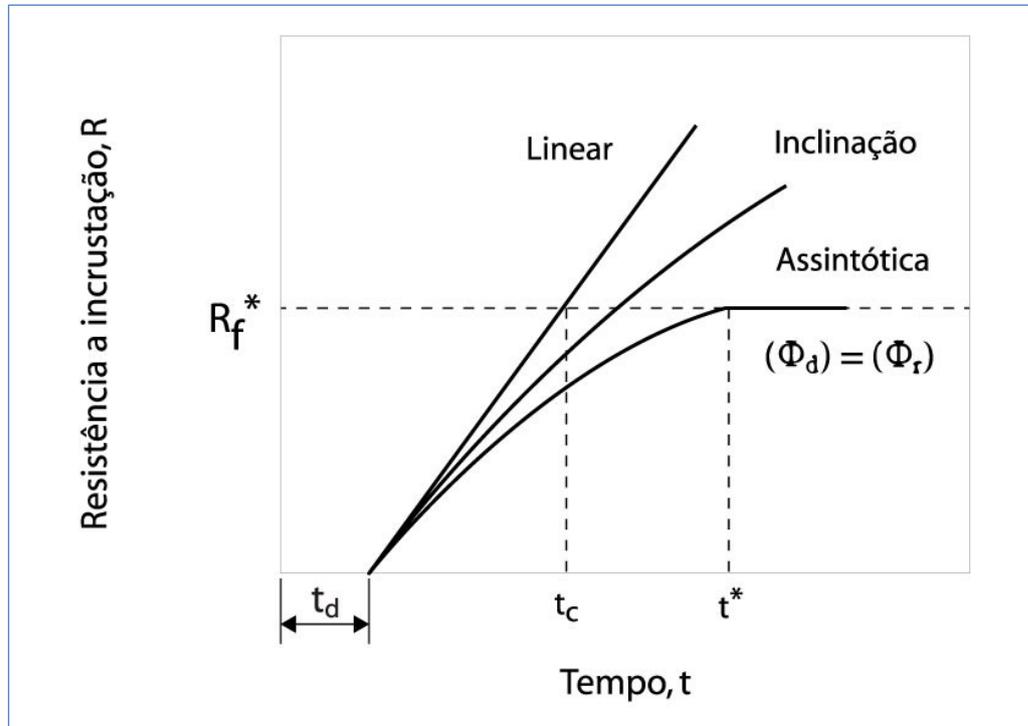


Figura 6 - Gráfico das curvas de incrustação

Fonte: Mostafa (2011)

Segundo Mustafa (2011), neste gráfico, t_d (tempo de atraso) denota o período inicial que pode transcorrer enquanto não há ocorrência de incrustação (*fouling*). O valor de t_d não é previsível. Contudo, para uma dada superfície e sistema, este valor aparenta ser um tanto casual na natureza. Além disso, tem uma distribuição normal sobre algum valor médio ou mínimo que depende da virtude de alguns fatores frequentes. O autor assim categoriza as mais importantes curvas de incrustação:

- Curva de incrustação linear (linear fouling curve): esta curva é obtida devido a ação de depósitos muito resistentes os quais a remoção são desprezíveis ou a taxa de remoção é constante (Kazi, 2012). Desse modo, a massa de depósitos aumenta gradualmente com o tempo e essa massa tem uma relação diretamente linear ($R_f = at$) na qual “a” é a inclinação da curva.
- Curva da taxa de decaimento da incrustação (*falling rate fouling curve*): O aumento da vazão resultado da redução de área da passagem do fluido

de refrigeração devido a formação de depósitos pode aumentar a taxa de remoção e a taxa linear (curva linear) será alterada para a taxa de caimento (inclinação da curva) ou completamente uma linha horizontal uniforme (Kazi, 2012). Desse modo, a massa de depósitos aumenta com o tempo, mas não linearmente e não alcança o estado constante do valor assintótico.

- Curva de incrustação assintótica (*asymptotic fouling curve*): é uma curva indicativa da constante da taxa de deposição (Φ_d) e da taxa de remoção (Φ_r).
- Essa curva é diretamente proporcional à espessura do depósito até que a igualdade seja estabelecida $\Phi_d = \Phi_r$ na assíptote. Desse modo: (i) a taxa de incrustação gradualmente cai com o tempo; (ii) eventualmente um estado constante é alcançado quando não há aumento da deposição na superfície; e (iii) há uma possibilidade de continuar a operação dos equipamentos sem incrustação adicional. Em situações práticas na indústria, a assíptote pode ser alcançada e o fator de incrustação assintótico (R_f) pode ser obtido em matéria de minutos. Todavia, esse período poderá levar semanas ou meses para ocorrer dependendo das condições de operação. Esse comportamento pode ser descrito segundo a equação (2) apresentada anteriormente. Essa curva é notadamente a mais importante, a qual tem largamente existido nas aplicações industriais, como e.g.: a incrustação de partículas puras (Mostafa, 2011).

Para todos os tipos de curvas que caracterizam o processo de incrustação, a quantidade de material depositado por unidade de área (m_f) é descrita pelas seguintes variáveis: resistência térmica da incrustação (R_f); densidade da incrustação (p_f); condutividade térmica (λ_f) e espessura do depósito (x_f). Essas variáveis constam das equações 2 e 3, abaixo:

$$m_f = p_f x_f = p_f \lambda_f R_f \quad (2)$$

$$R_f = \frac{x_f}{\lambda_f} \quad (3)$$

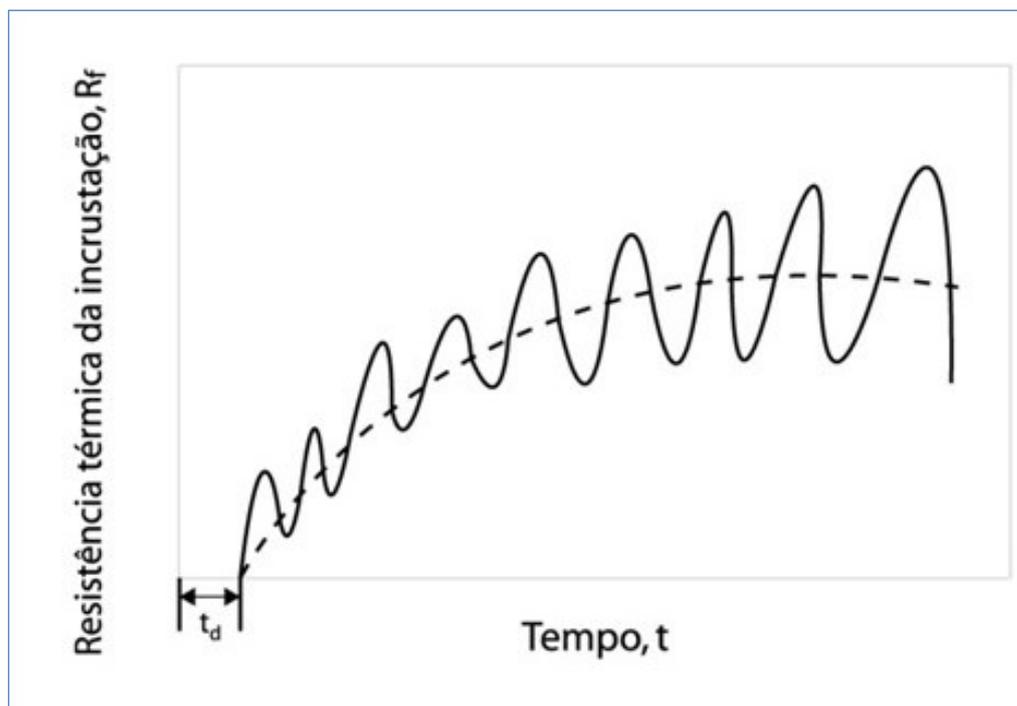
Valores de condutividade térmica para alguns incrustantes são descritos na tabela a seguir:

Tabela 1 - Condutividade térmica de incrustantes típicos

Incrustante	Condutividade térmica (W/mK)
Alumina	20,42
Biofilme (água efetiva)	30,60
Carbono	41,60
Sulfato de cálcio	50,74
Carboneto de cálcio	62,19
Carboneto de magnésio	70,43
Óxido de titânio	88,00
Cera	0,24

Fonte: Mostafa (2011)

Deve ser observado que a curva representada na Figura 6 é ideal em situações industriais, porém, na prática não pode ser alcançada. Uma representação mais aproximada da curva prática da incrustação assintótica pode ser observada a seguir na Figura 7. Nessa representação, o efeito de dente de serra (*saw tooth*) é o resultado da remoção parcial de alguns depósitos. Essa remoção é devido à fragmentação ou descamação serem seguidas por intervalos curtos em consequência do rápido crescimento de depósitos. A curva média (representada pela linha pontilhada na Figura 7) pode ser representada pela curva assintótica do gráfico apresentado na Figura 6. Efeitos similares da remoção e deposição parciais podem ser exemplificados por outros tipos de curvas de incrustação.

**Figura 7** - Curva típica de incrustação

Fonte: Mostafa (2011)

2.5.2.

Fatores que influenciam a formação do *biofouling*

Na fase de projeto de um trocador de calor, a seleção de fatores que influenciam incrustação é sempre uma decisão importante a ser tomada. A fixação da resistência da incrustação pode obscurecer completamente todas as outras resistências térmicas e determinar o tamanho do equipamento (Tonin, 2003). Os fatores que influenciam a formação da incrustação têm sido determinados pelo consenso de pessoas experientes e recomendados geralmente pela *Tubular Exchanger Manufactures Association*, TEMA (1978). Nesse contexto, há um número de fatores que afetam o crescimento dos biofilmes em equipamentos industriais (Melo & Bott, 1996).

Os trocadores de calor são projetados com uma área adicional para compensar a perda na transferência de calor provocada pelo *fouling*. Esse aumento na área adicional do trocador geram elevados custos de instalação, necessitando assim de bombas e motores maiores. Além disso, há um custo maior no tratamento da água, pois necessitará de uma vazão maior (Sugarmen et al., 2007).

Desse modo, a quantidade de partículas depositadas no interior das passagens dos trocadores está relacionada com:

- a vazão e turbulência do escoamento do fluido
- o tempo em que o trocador está em operação
- a temperatura de operação do sistema
- a natureza do fluido (pouco ou muito sujo).

Os principais fatores que influenciam a taxa de incrustação nos TC são (Mostafa, 2011):

- o material, a rugosidade e a temperatura da superfície de transferência de calor
- as impurezas e sólidos em suspensão
- a velocidade da água de resfriamento nas passagens do fluido
- a qualidade da água de resfriamento
- a tecnologia aplicada
- condições operacionais do sistema.

As condições operacionais e concepções do sistema de resfriamento são identificadas como estimuladores de incrustação (*fouling*). Segundo Garrett et al., (1985), alguns desses estimuladores são, a saber:

- i. Temperatura do fluido. No momento em que a temperatura do fluido de trabalho chega a um patamar elevado provoca um “cozimento” das partículas depositadas na superfície interna das passagens dos trocadores de calor. Esse cozimento resultará em um acúmulo de material e surgimento de uma camada sobre a superfície interna das passagens dos TC. Consequentemente, as taxas de corrosão, a formação de cristais e a perda de atividade, por parte dos anti-incrustantes aumentarão. Com a elevação da temperatura, as reações químicas e enzimáticas prosseguem a uma taxa mais elevada, essa taxa, conseqüente, aumentará a velocidade no crescimento celular. Entretanto, é preferível utilizar uma temperatura de superfície ótima para superar estes problemas;
- ii. Efeitos de velocidade e hidrodinâmica. No que concerne a queda de pressão, quanto maior a velocidade, maior será o rendimento térmico do TC e menor será a incrustação (Kazi, 2012). A velocidade do fluido pelas passagens dos trocadores de calor influenciam significativamente. No processo controlado por difusão, o aumento da velocidade do fluido causa maior incrustação (Brusilovsky et al., 1992);
- iii. Manutenção realizada de forma uniforme. A velocidade que percorre o trocador de calor reduz a incidência da sedimentação e acumulação de depósitos;
- iv. Material. O material da superfície é seriamente considerado devido a incrustação por corrosão, porque o material poderá reagir e formar produtos corrosivos (Kazi, 2012). A seleção do material de fabricação do tubo é significativa para minimizar os efeitos provocados pelas incrustações e pela corrosão. Juntamente com a escolha do material de construção dos tubos, o tratamento superficial com aço carbono tem a incidência maior de corrosão, contudo, é um material cujo valor não é elevado. O plástico, o esmalte vítreo, o vidro, e alguns polímeros irão minimizar a acumulação de depósitos;
- v. Impurezas. Os fluidos de processo são raramente isentos de impurezas. Desse modo, partículas e materiais em suspensão podem iniciar o processo de deposição por sementeira. Mesmo em quantidades reduzidas, a entrada de impurezas pode iniciar ou aumentar substancialmente as incrustações. Elas podem ou depositar uma camada de incrustação quanto agir como catalizadores para o processo de incrustação. Contudo, as impurezas, tais como areia ou outras partículas em suspensão no fluido de resfriamento poderão atuar como agentes de limpeza. Situação esta que reduzirá ou removerá os depósitos; e
- vi. Rugosidade da superfície. O acabamento superficial tem demonstrado contribuir no atraso da formação de incrustação e facilidade no processo de limpeza. Após o início da formação das incrustações os efeitos de rugosidade ainda serão uma função dos depósitos em si. Mesmo as superfícies lisas podem tornar-se ásperas devido à formação de incrustações, a formação de produtos de corrosão ou erosão.

2.6. Impactos econômicos causados pelo *biofouling*

Os custos relacionados com a incrustação podem ser divididos em quatro grandes grupos, a saber: (i) crescimento do capital com despesas, (ii) custos com energia, (iii) custos com manutenção, (iv) custos de perda de produção e (v) custos extras com gestão ambiental (Kazi, 2012). A tabela 2 ilustra os custos estimados com incrustação que incorrem em alguns países.

Tabela 2 - Estimativa anual dos gastos com incrustação em (1984)

País	Custo incrustação 10 ⁶ (USD)	PIB 10 ⁶ (USD)	Custo incrustação/PIB (%)
Estados Unidos (1982)	3.860-7.000	3.634.000	0,12-0,22
	8.000-10.000		0,28-0,35
Japão	3.062	1.225.000	0,25
Oeste da Alemanha	1.533	613.000	0,25
Reino Unido	700-930	285.000	0,20-0,33
Austrália	260	173.000	0,15
Nova Zelândia	35	23.000	0,15
Total	26.850	13.429.000	0,20

Fonte: Kazi, 2012

A Tabela (3) a seguir mostra a estimativa dos custos anuais em incrustação de alguns diferentes países com base no ano de 1992.

Tabela 3 - Estimativa do impacto econômico da incrustação (1992)

País	Custo incrustação 10 ⁶ USD	Custo incrustação/PIB (%)
Estados Unidos	14.175	0,25
Reino Unido	2500	0,25
Alemanha	4875	0,25
França	2400	0,25
Japão	10000	0,25
Austrália	463	0,15
Nova Zelândia	74,5	0,15

*GNP- Produto Interno Bruto

Fonte: Mostafá (2011)

A partir da Tabela 3 acima é evidente que os custos de incrustação são substanciais e qualquer redução desses custos trarão resultados positivos em competitividade e nos lucros obtidos. A frequência de limpeza irá naturalmente

depende da gravidade do problema causado pela incrustação e irá variar entre uma semana e um ano ou mais. A limpeza frequente envolve repetidas desmontagens e remontagens. Desse modo, inevitavelmente resultará em danos para o trocador de calor em maior ou menor grau, o que reduzirá a vida útil desse equipamento. A incrustação pode ser muito cara em refinarias e usinas petroquímicas, uma vez que aumenta o uso de combustível, resulta na interrupção da operação e perdas de produção, e aumento nos custos de manutenção.

3

Mitigação de *biofouling* em trocadores de calor

O presente capítulo discute a mitigação de *biofouling* nos trocadores de calor utilizados para arrefecimento de hidrogeradores. Mais especificamente, o capítulo apresenta o estudo de caso realizado nos trocadores de calor da usina Fontes Nova.

Existe consenso entre conceituados estudiosos do tema [(Bott, 1994); (Förster et al., 1999); (Mostafa et al., 2011); (Kays & London, 1964)] que a indesejável formação de incrustação (*fouling*) em trocadores de calor (TC) pode comprometer, de forma substancial, a eficácia dos processos de troca de calor entre os fluidos de processo (denominados “fluido frio” e “fluido quente”) nesses equipamentos. Conforme mencionado, uma variedade de tecnologias de limpeza para restauração da sua eficiência de operação encontra-se descrita na literatura especializada.

A escolha da tecnologia mais adequada depende de vários fatores, dentre esses: (i) o custo do processo de limpeza; (ii) a segurança do profissional envolvido na operação; (iii) a natureza química do produto de limpeza, (usualmente são biocidas e surfactantes); (iv) as práticas de operação para viabilizar a limpeza; e (v) os cuidados com os possíveis impactos ao meio ambiente. De uma forma ou de outra, todas essas tecnologias possuem inconveniências e produzem algum resultado positivo, ainda que não eliminem por completo as causas que induzem a formação da incrustação (*fouling*).

Wallhäußer et al. (2012) revisaram diferentes métodos de incrustação para detectar e modelar trocadores de calor incrustados. Concluíram que não é trivial encontrar um método adequado para monitorizar a incrustação em sistemas fechados. Mohanty e Singru (2011) usa o fator-C (a relação entre a velocidade de fluxo e a raiz quadrada da queda de pressão), como ferramenta para investigar o desempenho dos permutadores de calor incrustados. Segundo esses autores, o fator-C mostrou ser uma técnica eficaz para a detecção da incrustação e da degradação da eficiência de transferência de calor. Na China, Guan-min Zhang et

al. (2013) investigaram incrustações em trocadores de calor do tipo placas. Fizeram uso de um sofisticado microscópio eletrônico de varredura para estudar as complexas estruturas da incrustação e da análise Von Karman para construir um modelo de incrustação semi-empírico. Resultados da previsão de fatores que afetam a incrustação reproduziram os dados experimentais com razoável concordância (cerca de 5 a 8%). Gênica et al. (2013), pesquisadores da Sérvia, mediram o desempenho térmico de trocadores de calor com tubos helicoidais paralelos. O grupo de pesquisadores da Universidade de Belgrado desenvolveu uma correlação com base no diâmetro hidráulico (2012) para calcular o coeficiente de transferência de calor do “lado quente” do trocador de calor. Os autores constataram que os valores das resistências de incrustação foram inferiores àqueles habitualmente encontrados em trocadores do tipo casco e tubos retos.

As tecnologias comumente utilizadas no controle e mitigação das incrustações podem ser categorizadas em função da natureza do processo envolvido. Os processos clássicos de limpeza documentados na literatura especializada são, usualmente, classificados segundo a natureza dos processos de limpeza:

- **Processos físicos de limpeza** - usualmente empregados na mitigação de incrustações em estágio avançado de deposição, notadamente quando o nível de obstrução afeta a eficiência da operação (Bott, 1994). Porém, o seu uso excessivo pode comprometer a integridade das paredes internas das tubulações, o que resultará na sua substituição
- **Processos químicos de limpeza** - têm caráter preventivo e são indicados para a mitigação de micro incrustações. A sua utilização deve ser moderada e controlada, uma vez que possui impacto danoso ao meio ambiente.

A seção, a seguir, resume as principais tecnologias utilizadas para mitigação do indesejável fenômeno da incrustação (*fouling*), tema de interesse desta dissertação.

3.1. Tecnologias *on-line* e *off-line* de limpeza

As tecnologias de mitigação de depósitos em TC são classificadas em dois grupos, *on-line* e *off-line*. Ambos podem ocorrer por processos físicos ou químicos.

3.1.1. Tecnologias *on-line*

A limpeza *on-line* é realizada de modo contínuo ou intermitente. Dentre as alternativas tecnológicas destacam-se: (i) injeção de ar e gás; (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). Cada uma dessas técnicas encontra-se sucintamente descrita a seguir.

- **Sistema de varredores e armazenamento** - Esta tecnologia de limpeza (*pipeline inspection gauges*, PIG) encontra aplicação nos casos em que as passagens internas do TC possuem seção transversal circular. O princípio desta técnica é a utilização de uma escova de fios metálicos ou filamentos de polímeros apropriados, junto ao fluido de refrigeração do TC. Para cada tubo que compõe o TC há um coletor que armazena e mantém apenas uma única escova após sua passagem. Depois de certo período programado, o fluxo é invertido e o objeto de limpeza retorna pelo interior da passagem dos tubos sendo armazenado na outra extremidade do TC. A Figura 8, a seguir, ilustra o diagrama de orientação da passagem das escovas no interior do TC e um modelo de escova geralmente utilizado nesta técnica. O movimento alternado das escovas permite a limpeza das paredes internas dos trocadores. Esta alternativa tecnológica é viável na aplicação em projetos de construção de novas usinas e geralmente utilizada em trocadores de calor (TC) individuais de usinas de processo. Cuidados no projeto e operação são necessários para não comprometer a integridade dos tubos dos trocadores. Conforme ilustrado na Figura 9, o sistema de varredores e armazenamento é simples e requer pouca manutenção. O seu uso, entretanto, pode ocasionar (i) momentânea interrupção da reversão do fluxo; (ii) necessidade de intervenção para assegurar harmonização e qualidade do processo; e (iii) manutenção periódica para evitar elevados custos associados à utilização do sistema.

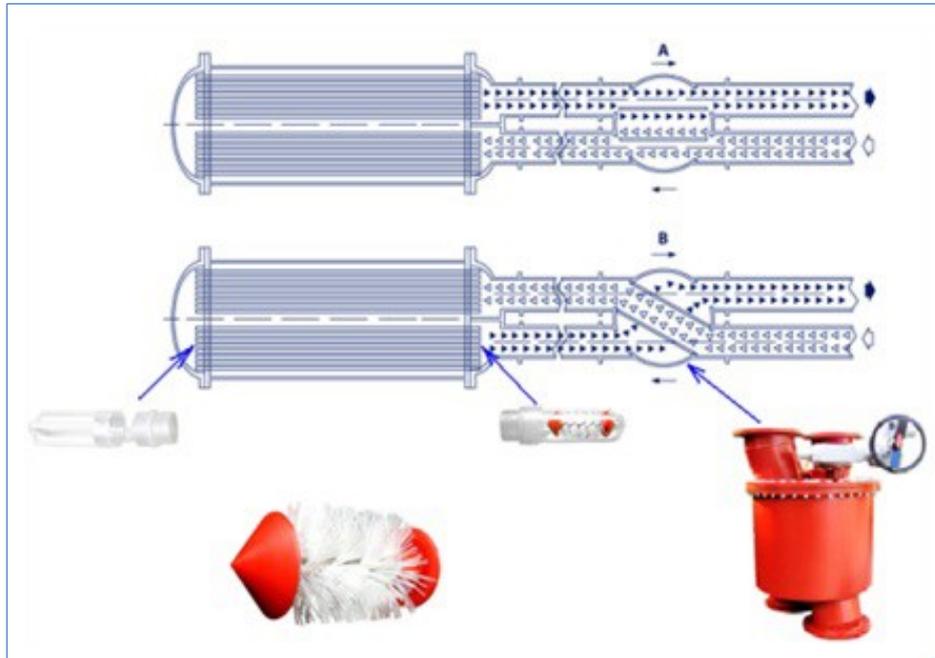


Figura 8 - Ilustração do processo de limpeza por escova

Fonte: Conco Systems Inc.

Esta alternativa tecnológica é viável na aplicação em projetos de construção de novas usinas e geralmente utilizada em trocadores de calor (TC) individuais de usinas de processo. Cuidados no projeto e operação são necessários para não comprometer a integridade dos tubos dos trocadores

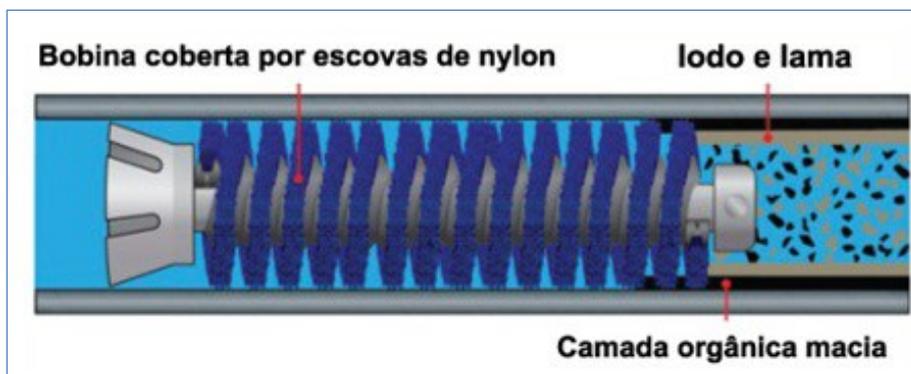


Figura 9 - Passagem de uma escova por um tubo de TC

Fonte: Conco Systems Inc.

- Injeção de ar ou gás** - A tecnologia de limpeza por injeção de ar ou gás tem por princípio a mistura simples entre a água e o ar para mitigar a redução de depósitos formados no interior das passagens do TC. O ar é injetado dentro do sistema com o uso de válvulas e a mistura formada gera turbulência no escoamento dentro da passagem dos tubos dos trocadores. O método é geralmente aplicado em áreas de difícil acesso e é ineficaz na retirada de depósitos tenazes. Há a preocupação quanto a não utilização de líquidos voláteis inflamáveis devido a possível formação de misturas explosivas. Nessas circunstâncias, é necessário considerar a utilização de um gás inerte no sistema, contudo o custo pode ser alto e

proibitivo, Bott (1994). A injeção de ar ou gás no controle e mitigação das incrustações pode ser caracterizado, por: (i) simplicidade do processo de limpeza; (ii) não danificação das tubulações; (iii) baixo custo para instalação; e (iv) limitação quanto à geometria das tubulações. Não se aplica, entretanto, a depósitos com elevado grau de incrustação e o custo se torna elevado quando associado à automação

- **Dispositivos magnéticos** - A tecnologia de limpeza por dispositivos magnéticos é aplicada na presença de íons de materiais magnetizados dissolvidos no fluido de arrefecimento. É uma das práticas utilizadas na redução e eliminação da formação da incrustação em TC. A dureza da água (nomenclatura que caracteriza a concentração de íons dissolvidos) é predominantemente causada pela presença de sais de cálcio e magnésio. Esses sais dissolvidos no fluido de refrigeração podem ser afetados pela existência de um campo magnético. Segundo Donaldson (1988) a utilização do jateamento de água dura na limpeza do aço pode originar a precipitação de fosfato de cálcio e a formação de incrustação. Dentre seus benefícios destacam-se: (i) capacidade de remover a camada de fosfato de cálcio desenvolvida no interior da parede do tanque e superfícies associadas (existem relatos de casos práticos na literatura de que depósitos de 6 a 8 mm foram removidos por essa técnica); (ii) baixo custo da técnica (da ordem de £22,000 por ano; e (iii) amaciamento da incrustação, tornando-a de fácil remoção. Donaldson (1988) relata dois exemplos nos quais dispositivos magnéticos foram instalados em sistemas de pulverização de fosfato de zinco tendo encontrado as seguintes evidências: redução na quantidade do lodo formado com a consequente redução no consumo de fosfato e redução na obstrução do jateamento. A técnica é promissora e continua sendo objeto de pesquisa. A possibilidade da indução de correntes elétricas em estruturas metálicas pode resultar em maior consolidação da corrosão, todavia, a aplicação de tais correntes deve ser cuidadosamente considerada
- **Sopradores de fuligem** - Essa tecnologia de limpeza é notadamente empregada na manutenção da transferência de calor das superfícies expostas ao gás de sistemas de combustão. Essa técnica foi originalmente concebida para remoção de depósitos (provenientes da fumaça) impregnados nas superfícies internas das tubulações de usinas de combustão. O uso de aditivos para modificar a estrutura das incrustações pode melhorar a eficiência dessa técnica. Desdobramentos dessa prática encontram-se exaustivamente descrita por Bott (1994) em seu tratado intitulado *Fouling of Heat Exchangers*.
- **Tecnologia sônica** - A utilização da energia sonora como tecnologia de limpeza é capaz de perturbar e mover os depósitos alojados nas superfícies devido à energia associada à transmissão das ondas sonoras. Os depósitos livres vibram no interior da passagem dos TC induzindo um processo de cavitação que contribui para a remoção dos depósitos. Em geral, essa técnica é utilizada em sistemas de gás, particularmente gases que circulam em sistemas de combustão. Segundo Garret Price (1985) uma atenção considerável tem sido dada aos emissores de som de baixa frequência para a minimização dos problemas de incrustação nos TC. Ambas as frequências do som, alta e baixa, têm sido utilizadas. Dentre os benefícios destacam-se: (i) resultados positivos para remoção de

depósitos soltos e quebradiços; e (ii) remoção de fuligem pelo uso de campo sonoro de baixa frequência de ressonância do som na faixa de 0 a 20 Hz. Porém, operando numa frequência audível entorno de 220 Hz (produz um som não muito diferente de uma trombeta de um navio com uma intensidade de cerca de 130 dB) apresenta as seguintes limitações: (i) não remove depósitos com elevado grau de incrustação; (ii) elevado custo do equipamento, comparável ao da instalação da tecnologia do soprador de fuligem; (iii) induz vibrações, o que impõe relutância ao uso em função do risco imposto à estrutura do sistema global; e (iv) induz poluição sonora nas proximidades do equipamento. Enquadra-se na categoria das aplicações de processo de modernização. A utilização da técnica pode ser complementar ao uso dos sopradores de fuligem convencionais ou substituto de técnicas ineficazes. O uso da tecnologia sônica não é muito difundido.

- **Lavagem por jato de água** - A alternativa de limpeza por jatos de água é utilizada na restauração da eficiência da transferência de calor em sistemas de gás de combustão. Em algumas usinas a técnica por jatos de água (menos sofisticada que a dos sopradores de fuligem) tem sido empregada. Adicionalmente à força aplicada pelos jatos de água, o choque térmico sobre os depósitos induz rachaduras e posterior fragmentação das incrustações (*fouling*) facilitando a sua remoção. O uso intermitente de jatos e sprays é suficiente para manter uma razoável eficiência do processo de transferência de calor. O aprimoramento da técnica dos sopradores de fuligem resultou na diminuição da utilização da limpeza pelos jatos de água. Em certas ocasiões, o uso da lavagem com água é o último recurso utilizado quando outras alternativas não são eficazes. Essa técnica faz uso de água potável já que o elevado teor de sólidos é o potencial causador de incrustação devido à deposição pela evaporação dos jatos de água. O uso da água do mar em sistemas de refrigeração requer lavagem após o processo, com água potável, para remoção do sal das superfícies de transferência de calor. O efeito da água fria pulverizada sobre a superfície interna dos TC, na caldeiraria, pode resultar na diminuição da temperatura do vapor que, por sua vez, reduzirá a eficiência térmica global. Intervenções na temperatura do vapor e da superfície de transferência de calor podem ocasionar danos ao equipamento, particularmente nos tubos da caldeira. É necessário garantir a manutenção da água em termos de quantidade e tempo de aplicação. Dentre as facilidades de utilização dessa técnica destacam-se: (i) jatos simples de água podem ser usados em locais com dificuldade de acesso; (ii) a utilização de jatos multibocais para acesso a localidades em que as superfícies não são visíveis pelas portas de inspeção; e (iii) os depósitos solúveis são facilmente removidos por esta técnica. Em contrapartida, apresenta as seguintes desvantagens: (i) possível produção de líquidos ácidos a partir da solução de componentes ácidos contidos no gás de combustão, como: dióxido sulfúrico que é corrosível; (ii) problemas associados com o descarte de efluentes. É necessário considerar as implicações do uso de produtos químicos especiais, como os ácidos minerais, em relação aos potenciais problemas de corrosão; e (iii) a possibilidade de não remover depósitos tenazes e fundidos. Concluindo, cabem as seguintes considerações sobre a utilização dessa técnica: (i) a

quantidade e tamanho dos jatos utilizados dependerá da natureza e do local no qual os depósitos estão; (ii) o provável efeito da obstrução pela utilização da manipulação das lanças; (iii) as obstruções encontradas podem ser internas ou externas à superfície dos gases de combustão (câmara de combustão); e (iv) a economia de tubos horizontais e pré-aquecedores de ar.

- **Limpeza por jateamento** (*shot cleaning*) - É uma técnica cujo princípio de funcionamento baseia-se na liberação de descargas metálicas sobre o interior da passagem dos TC. As descargas liberadas no interior das passagens dos TC são recolhidas na extremidade posterior desses equipamentos. A utilização da limpeza por jateamento (injeção) não objetiva a remoção dos depósitos, mas sim, a prevenção da sua formação. É necessário garantir, por meio de inspeção regular, que as superfícies de transferência de calor, submetidas à limpeza por jateamento, não serão danificadas. Uma vez danificadas, é desejável instalar alguma forma de proteção ou redistribuição do desvio das descargas. Trata-se de uma técnica de caráter preventivo com potencial para gerar economia na recuperação dos aquecedores de ar e remoção de incrustações fundidas ou macias. Sua aplicação limita-se, entretanto, a temperaturas inferiores a 800°C podendo comprometer a integridade das paredes internas das passagens dos TC requerendo inspeção regular.
- **Proteção galvânica** (*galvanic protection*) - Seu uso como alternativa de remoção do fouling do TC é discutida como prevenção e inibição da transformação material que o equipamento é submetido pela interação eletroquímica (e.g. corrosão) a que se expõe. A proteção galvânica associa-se a dois princípios: (i) proteção catódica (uso de correntes elétricas para reduzir e prevenir a corrosão metálica) e (ii) proteção anódica. A corrosão de uma superfície pode ser relacionada à velocidade do fluido corrosivo que a percorre. Quanto maior a velocidade maior será a taxa de corrosão. Este é um tema exaustivamente discutido na literatura especializada, que não cabe aqui ser expandido (Bott, 1994)
- **Uso de inserções** (dispositivos) - O uso de inserções no interior das passagens do TC como alternativa tecnológica de remoção do fouling tem se mostrado eficaz no aumento da transferência de calor desses equipamentos. Essa técnica faz uso de fitas torcidas e matrizes de arame no processo limpeza, um exemplo de uma inserção por fio é ilustrada na Figura 10.

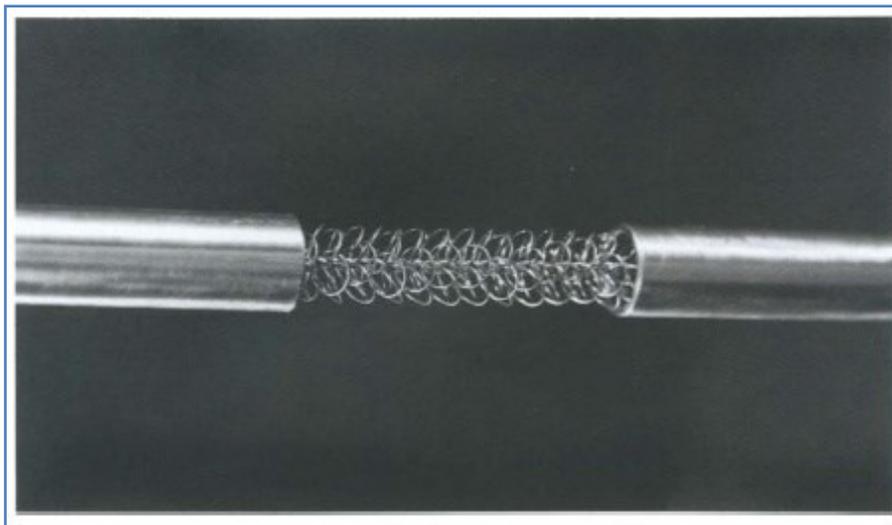


Figura 10 - Inserção por fios de arame

Fonte: Fouling Heat Exchangers, Bott (1994)

A inserção de dispositivos é usualmente utilizada para inibir a formação de incrustações. Um exemplo dessa precaução é a introdução de arames helicoidais no interior das passagens, assegurando-se que esses estejam livres para oscilar e mover durante o fluxo do fluido de trabalho pelo interior dos trocadores. O movimento desses dispositivos interfere com a formação de depósitos alojados na superfície, ocasionando a sua remoção. Segundo Crittenden et al., (1993), a perturbação hidrodinâmica induzida pelo turbilhonamento introduz efeitos benéficos de limpeza. Esse processo apresenta, entretanto, riscos à integridade da estrutura. São eles: (i) a repetição do choque nos mesmos locais fragiliza a região e pode criar fraturas pela fadiga e desintegração das inserções/dispositivos; (ii) os pedaços da superfície interna dos tubos que são liberados na sua própria passagem podem tornar-se um problema adicional à incrustação; (iii) a presença da turbulência aumenta a resistência ao fluxo, impactando nos custos de bombeamento, que são aumentados para uma dada taxa de vazão. Um projeto mais robusto é mostrado na Figura 10. A turbulência adicional próxima à superfície de transferência de calor fornece quatro potenciais efeitos, a saber: (i) redução no tempo de residência do percurso próximo às superfícies aquecidas; (ii) redução no volume do líquido que é aquecido a uma temperatura excessiva a sua capacidade; (iii) eliminação da nucleação na superfície; e (iv) aumento da taxa de remoção ou liberação de depósitos próximos à parede dos tubos

- **Limpeza química** - Esta técnica consiste na utilização de aditivos químicos para minimizar os efeitos da incrustação. A seleção dos aditivos depende da natureza das incrustações. Dentre os exemplos, apresentam-se os minerais presentes na água removidos pelo seu amolecimento devido à ação do aditivo químico. Esses minerais funcionam como facilitadores na redução da incrustação devido a sua cristalização. Outro exemplo é o uso contínuo da injeção de cloro e outros tipos de biocidas para mitigar as incrustações biológicas. Esta técnica não depende do tipo de TC (e.g.: geometria dos tubos) e, sim, da seleção apropriada dos

aditivos químicos selecionados, requerendo, entretanto, cuidados especiais com os efluentes que impactam o meio ambiente.

- **Retrolavagem** - A técnica de retrolavagem ou reversão de fluxo consiste em um período curto de remoção dos detritos acumulados nos canais internos do TC. Esta técnica é realizada por meio da instalação de um bocal com uma válvula de retorno. O fluxo é invertido e as sujeiras são levadas para fora da unidade do trocador. A regulagem da retrolavagem no TC pode ser eficaz na remoção de partículas ou detritos acumulados nas superfícies internas. Embora esta técnica seja mais econômica que a que faz uso de filtros automáticos, não remove depósitos com elevado grau de incrustação.
- **Filtro automático** (*automatic strainer*) - Os filtros automáticos são utilizados em sistemas abertos (tal qual sistema de torre de refrigeração ou sistema de refrigeração central), nos quais uma quantidade significativa de detritos em suspensão está contida nas águas de refrigeração. Protegem os TC e outros equipamentos sujeitos ao entupimento pelo uso de água de baixa qualidade. Os filtros automáticos são avaliados com atuadores pneumáticos e controles elétricos, os quais invertem o fluxo automaticamente e limpam as cestas dos filtros em intervalos pré-estabelecidos. Esta técnica é válida somente para partículas com diâmetros com largas dimensões.

3.1.2.

Tecnologias *off-line* de limpeza

Não obstante as vantagens oferecidas pelas técnicas on-line de limpeza, oportunidades sempre existirão (e.g.: durante paradas técnicas de manutenção) para que os TC sejam submetidos a uma limpeza off-line permitindo resgatar a sua eficácia nos processos de transferência de calor.

Esta seção resume as principais tecnologias de limpeza off-line, cujo critério de seleção deve considerar os seguintes aspectos: (i) prevenção de danos ao TC e equipamentos relacionados; (ii) proteção dos profissionais envolvidos na limpeza contra possíveis acidentes, ferimentos ou riscos à saúde; e (iii) proteção ao meio ambiente sobre possíveis efeitos prejudiciais resultantes do processo de limpeza. A vigilância é sempre necessária ainda que a operação de limpeza seja pouco frequente e considerada exercício "temporário".

- **Limpeza manual** - A técnica de limpeza manual pode ser realizada com ou sem o uso de água. O método de limpeza por escovação ou raspagem das superfícies dos trocadores para remoção dos depósitos alojados é o mais simples. Porém, o custo de limpeza manual poderá ser elevado se existirem riscos potenciais de explosão e segurança de toxicidade na utilização de solventes. Geralmente é aplicável a TC do tipo placas, cujo

acesso é facilmente obtido por desmontagem. Em grandes equipamentos de combustão a limpeza manual pode ser utilizada para remoção de depósitos das superfícies, para tanto, é necessário que os profissionais de limpeza entrem no equipamento e isso exigirá precauções especiais para minimização dos riscos (e.g.: uso de ventiladores de ar portáteis e mangueiras para refrigeração com ar refrigerado, uso de roupas especiais, óculos, máscaras e respiradores de proteção).

- **Limpeza mecânica** - A técnica de limpeza mecânica como alternativa de remoção da incrustação em trocadores de calor (TC) encontra aplicação em equipamentos industriais de forma ampla. Quatro são as categorias de aplicação.
- **Água, vapor e lanças de ar** - O uso desta categoria de limpeza mecânica é eficaz na remoção dos depósitos com grau inferior de incrustação. A remoção de depósitos tenazes requer: a utilização de jato de água a alta pressão e o uso de detergentes introduzidos nos jatos de limpeza e lanças de vapor que permitem o uso de ar carregado com material abrasivo impelido a uma velocidade elevada para colidir sobre o depósito alojado no interior da passagem do TC. Cuidados são requeridos no uso de pressões elevadas para evitar danos à usina e ferimentos aos profissionais de limpeza. Lester & Walton (1982) identificaram (Tabela 4) características das incrustações e as técnicas mecânicas aplicáveis para sua remoção em TC.

Tabela 4 - Natureza das incrustações e técnicas de limpeza em trocadores

Incrustações	Trocador de calor habitual	Técnica mecânica aplicável	Pressão de operação (bar)	Pressão de operação (kPa)
Contaminantes transportados pelo ar (poeira, areia)	Refrigeradores a ar de alumínio	Lavagem a jato	2 - 4	196 - 392
Depósitos simples, ferrugem solta, crescimento biológico	Paredes e tubos de trocadores, películas de refrigeração	Lavagem a jato	40 - 150	3920 - 14700
Cera, graxa	Condensadores etc	Hidro vapor	30	2940
Depósitos orgânicos pesados, polímeros, petróleo	Condensadores	Jateamento de água com ou sem pré-tratamento com cloriano/solventes aromatizantes	300 - 400	29400 - 39200
Calderaria, lado de água e lareira	Caldeiras, economizadores, pré-aquecedores	Jateamento de água pressurizada ou técnicas abrasivas pneumáticas incluindo caroços de azeitona esmagados	300 - 700	29400 - 68600
Depósitos externos em trocadores de calor (pinturas, ferrugem)	Todos os tipos nos quais aplicáveis	Jateamento areia molhada	Depende do equipamento projetado	---

Fonte: Reproduzido de Lester & Walton (1982)

- **Haste e tubo de perfuração** - Pela dificuldade na remoção de depósitos faz-se necessário a perfuração ao longo do eixo da passagem dos tubos do TC. Essa perfuração consiste na desobstrução e restauração do interior

desses equipamentos. Já a limpeza química ou o uso do jato de água não são possíveis pela dificuldade de penetração da massa de depósitos alojados. Esses depósitos podem ser densos, duros e intratáveis chegando a ocupar a área total do interior da passagem do fluxo. Brocas, cortes e ferramentas de desgastes e escovas podem ser associados a esses processos de limpeza. Esses dispositivos podem ser fabricados em latão, aço ou nylon dependendo do material do tubo dos TC e da natureza dos depósitos. A Figura 11 ilustra alguns desses dispositivos e a Tabela 5 descreve suas aplicações.

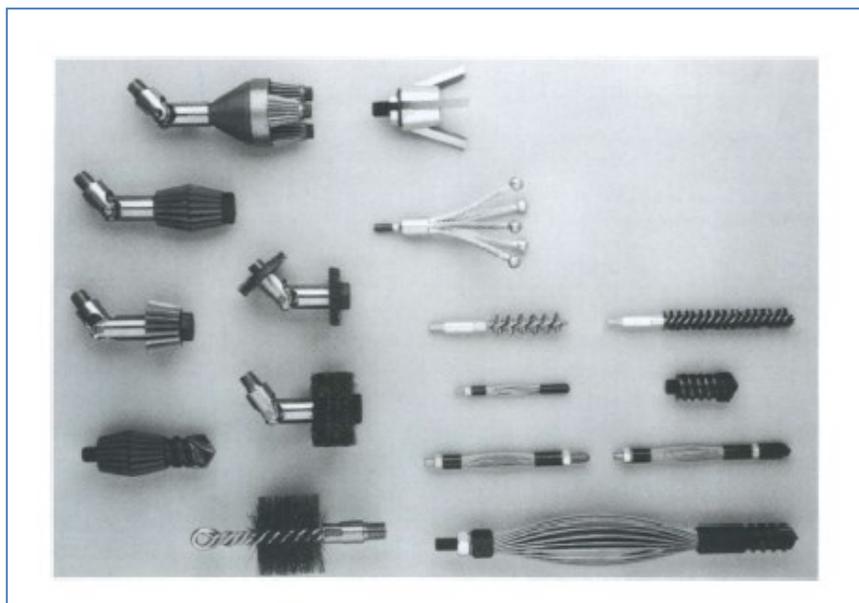


Figura 11 - Brocas, cortes e ferramentas de desgastes

Fonte: *Fouling of heat exchangers*, Bott (1994)

Tabela 5 - Aplicações de dispositivos de perfuração e desobstrução

Item	Aplicação
Brocas ocas	Tubos completos ou severamente obstruídos
Fios de aço inoxidável cortados/ferramentas de desgaste	Tubos previamente acabados por perfuração devido a depósitos médio e leves
Escovas de aço inoxidável	Depósitos simples e leves de camadas em tubos ferrosos (exemplo: aço carbono, aço inoxidável)
Escovas de latão	Depósitos simples e leves de camadas em tubos não ferrosos
Escovas de nylon	Depósitos simples de lodo, lama, em tubos não ferrosos (e.g.: cobre, latão, plásticos)

Fonte: *Fouling of heat exchangers*, Bott (1994)

A Figura 12 ilustra esse princípio. A eficácia dessa técnica é obtida por meio do acesso ao local em cada uma das extremidades dos tubos

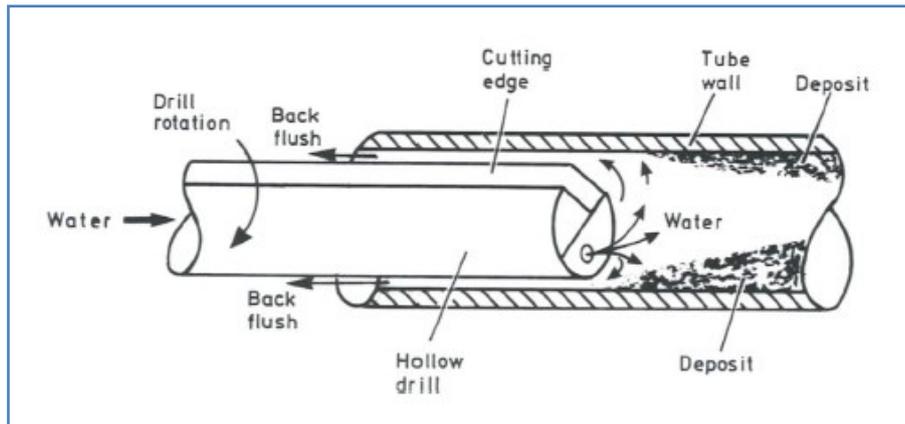


Figura 12 - Técnica de limpeza pelo uso de balas, raspadores e purificadores

Fonte: Fouling of heat exchangers, Bott (1994)

- Uso de projéteis, raspadores ou purificadores** - Outra alternativa utilizada para desobstrução das passagens dos tubos do TC, quando essa atinge um nível elevado de obstrução, é a utilização de um raspador propellido no interior da passagem do trocador. O projétil é disparado ao longo do tubo por uma corrente de ar ou água de alta pressão, realizando a perfuração da massa de material alojado. Exemplos de raspadores são apresentados nas Figuras 13 e 14. O dispositivo de limpeza é inserido por um propelador, pistola de água, conforme ilustrado na Figura 15. Essa pistola de água opera a pressões entre $1,4 \text{ kN/m}^2 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ e $2,75 \text{ kN/m}^2 \times 10^3,0 \text{ kN/m}^2$. Os acessórios de limpeza utilizados nos tubos do TC são fabricados a partir de metais revestidos de borracha ou plástico. A utilização desses projéteis no interior dos tubos do TC requer atenção e cuidados. Segundo Hovland et al., (1988) os efeitos de erosão pela utilização desses equipamentos de limpeza é desprezível. Para exemplificar a afirmação, um tubo utilizado para limpeza foi fabricado em aço e ao final de 100 passagens por meio de uma parede de liga de cobre níquel 90/10 permitiu o alcance de $12,7 \mu\text{m}$ - $22,9 \mu\text{m}$. Três procedimentos diferentes foram adotados nos testes e refletiram o desempenho dos limpadores antes de serem substituídos. Os autores concluíram que o uso dos tubos com materiais duros (aço inoxidável ou titânio) seriam similares ou inferiores.

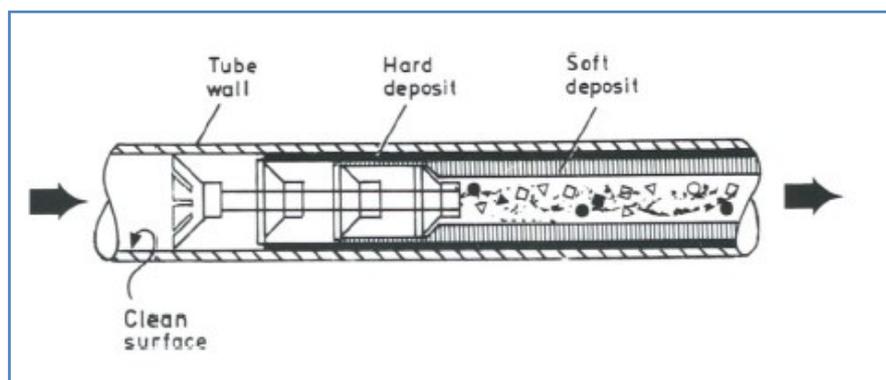


Figura 13 - Técnica de limpeza mecânica

Fonte: Fouling of heat exchangers, Bott (1994)

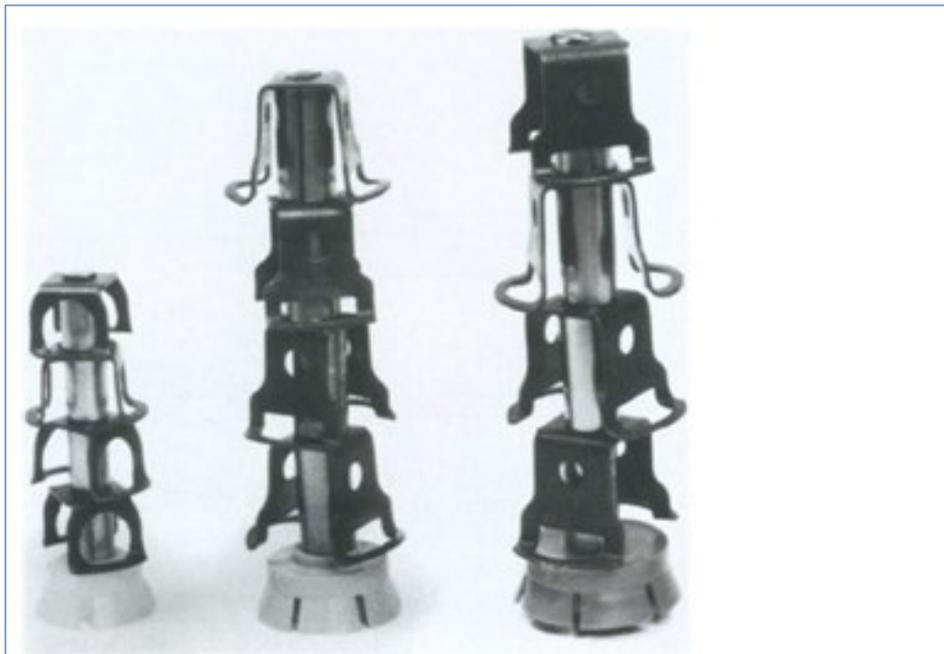


Figura 14 - Exemplo de raspadores

Fonte: Fouling of heat exchangers, Bott (1994)

A Figura 15 ilustra um bocal injetor de água, sob pressão, utilizado em conexão com a limpeza mecânica, assim facilitando a remoção de incrustações.



Figura 15 - Dispositivo de água

Fonte: Fouling of heat exchangers, Bott (1994)

- **Imersão de vapor de água** (*steam soaking*) - Esta técnica consiste na passagem de um fluxo de vapor pelo interior do trocador de calor (TC). O processo de limpeza é estimulado pela expansão ou contração térmica e pela susceptibilidade do vapor e água aquecida penetrarem nos depósitos.
- **Choque térmico** (*thermal shock*) - A técnica de choque térmico como alternativa de mitigação de incrustações consiste na quebra das camadas de depósitos das superfícies internas dos tubos devido às diferenças na expansão térmica (provocadas pelas alterações da temperatura, particularmente rápidas) entre os depósitos alojados e as superfícies metálicas dos trocadores. A técnica está intimamente relacionada com a imersão de vapor de água. É necessário em seguida realizar o enxague para eliminar os materiais removidos. É provável que o processo seja repetido inúmeras vezes antes das superfícies serem razoavelmente limpas. Na maioria das aplicações, refrigerar rapidamente (Nitrogênio líquido) a superfície quente é notadamente a mais provável escolha realizada. Todavia, o armazenamento da energia devido ao stress térmico e a liberação dessa energia resultam na propagação de defeitos na estrutura cristalina dos depósitos. Se a água é drenada e a temperatura da superfície de transferência de calor é elevada, as altas temperaturas alcançadas eliminarão os micro e macro organismos. Porém, similar à técnica dos sopradores de vapor, o fluxo de água retorna uma grande quantidade de material biológico morto liberado na superfície. Este bloqueio provoca a obstrução da passagem do fluxo. O aumento da temperatura do biofilme provoca o seu cozimento aumentando a dificuldade da sua remoção.
- **Choque osmótico** - Os micro-organismos são dependentes da transferência de resíduos (nutrientes) através da membrana celular. Os processos osmóticos dependem de membranas semipermeáveis e o fenômeno pode ser aplicado à limpeza de TC em situações em que um biofilme reside. A água migra através das regiões de baixa concentração (e.g.: um sal) para regiões de elevada concentração. É possível aplicar o choque osmótico em sistemas de água do mar ou pura, submetendo-os a água salgada ou a água doce respectivamente. A técnica é de difícil aplicação quando faz uso da água do mar no combate a incrustação devido a prováveis problemas de corrosão e o longo período de sua exposição nos equipamentos.
- **Limpeza química** - A técnica de limpeza química quando utilizada requer cuidados especiais. Antes de ser utilizada, alguns fatores críticos devem ser observados. Não menos importante destacam-se: (i) o risco no despejo de dejetos no meio ambiente; (ii) a natureza dos depósitos para que o tratamento adequado possa ser especificado; (iii) o material de construção dos TC (tubulações associadas e equipamentos) nos quais a corrosão pode ser evitada; (iv) a capacidade de aquecer o equipamento visando a eficácia do processo de limpeza; (v) o volume do sistema para que a quantidade de produto químico necessário seja estimada; (vi) o grau de limpeza exigido como resultado da operação de limpeza; (vii) os problemas de efluentes associados com a eliminação segura; (viii) os riscos associados com o processo de limpeza e segurança necessários; (ix) o custo dos químicos utilizados; e (x) o tempo requerido na operação.

Alguns dos produtos químicos têm sido usados para fins de limpeza no combate as incrustações tal como acontecem com os problemas de deposição. A remoção efetiva dos depósitos dependerá da velocidade e temperatura do fluido. Pode ser antecipado que a velocidade alta e a elevada temperatura de funcionamento ajudarão no processo de limpeza a aumentar o cisalhamento e a melhorar a faixa de reação química (a eficácia dos agentes químicos de limpeza depende da velocidade e temperatura do fluido). As bombas das usinas não devem ser utilizadas na circulação de soluções de produtos químicos de limpeza (e.g. ácidos e alcalinos), mas podem ser usualmente empregadas nas operações de nivelamento. A circulação de solventes inflamáveis precisará de um cuidado especial, assim como os TC não podem ser instalados em área à prova de fogo. Atenção especial deve ser dada às "pernas mortas", nas quais produtos químicos de limpeza podem acumular e originar problemas mais a frente durante o procedimento de limpeza ou em posteriores operações da usina. Adequado enxague deve ser providenciado e nenhum produto químico de limpeza envolvendo especialmente ácidos, bases (álcalis) e outros agentes agressivos, devem ser empreendidos sem controle analítico. Esses cuidados ajudarão na redução dos riscos potenciais de corrosão.

- **Limpeza fora do local** - A técnica de limpeza fora do local consiste na desmontagem do TC e a remoção das placas onde estão instaladas. O processo de limpeza ocorre por procedimentos químicos ou mecânicos. É somente aplicado aos TC de estrutura de placas. Para limpeza mecânica, escovação ou lavagem a alta pressão pode ser utilizada. Para limpeza química, vários agentes podem ser utilizados, dependendo da natureza e grau de incrustação. Agentes de limpeza comuns para camadas incrustadas e sedimentadas incluem: água quente, ácidos nítricos, sulfúricos, cítricos ou fosfóricos, polifosfatos de sódio etc. Para o crescimento biológico e o lodo, limpezas com agentes alcalinos tais quais hidróxido de sódio e carboneto de sódio são usualmente eficazes. Caso haja necessidade de serviços extensivos, as placas podem ser enviadas para recondição total. Neste caso, as placas ficarão tão boas quanto a novos equipamentos no seu desempenho.
- **Limpeza no local** - A técnica de limpeza in loco é aplicada a todos os tipos de TC. Seu princípio consiste na passagem, por um sistema externo, de uma solução química por dentro dos TC, promovendo a diluição e remoção das incrustações para o meio externo dos depósitos das superfícies. A utilização desta técnica caracteriza-se pela economia e pelo prolongamento do tempo de vida de operação do equipamento. A seleção da solução química depende da natureza da incrustação bem como do material dos TC. Em contrapartida, esta alternativa tecnológica, sob nenhuma circunstância, deve utilizar ácido hipoclorídrico na limpeza dos TC de aço inoxidável, tão pouco, os constituídos por placas de titânio. Se estes ácidos forem utilizados nestes tipos de materiais, elas serão corroídas e necessitarão serem substituídas. Os agentes de limpeza contendo amônia e ácidos oxidantes, tal qual o ácido nítrico, não deve ser utilizado para limpeza dos TC de níquel, Hastelloy B e em trocadores de cobre soldados. Estes agentes resultarão em corrosão desses equipamentos, juntas soldadas e insuficiência dos TC.

4

Avaliação do dispositivo eletrônico *antifouling*

A necessidade de remover as incrustações dos trocadores de calor tem motivado o desenvolvimento de alternativas de manutenção de sistemas de limpeza de trocadores de calor.

Este capítulo apresenta a investigação realizada para avaliar o desempenho de um dispositivo eletrônico *antifouling* que expõe o escoamento da água de resfriamento do trocador de calor à ação de um campo elétrico como estratégia de inibir a formação de (bio)*fouling* (incrustação).

4.1.

Estudo do *biofouling* na usina hidrelétrica Fontes Nova

Concebida e construída no início do século XX, o complexo hidroelétrico Fontes Nova é um dos mais antigos do Brasil.

Na sua atual configuração, a usina Fontes Nova, de propriedade da Light Energia, é alimentada por águas que se originam do Reservatório de Lajes e do Rio Paraíba do Sul. Dispõe de uma capacidade instalada de 132 MW (média), queda nominal de 310 m, opera 3 turbinas tipo Francis de 44 MW cada, nível d'água máximo normal de 415 m, cota na qual conta um volume útil de aproximadamente 445 milhões de metros cúbicos para regularização das vazões, e constitui-se em reserva estratégica para suprimento da quase totalidade da água que abastece a região metropolitana do Rio de Janeiro. Os mancais de cada uma das três turbinas é refrigerado por um sistema de trocadores de calor do tipo placas verticais operando água e óleo em contra-corrente, foco principal do presente estudo.

4.1.1.

Estudo da qualidade das águas de alimentação

Com o propósito de conhecer o fenômeno do *biofouling*, análises químicas foram então realizadas em amostras de água coletadas em localizações

estratégicas para investigar os mecanismos de obstrução. Durante a captação das amostras, águas originárias do Reservatório de Lajes e do Rio Paraíba do Sul alimentavam a usina. Análises de natureza química, físico-química e biológica foram realizadas nas amostras de água e resíduos coletados em tubulações, elementos dos trocadores de calor do sistema de refrigeração dos hidrogeradores e no canal de fuga das turbinas, coletadas na usina. Uma síntese das análises realizadas é discutida abaixo.

No período janeiro a março de 2008, amostras de água foram analisadas pelo Grupo de análises químicas da UFF (Amostras A e B) e pelo Grupo de Estudos Limnológicos da UNIRio (Amostra C):

- **Categoria A:** amostras água-resíduo coletadas no interior do duto de alimentação do sistema de refrigeração dos hidrogeradores, para caracterização de elementos químicos e/ou substâncias presentes pelas técnicas (i) espectroscopia de plasma e (ii) espectroscopia no infravermelho.
- **Categoria B:** amostras água-resíduo coletada no canal de fuga das turbinas para caracterização de elementos químicos e/ou substâncias presentes pelas técnicas (i) espectroscopia de plasma e (ii) espectroscopia no infravermelho.
- **Categoria C:** amostra água-resíduo coletada no canal de fuga das turbinas, em frasco especiais contendo meio de cultura para conservação de micro-organismos, para análise biológica por microscopia óptica.

Três técnicas foram utilizadas para analisar os elementos químicos presentes, substâncias e micro-organismos, sabidamente indesejáveis para o adequado funcionamento dos subsistemas que integram os hidrogeradores da usina. Técnicas essa a seguir caracterizadas: (i) Espectrometria no infravermelho com transformada de Fourier, aplicável à identificação de ligações químicas características de substâncias orgânicas e inorgânicas, e à caracterização de grupos químicos funcionais (aplicada às Amostras A e B, utilizadas tal como coletadas, sem sofrer qualquer tratamento destrutivo); (ii) Espectrometria de emissão por plasma-ICP OES, aplicável à identificação de elementos químicos (aplicada às Amostras A e B, preparadas por processo de abertura) e (iii) Microscopia Óptica, aplicável à identificação de matéria orgânica viva (micro-organismos), em particular agregados de crescimento bacteriano, algas filamentosas (cianobactérias) e algas bacilariofíceas (aplicada à Amostra C).

4.1.2. Qualidade das águas

Resumem-se, a seguir, os resultados das análises químicas realizadas por três técnicas distintas:

- **Análises químicas realizadas pela técnica de espectrometria no infravermelho** - Com base nessa técnica, foram identificadas: (i) a presença de amidas (agrupamentos NH_2) e ligações com enxofre (S) na amostra A (coletada no duto) e (ii) a presença de ésteres de ácidos carboxílicos, cetonas alifáticas e compostos alifáticos organo-sulfurados, na amostra B (coletada no canal de fuga das turbinas), resultados esses indicativos da presença de organismos vivos. Tal constatação suscitou a necessidade de novas análises químicas (análise complementar, biológica) para pesquisar a natureza dos micro-organismos possivelmente presentes e capazes de explicar o indesejável fenômeno de biofouling nos elementos internos dos trocadores de calor dos hidrogeradores.
- **Análise química pela técnica espectrometria de emissão por plasma** - A espectrometria de emissão por plasma às amostras da categoria A e B, indicaram a presença de ferro elementar provenientes de processos de corrosão (óxido de ferro): Fe_3O_4 , teor considerado elevado e que sugere medidas de proteção anti-ferrugem no sistema de distribuição de água. Ambas as análises comprovaram teores similares de Ferro (% em massa), teores esses na proporção (média) de 39,5%, para o caso da Amostra A e 42,2% para o caso da Amostra B.
- **Análise biológica pela técnica de microscopia óptica** - Aplicando a técnica de microscopia óptica à amostra C, após tratamento de cultura, evidenciou a existência de um biofilme no material analisado, constituído de bactérias, fungos e algas. Mostrou ainda flocos de matéria orgânica e inorgânica e cianobactérias filamentosas (aumento de 200x) no agregado. Conforme documentado no laudo original, o detalhe de floco biológico com a presença de cianobactéria filamentosa bem como evidência da presença de bacilariofíceas agregadas ao material analisado foram documentados com um aumento de 400x. Já o detalhe do agregado biológico que constitui os flocos predominantes no material analisado ficou nitidamente evidenciado com um aumento de 600x. (Colaboração do Grupo de Estudos Limnológicos da UNIRio).

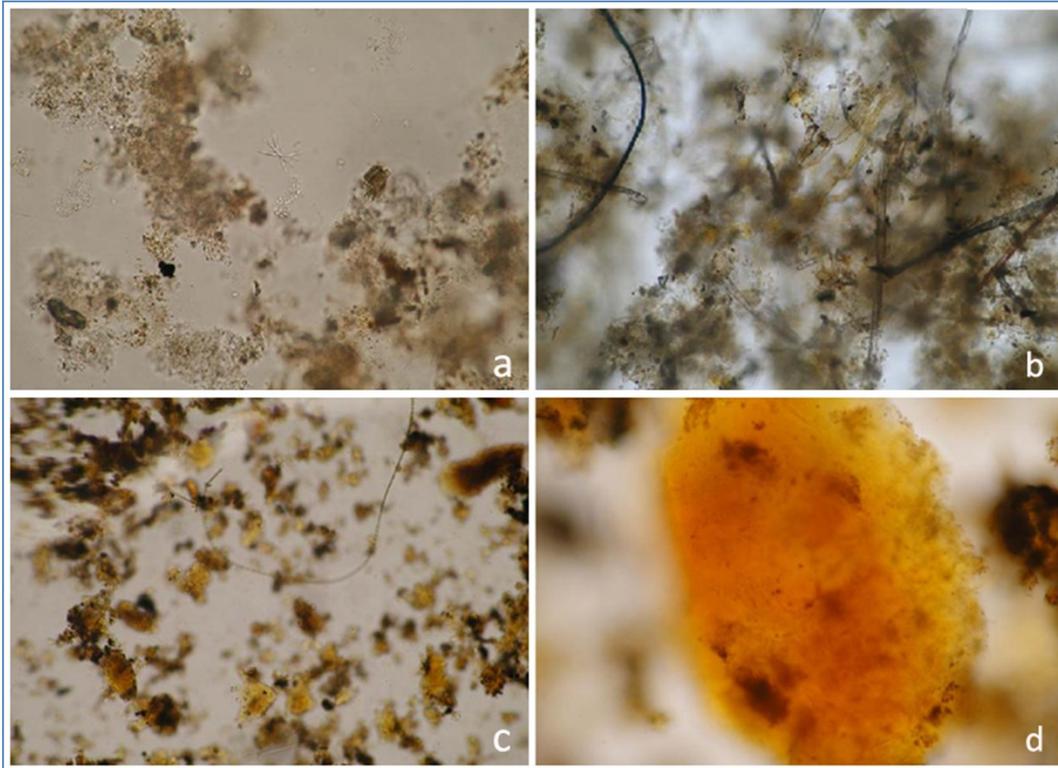


Figura 16 - Resultados das análises químicas realizadas

Fonte: P&D Ref. OKE 06-07 (P&D Aneel-Light Energia, Ciclo 2006-2007)

Fig. 16a: Flocos orgânicos e inorgânicos e cianobactérias filamentosas (aumento de 200x)

Fig. 16b: Floco biológico com a presença de cianobactéria filamentososa (aumento de 400x)

Fig. 16c: Bacilariofíceas agregadas ao material analisado (aumento de 400x)

Fig. 16d: Flocos predominantes no material analisado (aumento de 600x).

4.2.

Aparatus experimental: sistema de medição desenvolvido

A Figura 17 ilustra o esquemático do sistema multicanal desenvolvido especificamente para atender necessidades desta pesquisa, que inclui: (i) três canais para controle de sensores de pressão diferencial (SP), (ii) seis canais dedicados à medição de diferenças de temperatura (ST) e (iii) três conversores de temperatura, todos eles acoplados à placa condicionadora que faz interface com a central de processamento (CPU) do sistema que disponibiliza informações num display e recebe informações via teclado. O décimo canal é reservado para gerenciamento interno do sistema.

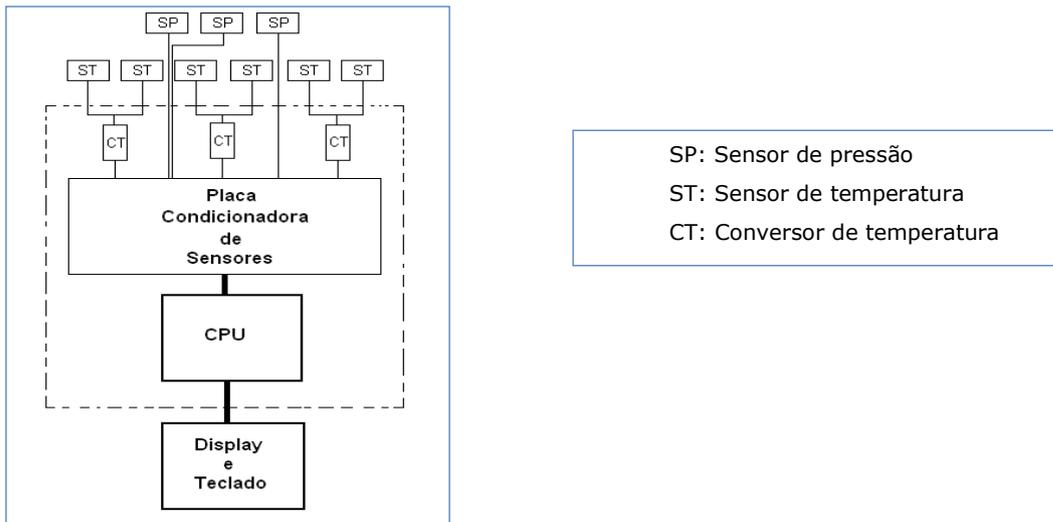


Figura 17 - Esquemático do sistema de aquisição de dados desenvolvido

O sistema desenvolvido coleta dados de nove sensores analógicos que são armazenados em um dispositivo de armazenamento portátil do tipo pen-drive. Este sistema foi programado para leitura em tempo real de seis diferenciais de temperatura e três de pressão. No arquivo gerado são registrados os valores lidos pelos sensores, a data e o horário da leitura, realizada a cada dois minutos de intervalo. Os arquivos gerados são periodicamente transferidos da memória portátil para um notebook que processa a análise dos dados. Todos os módulos foram desenvolvidos, testados e validados no Centro de processamento e análise dos dados (Laboratório de controle da PUC-Rio). O painel de controle mostra continuamente o horário atual e eventuais mensagens de erro emitidas pelo sistema. Na concepção piloto desenvolvida, o sistema deve ser reiniciado após cada mensagem de erro para voltar a operar assim exigindo do operador monitoramento constante durante a sua fase experimental.

O sistema é subdividido em três subsistemas: Unidade de Processamento e Controle (CPU), placa condicionadora de sensores e sensores, a seguir sucintamente descritos:

- Unidade de Processamento e Controle (CPU) — gerencia o funcionamento do coletor de dados e registra os resultados medidos gravando-os na memória portátil pen-drive, que permanece permanentemente conectada a uma porta de comunicação USB do módulo da CPU. A CPU possui também um relógio de tempo real para garantir a acuidade temporal no registro das informações coletadas permitindo correlacionar cada uma das medições a qualquer evento do experimento.

- Placa Condicionadora de Sensores — condiciona no sistema o sinal elétrico de cada um dos nove sensores utilizados para medições de pressão e temperatura diferenciais, estabelecendo as suas interface com a unidade de controle e processamento CPU.
- Sensores diferenciais de temperatura e pressão — captam os sinais de temperatura e pressão. Os sensores de temperatura são do tipo PT-100 e são ligados dois-a-dois a “conversores de temperatura” que calculam o diferencial de temperatura e enviam o sinal para a placa condicionadora. Os conversores de temperatura e os sensores de pressão têm saídas do tipo 4-20 mA e são indicados para uso industrial. A tabela 6 abaixo caracteriza os nove canais do sistema e a faixa de medição dos sensores diferenciais de temperatura e pressão utilizados.

Tabela 6 - Caracterização dos canais do sistema proposto

Referência do canal	Grandeza física	Faixa de medição
1	Temperatura diferencial	0 – 10°C
2	Temperatura diferencial	0 – 40°C
3	Pressão diferencial	0 – 25PSI
4	Temperatura diferencial	0 – 60°C
5	Temperatura diferencial	0 – 10°C
6	Pressão diferencial	0 – 25PSI
7	Temperatura diferencial	0 – 40°C
8	Temperatura diferencial	0 – 60°C
9	Pressão diferencial	0 – 25PSI
10	Canal de gerenciamento interno	

A figura 18 ilustra esquematicamente o sistema de três trocadores de calor (óleo-água) do tipo placas verticais acoplado a cada uma das três unidades hidrogeradoras da usina Fontes Nova (no caso a Unidade A).

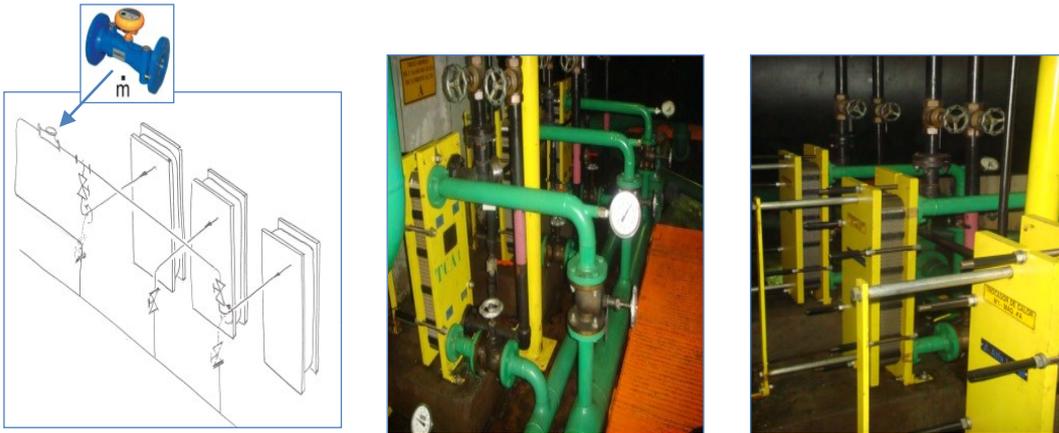


Figura 18 - Conjunto de três trocadores de calor tipo placas verticais

E, dando destaque a apenas um dos três trocadores de calor ilustrados na figura acima, a figura 19 apresenta, de forma esquemática, as estações de medição e define a nomenclatura básica necessária ao seu entendimento e à formulação das equações que governam o escoamento estudado.

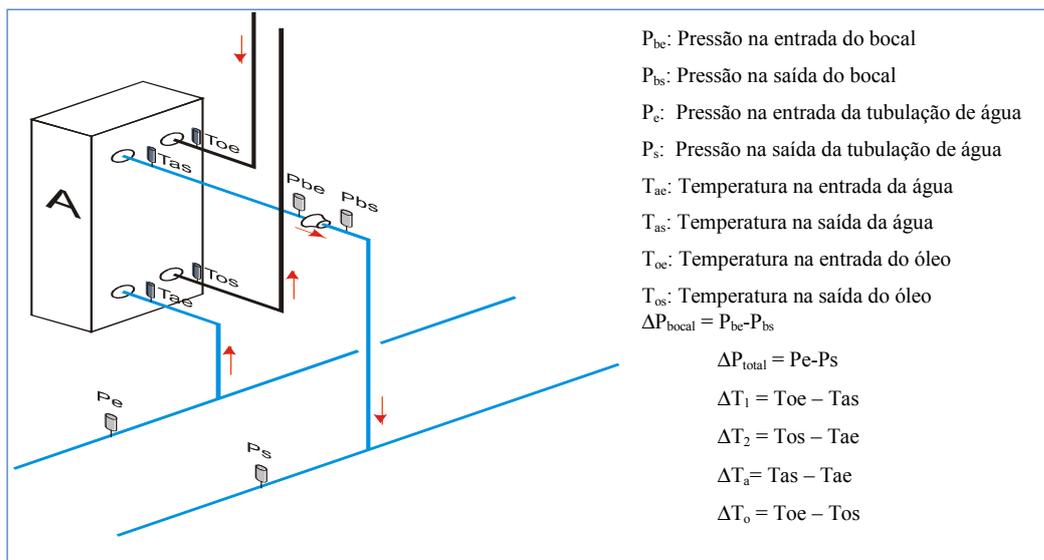


Figura 19 - Esquemático das estações de medição e nomenclatura utilizada



Figura 20 - Detalhes do sistema de medição

Figuras. 20a, 20b e 20c: circuito eletrônico do sistema de medição e o seu painel de controle. Figuras. 20d: Dispositivo *antifouling* instalado; Figuras 20e e 20f: sistema by-pass para procedimentos de equalização do sistema, instalado no bocal para medição de vazão com suas tomadas de pressão

4.3. Validação do sistema de medição de vazão

Adicionalmente à validação do bocal para medição de vazão desenvolvido em conformidade ao código ASME (processo de seleção do parâmetro $\beta=0,5$ e procedimento de calibração), o sistema de medição de vazão foi também validado para operação em condições hostis de operação; i.e.: submetido ao mesmo fouling que é imposto aos trocadores de calor pelas águas que abastecem as turbinas.

Durante os ciclos de medição, experimentos foram realizados com o propósito de validar o sistema de medição em condições hostis de funcionamento (i.e.: com o bocal de medição de vazão e as tomadas de pressão e de temperatura impregnadas com incrustações de natureza orgânica e inorgânica provenientes das incrustações naturais que ocorrem na usina). A figura 21 ilustra o estado do bocal em condições adversas de trabalho. Condições essas que variam de uma condição

em que o bocal encontra-se absolutamente limpo à condição extrema com o bocal completamente impregnado por incrustações.

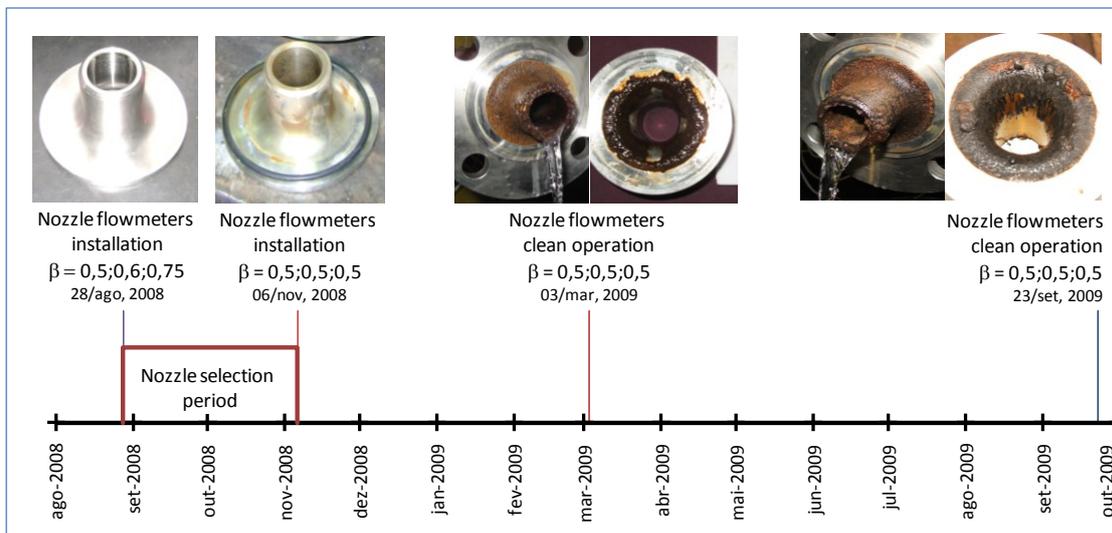


Figura 21- Processo de seleção do β e medições realizadas

Imagens 21a e 21b: processo de seleção do β mais indicado para o bocal (selecionado $\beta=0,5$, experimentos realizados entre setembro a novembro de 2008)

Imagens 21c e 21d: medições realizadas com o bocal incrustado (março 03, 2009)

Réplica das medições realizadas com o bocal incrustado (set 23, 2009)

Os dados da Figura 22 ilustram os experimentos realizados no período de 03 de março a 23 de setembro de 2009 (6 meses e 20 dias de operação). Após constatar que o bocal também acumulava incrustações, este foi novamente limpo no dia 03 de março e recolocado em operação assim permanecendo até o dia 23 de setembro, dia em que medições consecutivas foram realizadas com o bocal sujo e com o bocal limpo. Ou seja, após realizar medições com o bocal tomado por incrustações, este foi desmontado para sofrer um processo de limpeza e reinstalado para realizar novas medições.

Da observação visual (Figura 21) percebe-se que formação de incrustação se dá de forma mais intensa na parte anterior (de maior diâmetro) do bocal assim acelerando o fluido nessa região. Em outras palavras, essa incrustação na base do bocal induz a um valor de queda de pressão superior ao valor que se obteria se o bocal estivesse limpo. Os dados da figura 22 (que refletem as medições realizadas) de fato confirmam este fato. Com o bocal sujo o valor lido da vazão mássica foi de 2,98 kg/s; mantido o bocal sujo e realizada a limpeza apenas nos orifícios das tomadas de pressão, o valor da vazão mássica medida manteve-se praticamente inalterada (3,00 kg/s). Entretanto, após a limpeza do bocal (e

também dos orifícios das tomadas de pressão), o valor da vazão calculada a partir da pressão diferencial imposta pelo bocal foi reduzida para 2,89 kg/s. Ou seja, uma incrustação acumulada por seis meses e 20 dias apenas introduziu uma diferença de leitura de 3,8% em relação ao valor indicado pelo bocal limpo.

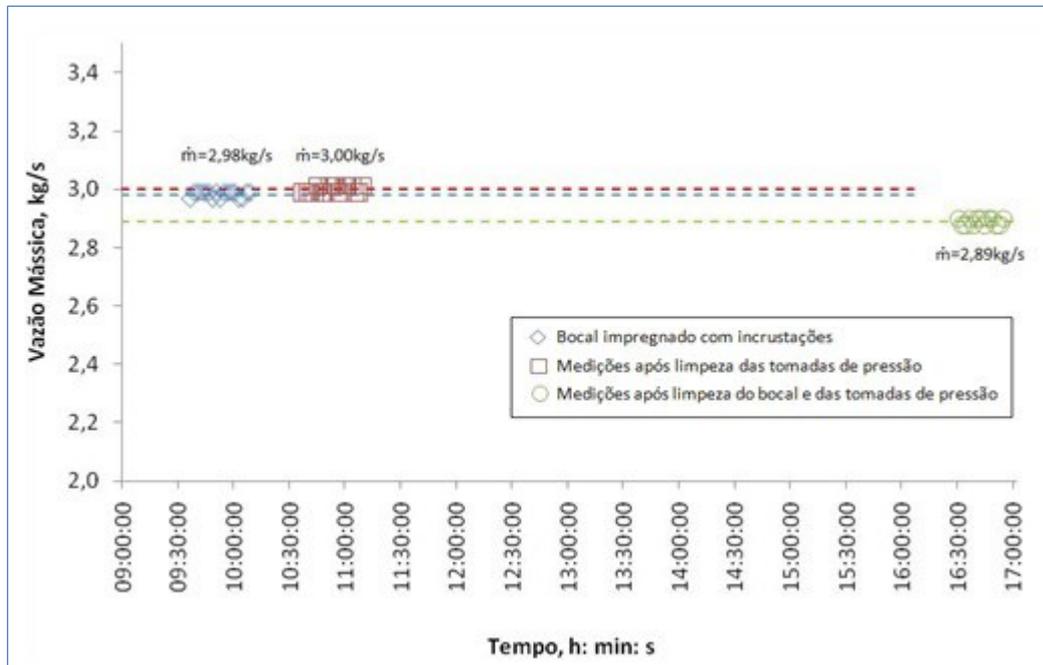


Figura 22 – Testes realizados para estudo do efeito da incrustação

(i) no bocal ASME ($\beta=0,5$) utilizado para medição de vazão e (ii) nas tomadas de pressão (medições de vazão da água de resfriamento do trocador de calor água-óleo)

Conforme evidenciado pelos dados da Figura 22, para os níveis de flutuação presentes no escoamento, uma diferença de apenas 3,7% reflete um erro considerado pequeno para o período de incrustação (6 meses e 20 dias) a que foi submetido o bocal. Cabe aqui lembrar que todos os três ciclos de medição realizados para avaliar o efeito do Dispositivo *antifouling* tiveram uma duração de cerca de três meses, assim sugerindo que o bocal não requer manutenção sistemática durante o ciclo de medição (erros inferiores a 3,7%).

4.4.

Estudo da eficácia do dispositivo antifouling na usina Fontes Nova

Azevedo, et al. (1995) & ROZENTAL, et al. (2006) discutem, respectivamente, a ação de um campo elétrico e do tratamento da água, sob condições específicas. Esta pesquisa de mestrado investiga o escoamento exposto ao efeito de um campo elétrico com vistas a mitigar incrustações.

4.4.1. Técnica de excitação por campo elétrico

O dispositivo *antifouling* (Hydrophath Technology, 1999¹) foi utilizado como gerador do campo elétrico alternado para excitar o escoamento, objeto do estudo que visa investigar o seu efeito nos mecanismos de formação de incrustações. Segundo preconizado pelo fabricante, a geração de um campo elétrico, decorrente da junção dos sais bi-polares da água, produz ondas eletromagnéticas e os íons dos depósitos e resíduos (presentes no escoamento) são polarizados pelo efeito do campo elétrico alternado induzido tendendo a se posicionarem no centro do escoamento (região de velocidade máxima do escoamento) ao invés de se depositarem nas paredes internas dos dutos. Minimizam, assim, o problema da obstrução. Com base nas informações do fabricante, (catálogo do fabricante, Modelo P-160, 85 cm de altura e 6 kg), o equipamento abraça tubos cujo diâmetro varia entre 160 a 200 mm, opera numa faixa de entrada universal do transformador de corrente alternada entre 90 a 260 VAC/47-63 Hz cuja corrente de entrada varia de 32 a 92 mA. Conforme ilustrado na figura 4.9 o aparelho é de simples instalação.



Figura 23 - Equipamento Dispositivo *antifouling*, modelo S160

Detalhes da sua instalação na alimentação do circuito de água de resfriamento dos trocadores de calor água-óleo

4.4.2. Experimentos preliminares com a técnica proposta

O dispositivo *antifouling* foi testado na usina Fontes Nova em dois momentos distintos mostrados na figura 24 (Azevedo, 1995):

¹ Equipamento representado no Brasil pela empresa ESA Engenharia e Sistemas Ltda. e desenvolvido pela empresa inglesa Hydrophath, em associação com a British Gas Company; a Auxill, na separação de líquido/líquido e líquidos/sólidos; o sistema HOH para osmose reversa e conversão de água salgada em água potável.

- no período entre dezembro de 1997 e maio de 1998, não tendo sido possível observar ou medir qualquer resultado capaz de comprovar a eficácia do sistema Dispositivo *antifouling* como “retardador” do fenômeno de incrustações nos canais internos dos trocadores de calor.
- no período entre julho de 2004 e abril de 2005, quando a ESA Engenharia S.A., propôs uma nova rodada de experimentos fazendo uso de um equipamento com maior potência de geração de campo magnético. O novo experimento produziu resultados considerados positivos. Conforme observado à época o hidrogenador (cujo circuito de água de refrigeração esteve sob o efeito do sistema Dispositivo *antifouling*) permaneceu em operação por um período contínuo de nove meses sem a necessidade de parada de manutenção. Um resultado positivo se comparado à situação do ano anterior quando duas paradas de manutenção para limpeza dos resfriadores de ar (trocador de calor ar-água) foram reportadas. A documentação fotográfica também mostrou que os tubos dos resfriadores de ar “encontravam-se limpos e em boas condições” (houve relatos de pequenos depósitos de sólidos nas tampas e nos espelhos das chapas de fixação dos tubos). Durante os nove meses de operação contínua do equipamento Dispositivo *antifouling*, a equipe de manutenção da Usina monitorou (leituras visuais) as temperaturas dos mancais e do ar de arrefecimento do gerador, não tendo sido observado aumentos expressivos da temperatura dos mancais.

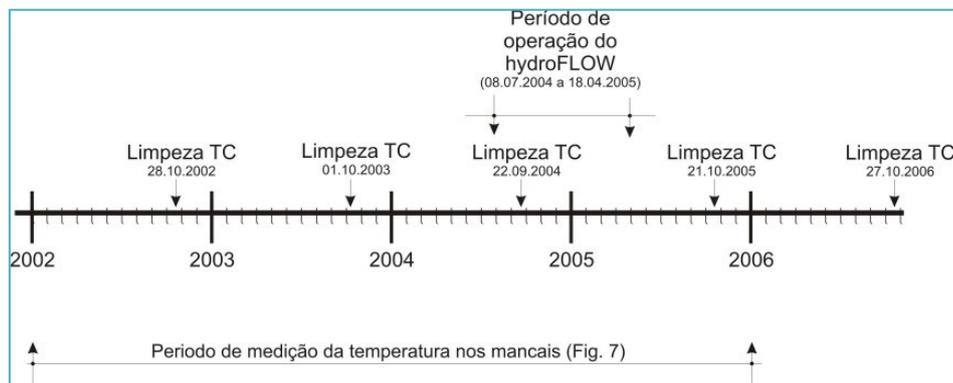


Figura 24 - Caracterização dos eventos

Eventos que caracterizaram o estudo preliminar desenvolvido pela equipe da Light para avaliar o efeito do campo elétrico induzido pelo dispositivo *antifouling*

Em consonância aos eventos caracterizados na Figura 24, a Figura 25 ilustra as temperaturas medidas (por meio de termopares acoplados a instrumentos analógicos) diretamente nos cinco mancais de escora do eixo da Turbina associada à Unidade Hidrogeradora #A. A construção dessa figura 25 se deu com o objetivo de estudar os condicionantes do sistema original (manual) de medição então instalado na usina desde a sua construção. Os dados mostrados foram processados com base nos históricos de leituras realizadas por operadores da Light no período de julho de 2004 a abril de 2005, período que coincide com o estudo

preliminar realizado pela equipe de manutenção para investigar o efeito do Dispositivo *antifouling* no escoamento do circuito de refrigeração.

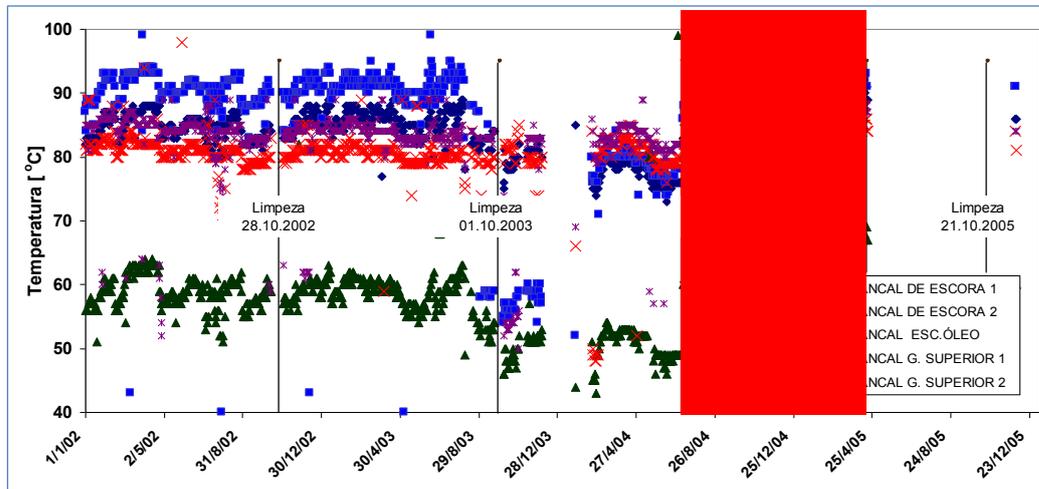


Figura 25 - Registro evolutivo das temperaturas medidas

Temperaturas medidas diretamente nos mancais de escora da Unidade Hidrogeradora A, na ausência e na presença do dispositivo *antifouling* (o gráfico ilustra também as datas de limpeza dos trocadores de calor tipo placas)

A análise desses dados preliminares permitiram as seguintes observações:

- Dispersão dos dados - As leituras dos instrumentos analógicos apresentaram grande dispersão (da ordem de 10%) comprometendo uma análise conclusiva do real impacto causado pelo dispositivo *antifouling* que visa expor o escoamento a um campo elétrico visando reduzir o indesejável fenômeno da incrustação.
- Incoerências identificadas resultantes do sistema analógico de medição utilizado - Os dados da Figura 25 sinalizam uma queda de temperatura da ordem de 30°C na temperatura do mancal de Escora #2 após a limpeza dos trocadores de calor realizada em 01/10/2003, seguida de um rápido acréscimo das temperaturas de todos os mancais independentemente do sistema Dispositivo *antifouling* ter entrado em operação e outras limpezas terem ocorrido. A análise desses dados preliminares (coletados com base em um sistema de coleta de dados via observação pelo operador) coloca em dúvida qualquer conclusão sobre a eficácia do Dispositivo *antifouling* como retardador do indesejável processo de incrustações.

Embora não conclusivos esses dados foram de vital importância para se projetar o sistema de medição desenvolvido e instalado cujos dados são reportados e analisados na seção a seguir apresentada. Os dados preliminares analisados justificaram a implementação do novo sistema automatizado de medição digital

introduzido, mais eficiente, capaz de captar eventos em tempo real e com maior exatidão.

Assim, com base na investigação preliminar de caráter qualitativa empreendida pela equipe de operação da usina Fontes Nova, foi suscitada a possibilidade de ganhos de eficácia induzidos pelo uso do sistema dispositivo *antifouling* muito embora os dados posteriormente processados (figura 25) não explicitar tais ganhos. Propondo um estudo mais elaborado, a possibilidade de se utilizar o dispositivo *antifouling* que induz um campo elétrico foi considerada como alternativa tecnológica que merece ser investigada visando reduzir o problema das incrustações que sistematicamente conduzem às indesejáveis e onerosas paradas para manutenção. Assim, com base nas evidências suscitadas pelo estudo preliminar, recomendações foram feitas para que um estudo mais detalhado fosse elaborado com base num sistema de medição em tempo real. Estudo esse com a finalidade de investigar os efeitos da exposição do escoamento à ação de um campo elétrico como estratégia de redução de incrustações. Os resultados da investigação conduzida são discutidos na seção a seguir. Conforme evidenciado na Figura 25, o sistema manual de medição anteriormente utilizado apresenta grande espalhamento dos dados (originalmente obtido com base em leituras visuais de manômetros e termômetros instalados nos circuitos de óleo e de água dos referidos trocadores de calor). Espalhamentos esses esperados tendo em vista que os registros manuais periódicos das observações visuais dos instrumentos instalados resultavam de leituras visuais que são típicas de sistemas analógicos de medição com baixa frequência de resposta. O novo sistema de medição planejado prevê automatização da coleta de dados para permitir grandes massas de dados (medição a cada dois minutos), portanto, capazes de produzir médias diárias estáveis. O resultado do estudo propriamente dito é discutido nas seções subsequentes desta dissertação.

4.5.

Fundamentos da hidrodinâmica e da transferência de calor

O presente subitem apresenta o marco teórico e as bases conceituais necessárias ao encaminhamento dos estudos hidrodinâmico e térmico

desenvolvidos para se avaliar a eficácia do efeito da exposição do escoamento da água de refrigeração ao campo elétrico induzido pelo Dispositivo *antifouling*.

4.5.1.

As bases para a avaliação hidrodinâmica do trocador de calor

O parâmetro crítico que define o regime do escoamento é o Número de Reynolds² (Re), definido em função de parâmetros que caracterizam as forças de inércia e as forças viscosas associadas ao escoamento:

$$Re = \frac{G \cdot D_H}{\mu} = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (4)$$

Nessa expressão, ρ é massa específica do fluido; “V” a sua velocidade ($G=\rho V$); “ D_H ” o diâmetro hidráulico (ou diâmetro para seções circulares) e μ a viscosidade do fluido.

A Figura 26 (extraída da literatura clássica de Mecânica dos Fluidos Incoprera, 2003) ilustra, para regime crescente de escoamento, a forma de variação do fator de atrito necessário ao cálculo da perda de carga em dutos. Conforme evidenciado, o valor do coeficiente de atrito tende a um valor constante para elevados regimes de escoamento, passando a depender tão somente do valor da rugosidade E/D.

² O Regime do escoamento é caracterizado pelo Número de Reynolds, que representa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas que atuam no escoamento.

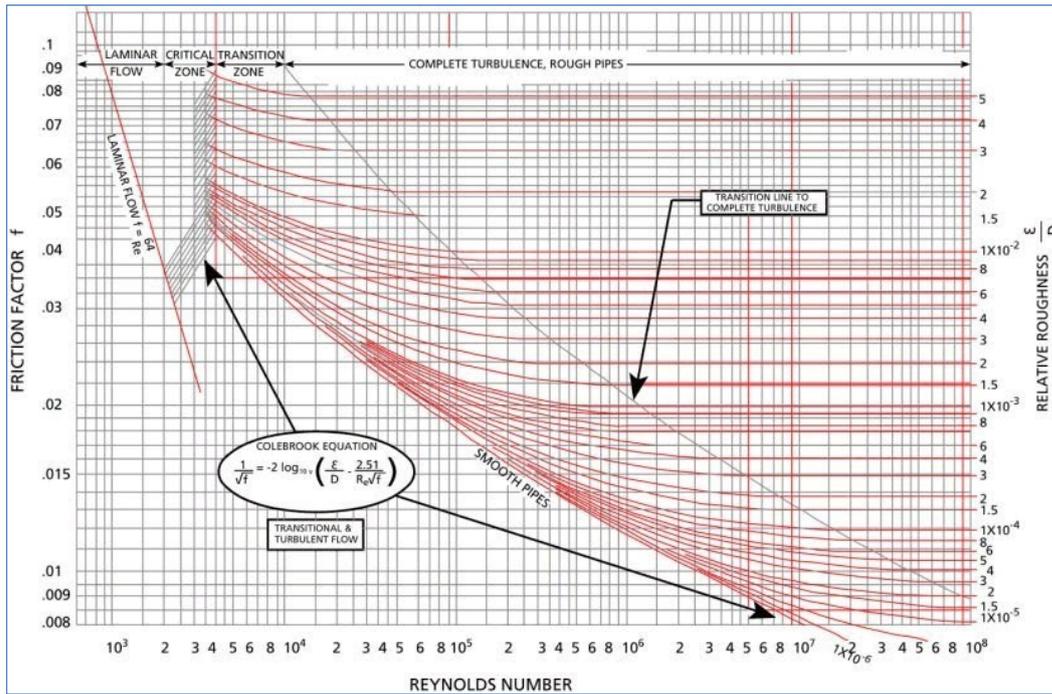


Figura 26 - Variação do fator de atrito (f) em dutos

A variação do fator de atrito é para diferentes regimes de escoamento e diferentes graus de rugosidade (dependente da incrustação). Fonte: Incropera (2003)

A exemplo dos dados para o fator de atrito mostrados na Figura 26 (aplicáveis a escoamento em dutos), a Figura 27 ilustra a variação do fator de atrito para o caso de passagens entre placas planas. Variações dessas figuras existem dependendo das características das placas e da rugosidade.

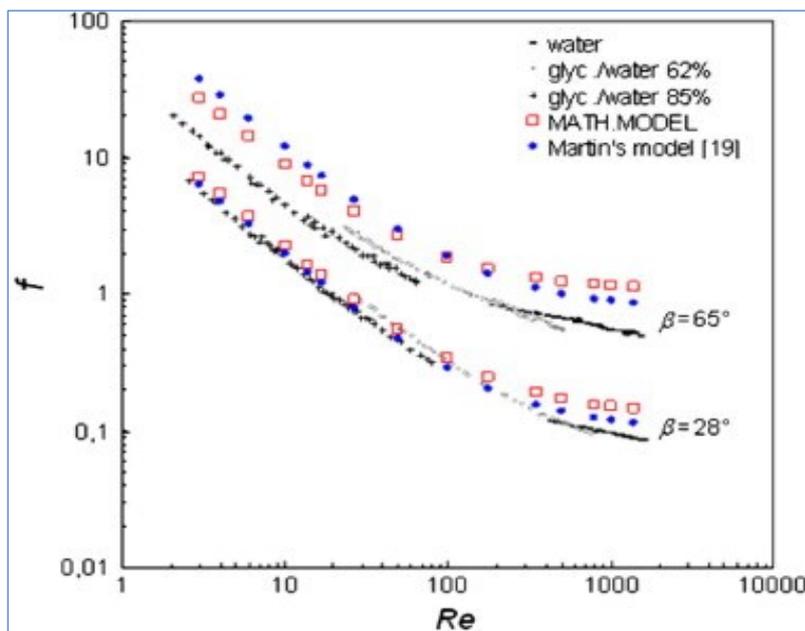


Figura 27 - Variação do fator de atrito (f) em escoamento entre placas planas

Fonte: (Martin, 1988)

Para o escoamento estudado, estima-se que o regime de escoamento é da ordem de $Re \approx 4000$, faixa em que se verifica (na Figura 27) um valor constante do fator de atrito.

Trabalhando as expressões da perda de carga, a definição de diâmetro hidráulico, a definição do número de Reynolds e a expressão da vazão:

$$\Delta P = f \frac{L}{D_H} \frac{G^2}{2\rho} \quad D_H = \frac{4 \cdot Vol}{A_{molhada}} \quad (5)$$

É possível mostrar que, na ausência de incrustações, a seguinte expressão se aplica:

$$\frac{\Delta P}{\dot{m}^2} = f \frac{L}{2\rho A^2 D} \quad (6)$$

Conforme mostrado em publicação da qual o autor participou (Frota et al., 2013), a equação (6) pode ser reescrita na forma proposta por Kakac (1998):

$$\frac{\Delta P}{\dot{m}^2} = \left(\frac{2f(L+D_p)P}{N^2 b^2 w^2 \rho_m D_e} \right) + 1.4 \left(P \frac{8}{\pi^2 D_p^4 \rho_m} \right) \quad (7)$$

Esta é a expressão básica que será utilizada para balizar a análise hidrodinâmica do escoamento na presença e na ausência do efeito da ação do Dispositivo *antifouling*. A expressão mostra que a razão do quociente entre a queda de pressão medida no bocal e o quadrado da vazão da água de resfriamento deve permanecer constante na ausência de incrustação.

4.5.2. As bases para a avaliação térmica do acoplamento água-óleo

Conhecendo os valores das diferenças extremas de temperatura (água e óleo) que ocorrem em um trocador de calor e o valor da vazão mássica pelo lado da água, é possível medir a taxa de transferência de calor (potência de refrigeração) pelo lado da água. Esse valor é igual (pela Primeira Lei da

Termodinâmica) àquele calculado pelo lado do óleo. Assim, fazendo uso de qualquer uma das expressões:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{água}} \cdot c p_{\text{água}} \cdot (T_{as} - T_{ae}) = \dot{m}_{\text{água}} \cdot c p_{\text{água}} \cdot \Delta T_1 \quad (8)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{óleo}} \cdot c p_{\text{óleo}} \cdot (T_{oe} - T_{os}) \quad (9)$$

O *Coefficiente global de transferência de calor* (U, expresso em KW/m²K) é calculado na interface fluida água-óleo, que separa os fluidos de trabalho do trocador. O seu cálculo se dá com base nos parâmetros hidrodinâmicos e térmicos definidos na equação 8, cujos dados de entrada resultaram de medições realizadas para os dois escoamentos estudados, na ausência e na presença do efeito induzido pelo dispositivo *antifouling*. Assim é possível escrever a seguinte expressão que contém o *Coefficiente global de transferência de calor* U:

$$\dot{Q} = (UA) \cdot \frac{(T_{oe} - T_{as}) - (T_{os} - T_{ae})}{\ln\left(\frac{T_{oe} - T_{as}}{T_{os} - T_{ae}}\right)} \quad (10)$$

Com base nos dados medidos, que constituem inputs da equação 10 acima, é possível calcular o coeficiente global de transferência de calor (U), coeficiente esse que governa o mecanismo global de transferência de calor na interface óleo-água do trocador de calor estudado. Para ambas as situações estudadas, é possível calcular este coeficiente global de transferência de calor.

Por representar um conceito energético, a avaliação da efetividade do trocador de calor água-óleo (kW/kW) apresenta-se como alternativa atraente para análises dessa natureza. A figura 28 estabelece a base para a análise da efetividade de um trocador calor. Nessa figura são mostrados como variam as temperaturas dos chamados “fluido quente” (T_q) e do “fluido frio” (T_f) de um trocador de calor operando em contracorrente. Os subscritos “e” e “s” denotam as condições de entrada e de saída desses fluidos no trocador de calor.

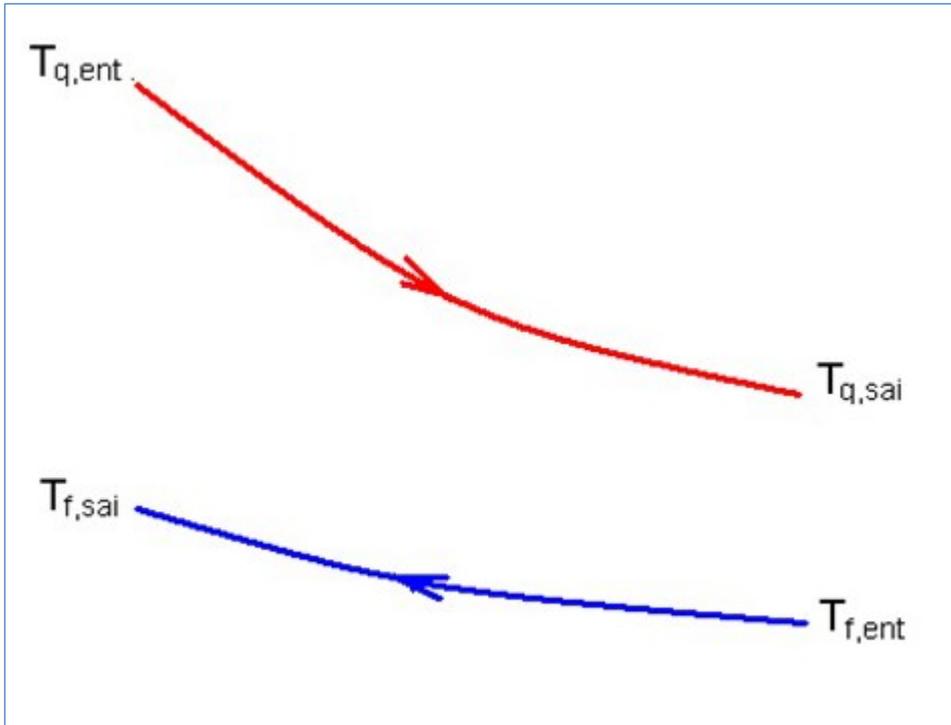


Figura 28 - Distribuições de temperaturas do “fluido quente” e do “fluido frio”

Por definição a efetividade do trocador de calor (Kays & London, 1964) é dada pela razão entre a taxa de transferência de calor real e a taxa de transferência de calor máxima possível que poderia ocorrer em situações ideais (e.g.: trocador com comprimento infinito):

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (11)$$

A taxa de transferência de calor real é dada por:

$$q = C_q(T_{q,ent} - T_{q,sai}) = C_f(T_{f,sai} - T_{f,ent}) \quad (12)$$

Combinado essas equações, é possível escrever a equação para o cálculo da efetividade do trocador de calor como sendo:

$$\varepsilon = \frac{C_q(T_{q,ent} - T_{q,sai})}{C_{\min}(T_{q,ent} - T_{f,ent})} = \frac{C_f(T_{f,sai} - T_{f,ent})}{C_{\min}(T_{q,ent} - T_{f,ent})} \quad (13)$$

Nessa equação, C_{\min} é igual à menor capacidade calorífica entre C_q e C_f , calculadas com base nas temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio, que são

conhecidas e mensuráveis pelo sistema de medição instalado. A capacidade calorífica resulta do produto da vazão pelo valor do calor específico; i.e.:

$$(C = \dot{m} \cdot c_p) \quad (14)$$

Dos dados coletados nos ciclos de medição com e sem o efeito do Dispositivo *antifouling*, o “fluido quente” é o óleo enquanto o “fluido frio” a água. Considerando que o valor de C_{min} corresponde ao fluido quente, isto é ao óleo, tem-se que:

$$C_{min} = C_{\text{óleo}} \quad (15)$$

Da Figura 28 pode-se observar que a relação $C_{\text{óleo}}/C_{\text{água}}$ assume um valor menor que 1.

$$\frac{C_{\text{óleo}}}{C_{\text{água}}} = \frac{T_{as} - T_{ae}}{T_{oe} - T_{os}} = \frac{\Delta T_a}{\Delta T_1 - \Delta T_2 + \Delta T_a} \quad (16)$$

Fazendo uso dessa relação, a efetividade do trocador de calor pode ser escrita pela equação (17):

$$\varepsilon = \frac{C_q(T_{q,ent} - T_{q,sai})}{C_q(T_{q,ent} - T_{f,ent})} = \frac{T_{q,ent} - T_{q,sai}}{T_{q,ent} - T_{f,ent}} \quad (17)$$

Com base na notação empregada para caracterizar os fluidos quente e frio, obtém-se:

$$\varepsilon = \frac{T_{oe} - T_{os}}{T_{oe} - T_{ae}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2 + \Delta T_a}{\Delta T_1 + \Delta T_a} \quad (18)$$

A título de ilustração dos mecanismos de transferência que ocorrem e que fundamentam a análise da efetividade do trocador de calor, a razão $C_{\text{óleo}}/C_{\text{água}}$ relaciona as capacidades caloríficas do óleo e da água no ciclo de medições realizadas.

Assim, a equação 18 será utilizada para calcular a efetividade dos trocadores de calor na presença e na ausência da ação do Dispositivo *antifouling* objeto de avaliação do presente P&D.

4.6.

Estudo do escoamento submetido ao efeito do campo elétrico

O dispositivo *antifouling* foi instalado na usina Fontes Nova, no circuito da água de refrigeração que alimenta os trocadores de calor (água-óleo) da unidade hidrogeradora #A da usina Fontes Nova.

Tendo em vista que somente uma investigação de natureza técnico-científica seria capaz de prover respostas mais positivas para o problema com vistas à proposição de uma sistemática eficaz de manutenção, a presente pesquisa foi estimulada para estudar o problema de forma estruturada.

Contando com o apoio da equipe de operação da usina Fontes Nova, planejou-se um estudo do sistema de trocadores de calor óleo-água que refrigera os mancais da turbina e o gerador a ela acoplado. Assim, este sistema de trocadores de calor foi instrumentado e consubstancia o estudo (quantitativo) desenvolvido. Como subsídio para inspeção futura, o equipamento dispositivo *antifouling* instalado no sistema de trocadores de calor água-ar permitirá à Light avaliar qualitativamente a sua ação tão logo a unidade hidrogeradora #A seja submetida a uma parada de manutenção, quando o estado desses trocadores de calor poderão ser inspecionados para quantificar o grau da incrustação acumulada.

A Tabela 7 abaixo apresenta os valores estimados das vazões de água nos diferentes subsistemas que integram o sistema de resfriamento.

Tabela 7- valores estimados das vazões de água nos subsistemas

Consumo de água de refrigeração no	L/min	m ³ /hr
Mancal de carvão	400	24
Junta de carvão (vedação do eixo)	400	24
Trocadores de calor água-óleo	860	51,6
6 Trocadores trafos	2100	126
6 trocadores água-ar	3937	236,2
Consumos da subestação	não apurado	
Total	7697	461,8

Fonte: valores nominais retirados da planta do projeto original da usina Fontes Nova (valores aproximados)

4.6.1.

Caracterização dos três ciclos de medição (circuito água-óleo)

Com o propósito de fundamentar o estudo pretendido, três ciclos de medições foram realizados, um com o escoamento submetido à ação do efeito do campo elétrico e outro sem a exposição do escoamento à mencionada excitação externa. O início de ambos os ciclos refletem praticamente as mesmas condições de escoamento já que os trocadores de calor foram igualmente limpos e o sistema de medição foi calibrado novamente nas datas que caracterizam o início desses ciclos de estudo (Figura 25). O fato de essas condições de escoamentos não serem exatamente as mesmas deve-se basicamente a dois fatores que transcendem ao controle da equipe do projeto: (1) dificuldade de se manter o mesmo espaçamento entre as placas dos trocadores após o processo de limpeza sem evitar vazamentos e (2) diferenças (sazonais) das águas de alimentação durante os dois ciclos do estudo.

A Figura 29 caracteriza o histórico dos três ciclos de estudos realizados. Ou seja, a figura posiciona no tempo as medições realizadas em tempo real, os parâmetros dos trocadores de calor e os procedimentos de manutenção associados (remoção das incrustações) realizados no início e ao término de cada ciclo de medição. Para cada um desses ciclos de medição os bocais para medição de vazão foram igualmente limpos, muito embora tenha sido mostrado que o efeito do *fouling* no sistema de medição é praticamente inexistente para os períodos estudados. Conforme mostrado, os trocadores de calor sofreram manutenção (limpeza) em três datas críticas: no início e no término de cada ciclo de estudo. Em cada um desses momentos de parada para limpeza dos trocadores de calor, amostras de resíduos (incrustações) e água (do circuito de refrigeração) foram coletadas para análises química e biológica, cujos resultados (discutidos em relatórios anteriores) comprovaram a presença de micro-organismos na água (considerados os vilões do processo de formação de *biofouling*).

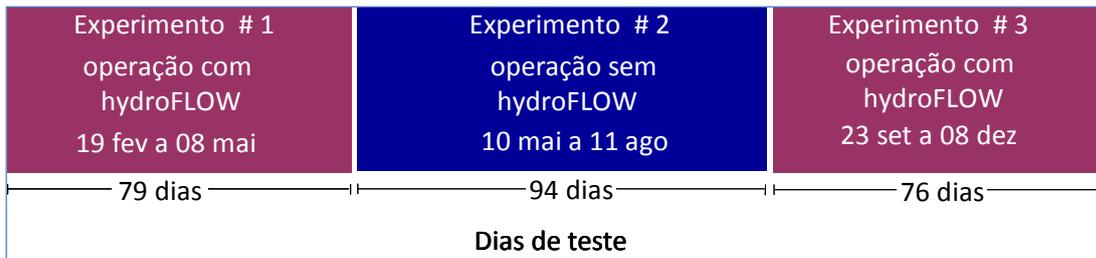


Figura 29 - Caracterização dos três ciclos de experimentos (medição de temperatura, pressão e vazão) na presença e na ausência do efeito do campo elétrico induzido pelo Dispositivo *antifouling*

A medição de vazão foi então calculada a partir da diferença de pressão diferencial medida a montante e a jusante do bocal ASME instalado no escoamento da água, fazendo uso de um transmissor de pressão diferencial *Honeywell* (4-20 mA). Os dados são registrados em um sistema de aquisição de dados DAQ com uma taxa de amostragem de 120 s, sendo os dados armazenados em um dispositivo removível de memória Flash.

Lembrando que do conjunto de três trocadores apenas dois funcionam (mantendo-se um terceiro como reserva), caracterizam-se, a seguir, os três ciclos experimentos realizados nas unidades A e B dos trocadores de calor acoplados à Unidade Hydrogeradora #A:

- **Estudo #1: Escoamento submetido ao efeito do dispositivo *antifouling*** - Entre 19 de fevereiro e 08 de maio, 2009 (79 dias), os trocadores de calor foram colocados em operação sob o efeito do campo elétrico induzido pelo dispositivo *antifouling* instalado na posição indicada na foto ao lado (local determinado pelo representante do dispositivo *antifouling*); ou seja, no circuito adjacente da água desviada para alimentação dos trocadores de calor água-ar (observar que para este ciclo de medição o dispositivo *antifouling* não foi instalado no circuito principal da água de resfriamento que alimenta os trocadores de calor água-óleo já que o fabricante afirma que o dispositivo *antifouling* possui amplo campo de ação).
- **Estudo #2: Escoamento na ausência do efeito do dispositivo *antifouling*** - No dia 08 de maio, via manobras de válvulas, o trocador de calor B foi isolado para limpeza (assim retornando à mesma situação em que se encontrava na data de 19 de fevereiro) e, dois dias depois, os trocadores de calor B e A (desta vez ambos instrumentados) voltaram a operar como sistemas de arrefecimento dos mancais da unidade hidrogeradora #A, porém sem o efeito do dispositivo *antifouling* que foi mantido desligado. Este experimento (que estuda o escoamento na ausência do campo elétrico; i.e.: dispositivo *antifouling* mantido



Estudo #1: Local de instalação do dispositivo *antifouling*

desligado) esteve em operação entre os dias 10 de maio a 11 de agosto de 2009 (94 dias de operação) quando os dados foram coletados para processamento, amostras de água e resíduos coletados para análise química e biológica e os trocadores de calor novamente submetidos a um processo de limpeza.

- **Estudo #3: Escoamento submetido ao efeito do dispositivo *antifouling* acoplado diretamente no ramal de alimentação** - Entre os dias 23 de setembro e 08 de dezembro (76 dias de operação) os trocadores de calor A e B foram novamente colocados em operação sob o efeito do campo elétrico induzido pelo dispositivo *antifouling* instalado, desta vez, no circuito em linha que alimenta os trocadores de calor, posição indicada na foto ao lado. Um cuidado adicional foi tomado neste ciclo #3 de medições de forma a assegurar que a condição de vazão medida no início do ciclo #3 fosse o mais próxima possível da vazão no início do ciclo #2 (na ausência do efeito do dispositivo *antifouling*). Este casamento de vazões deve-se à necessidade de comparar escoamentos similares na presença e na ausência do efeito do dispositivo *antifouling* já que a hidrodinâmica do escoamento fortemente impacta nas características térmicas do escoamento.



Estudo #3: Local de instalação do dispositivo *antifouling*

4.6.2.

Estudo do efeito do dispositivo *antifouling*

Referindo-se à Figura 20 que ilustra o esquemático das estações de medição em diferentes pontos do trocador de calor (água-óleo) e fazendo uso da nomenclatura caracterizada nessa figura, as seções subsequentes ilustram os resultados de duas comparações realizadas fazendo uso dos dados coletados nos três ciclos de medição. Com o propósito de avaliar o efeito da ação do dispositivo *antifouling* apresentam-se, a seguir, a **comparação #1** - comparação entre (i) os resultados do ciclo 1 de medição (na presença do efeito dispositivo *antifouling*) e ciclo 2 (na ausência do efeito dispositivo *antifouling*) e a **comparação #2** - comparação entre (i) os resultados do ciclo 2 de medição (na ausência do efeito dispositivo *antifouling*) e ciclo 3 (na presença do efeito dispositivo *antifouling*). Essas comparações envolvem medições de pressão e temperatura pelos lados da água (“fluido frio”) e do óleo (“fluido quente”) e medição de vazão da água de refrigeração. Com base nesses dados serão realizadas as avaliações hidrodinâmica e térmica do desempenho dos trocadores de calor (água-óleo) na presença e na

ausência da ação do dispositivo *antifouling*. Todas as medições (dados de entrada para os cálculos dos parâmetros hidrodinâmicos e térmicos) refletem medições realizadas pelo novo sistema de medição desenvolvido no âmbito do Projeto de P&D cujos resultados são aqui discutidos. Para facilitar a comparação, cada sequência de dados foi plotada a partir da mesma origem utilizada, assim facilitando a comparação.

4.6.2.1.

Comparação #1: dispositivo instalado no circuito adjacente

A Figura esquemática 30 caracteriza as datas dos ciclos de medição 1 (escoamento submetido ao efeito do dispositivo *antifouling*) e 2 (dispositivo *antifouling* mantido desligado) objeto da comparação pretendida; i.e.: os dados foram superpostos.

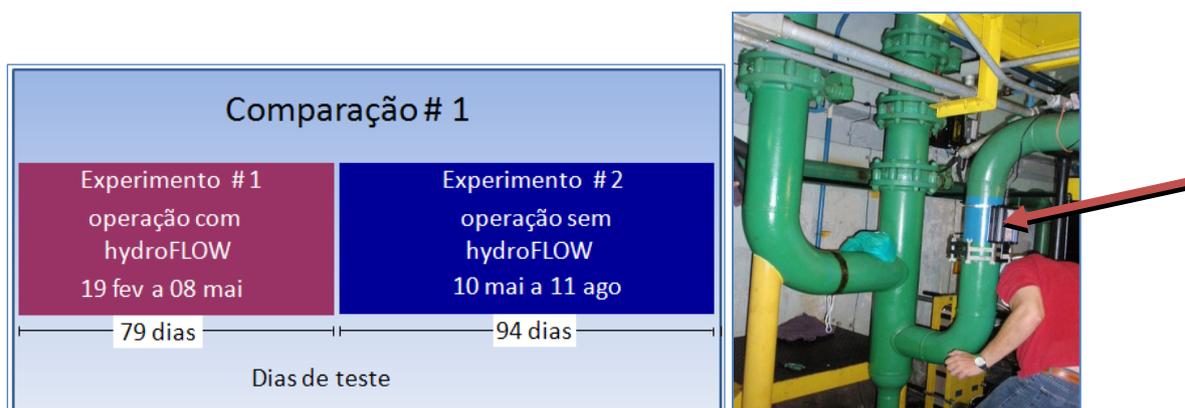


Figura 30 - Comparação entre as medições

Figura. 30a: comparação entre os experimentos 1 (sob a ação do dispositivo *antifouling*) e 2 (na ausência do efeito do dispositivo *antifouling*). Figura 30b: Posição do dispositivo *antifouling* no ciclo de medições #1

Antes de passar à análise da comparação #1 cabe observar que as condições iniciais do escoamento na presença e na ausência do dispositivo *antifouling* não partiram de um mesmo valor de vazão. A condição inicial do escoamento sob o efeito do dispositivo *antifouling* foi de 6,5 kg/s enquanto a condição inicial do escoamento na ausência do efeito induzido pelo dispositivo *antifouling* foi de 6,0 kg/s; i.e. 8,3% superior (as medições de vazão são mostradas na Figura 33). Esta diferença na condição inicial dos experimentos deve-se tão somente à diferença de espaçamento entre as placas dos trocadores para cada montagem realizada quando dos experimentos #1 e #2. Melhor explicando, para evitar vazamentos no trocador

de calor, não foi possível manter o mesmo espaçamento quando da montagem final do trocador de calor #B após os respectivos processos de limpeza que antecederam o início de cada experimento. Importante mencionar que esta foi uma das dificuldades experimentais vivenciadas durante a pesquisa. O ajuste final na montagem do Trocador de Calor mostrou-se crítica já que o espaçamento entre as placas define a área de passagem e, portanto, a vazão de fluido refrigerante que circula nos canais formados entre essas placas. A experiência mostrou que manter exatamente o mesmo espaçamento (*gap*) não é trivial uma vez que o “aperto” (ajuste) final de montagem das placas para evitar vazamentos é o parâmetro que determina o espaçamento final entre elas.

4.6.2.2.

Diferenças de temperatura medidas no acoplamento água-óleo

A Figura 31 ilustra a evolução das diferenças de temperatura da água ($T_{as}-T_{ae}$) e do óleo ($T_{oe}-T_{os}$) medidas no trocador de calor #B, para as condições de exposição e não exposição do escoamento ao efeito do campo elétrico induzido pelo dispositivo *antifouling*.

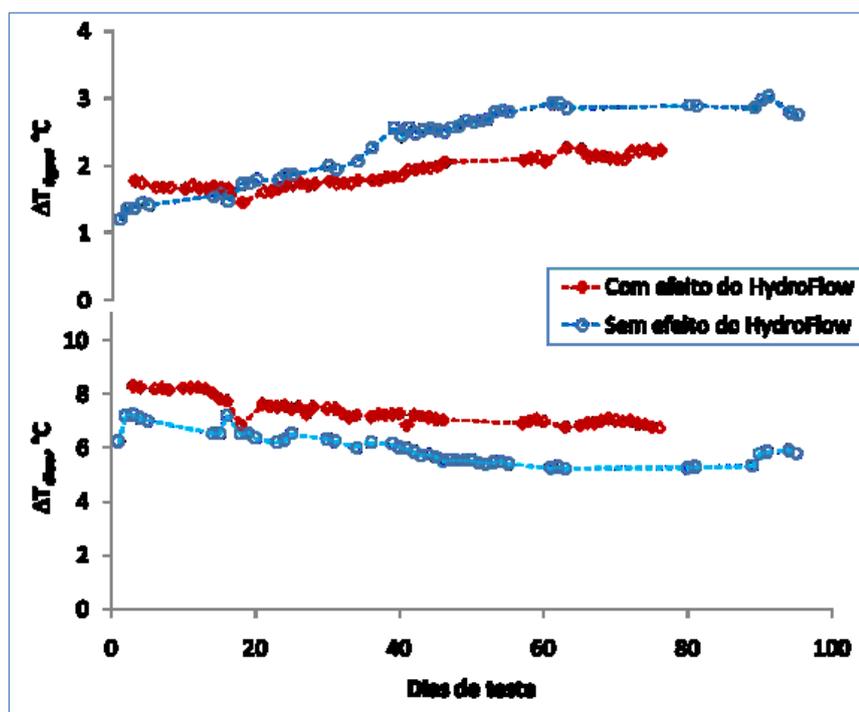


Figura 31 - Evolução das diferenças de temperatura da água e do óleo

Registro evolutivo das diferenças de temperatura da água (diferença medida entre a saída e a entrada) e do óleo (diferença entre a entrada e a saída) do trocador de calor. Medições realizadas na ausência e na presença do efeito do dispositivo *antifouling*

Para uma taxa de transferência de calor constante (o que será confirmado com base nas medições realizadas) essas diferenças de temperatura apresentam um comportamento esperado. Ou seja, por um lado cresce com o tempo a diferença de temperatura medida do lado da água de refrigeração (já que a vazão de água medida pelo bocal instalado decresce pelo aumento da incrustação no interior dos canais de passagem do trocador de calor). Ao contrário, decresce a diferença de temperatura medida do lado do óleo, já que a redução da temperatura do óleo (resfriado pela água) induz a um aumento da sua viscosidade (a viscosidade aumenta exponencialmente com o decréscimo da temperatura). Raciocínio esse que se sustenta no fato de a taxa de transferência de calor se manter constante (fato evidenciado pelos resultados que serão mostrados na Figura 33).

4.6.2.3. Medição da vazão da água de arrefecimento

A Figura 32 ilustra, para ambos os experimentos (na ausência e na presença da excitação elétrica imposta ao escoamento) os dados de vazão de água que circula no trocador de calor, vazão essa calculada a partir das medições de pressão diferencial realizadas pelo bocal sônico.

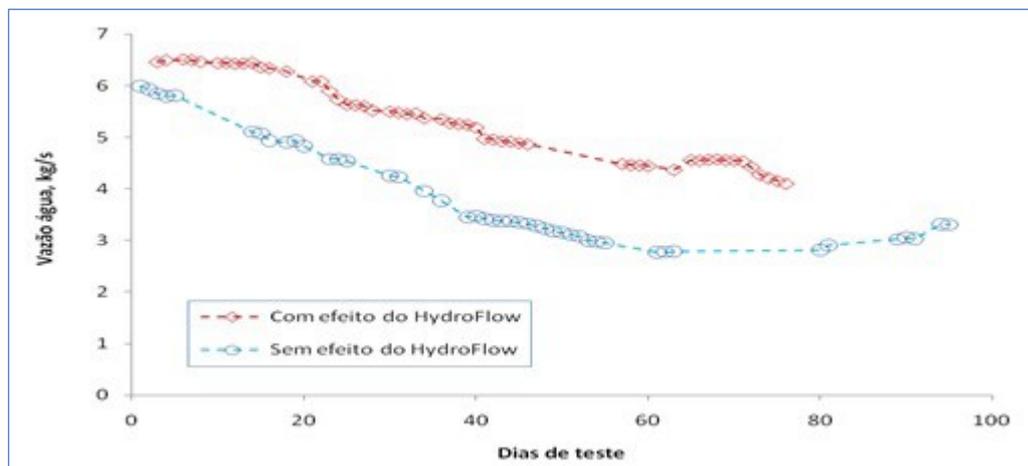


Figura 32 - Desempenho hidrodinâmico do trocador de calor #B

O trocador de calor B foi acoplado à unidade hidrogeradora #A: medições de vazão de água de resfriamento realizada pelo bocal sônico na ausência e na presença do dispositivo *antifouling*

Conforme mencionado e ilustrado na Figura 32, o experimento #1 conduzido no trocador de calor B (na presença do efeito induzido pelo dispositivo *antifouling*) parte de um valor de vazão de 6,5 kg/s enquanto o experimento #2

realizado no mesmo trocador de calor (cujo escoamento não foi exposto ao efeito do dispositivo antifouling) parte de um valor de vazão de 5,9 kg/s em função de diferenças nos espaçamentos mantidos entre as placas em cada experimento. Esses dados de vazão constam da Tabela 7 baixo.

Tabela 8 - Dados de vazão em função de diferenças entre as placas

Valores da vazão de água no início e no fim do ciclo de medições	Vazão mássica Trocador de Calor A kg/s (m ³ /h)	Vazão mássica Trocador de Calor B kg/s (m ³ /h)	Vazão mássica Total (A+B) kg/s (m ³ /h)
1. Início do ciclo de medições (Trocador de calor limpo) sem o efeito do Hydroflow	7.3 (26.28)	5.9 (21.24)	13.2 (47.52)
2. Final do ciclo de medições (Trocador de calor obstruído) sem o efeito do HydroFLOW	3.6 (12,96)	2.8 (10,08)	6.4 (23,04)
3. Início do ciclo de medições (Trocador de calor limpo) escoamento submetido ao efeito do HydroFLOW	---	6,5 (23,40)	---
4. Final do ciclo de medições (Trocador de calor obstruído) escoamento submetido ao efeito do HydroFLOW	4,8 (17,28)	4,1 (14,76)	8,9 (32,04)

Para efeito da comparação #1 serão apresentados apenas os dados referentes ao trocador de calor B (vazamentos no trocador de calor A impediram a medição confiável da vazão inicial, problema que foi sanado na comparação #2 que será mostrada a seguir. Conforme mencionado, o experimento submetido ao efeito do dispositivo *antifouling* foi realizado com um valor de vazão de água de cerca de 0,6 kg/s acima da vazão que caracterizou o início do escoamento na ausência do efeito dispositivo *antifouling*. Essa indesejável discrepância entre as condições iniciais cria assimetrias hidrodinâmicas nos dois escoamentos estudados, assimetrias essas que possuem impacto na avaliação térmica realizada. Entretanto, para os propósitos da conjectura sobre o efeito do dispositivo *antifouling* no mecanismo de incrustação (*biofouling*), a análise levou em conta não o valor da amplitude da vazão mas a sua derivada; i.e.: a inclinação da função vazão versus tempo (mostrado pelas linhas pontilhadas na Figura 32 que representam o “*best fit*” dos resultados experimentais). Conforme ilustrado pelos resultados da vazão medida na ausência e na presença do campo elétrico, exceto por alguns dados espúrios (ao final dos experimentos) que serão comentados em seção específica

deste relatório, é possível constatar que a vazão mássica de água decresce a uma taxa maior quando o dispositivo *antifouling* foi mantido desligado. Ou seja, a vazão decrescendo a uma taxa maior significa que o grau de incrustação é maior na ausência do efeito induzido pelo dispositivo *antifouling*. Resultado esse que, a despeito das dificuldades experimentais vivenciadas, permite concluir por um efeito benéfico do dispositivo *antifouling* como retardador do indesejável fenômeno de formação de incrustação nos dutos de passagem do trocador de calor.

4.6.2.4.

Taxa de transferência de calor do acoplamento água-óleo

Conhecendo os valores das diferenças de temperatura (água e óleo) mostradas na Figura 31 e o valor da vazão mássica pelo lado da água (Figura 32), é possível medir a taxa de transferência de calor (potência de refrigeração) pelo lado da água (igual, pela Primeira Lei da Termodinâmica, àquela pelo lado do óleo) fazendo uso da equação 8 ou da equação 9 anteriormente apresentadas.

A Figura 33 ilustra a potência de resfriamento calculada independentemente pelo lado da água e pelo lado do óleo. Valores esses que não se reproduzem tão somente pela já comentada discrepância entre as condições iniciais dos dois experimentos claramente ilustrada na Figura 34 resultantes de diferenças de vazão no início dos dois experimentos realizados (resultante da diferença dos espaçamentos entre as placas dos trocadores de calor) na presença e na ausência do efeito induzido pelo dispositivo *antifouling*.

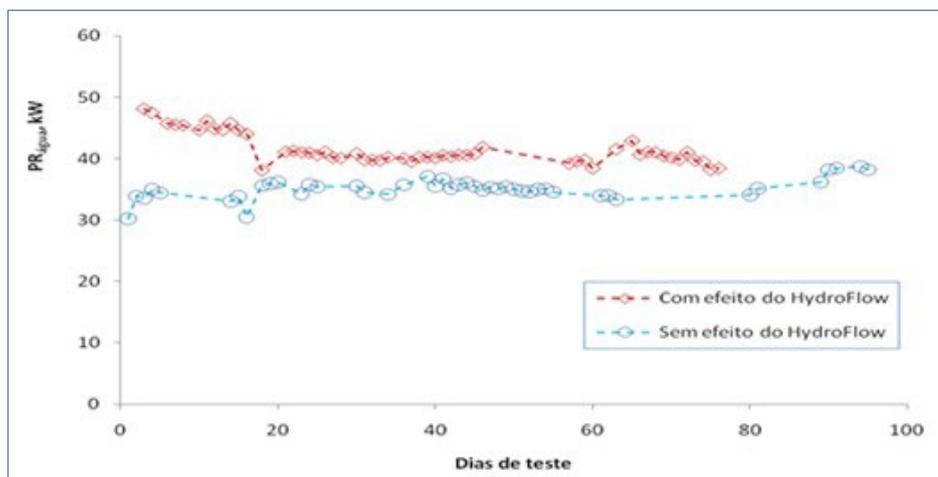


Figura 33 - Potência de resfriamento calculada
Potência de resfriamento (kW) da água de arrefecimento

4.6.2.5. Avaliação de desempenho térmico do trocador de calor

A avaliação térmica do trocador de calor B foi realizada segundo duas vertentes de análise, ambas realizadas quando o escoamento esteve submetido ou não ao efeito induzido pelo dispositivo antifouling, para a mesma condição hidrodinâmica imposta pela pressão extrema ($\Delta P_{\text{total}} = P_{\text{ea}} - P_{\text{sa}}$) medida entre os circuitos de entrada e de saída da água de resfriamento.

Com base nos dados medidos, que constituem inputs para a equação 10, é possível calcular o coeficiente global de transferência de calor (U), coeficiente esse que governa o mecanismo global de transferência de calor na interface óleo-água do trocador de calor B estudado. Para ambas as situações estudadas, a Figura 33 mostra a evolução desse coeficiente global de transferência de calor. Tendo em vista que o escoamento da água de resfriamento associado ao experimento #1 (mantido sob o efeito do campo elétrico) se deu com um valor de vazão de água superior àquela associada ao experimento #2 (na ausência do efeito do dispositivo antifouling), é temerário atribuir ao efeito elétrico induzido pelo HydroFLOW o aumento observado no coeficiente global de transferência de calor já que, sabidamente, a hidrodinâmica do escoamento impacta diretamente nos mecanismos de transferência de calor. Para ambos os casos, a diferença de pressão total (ΔP_{total}) medida entre os circuitos de entrada e de saída da água de resfriamento mantiveram-se praticamente inalteradas.

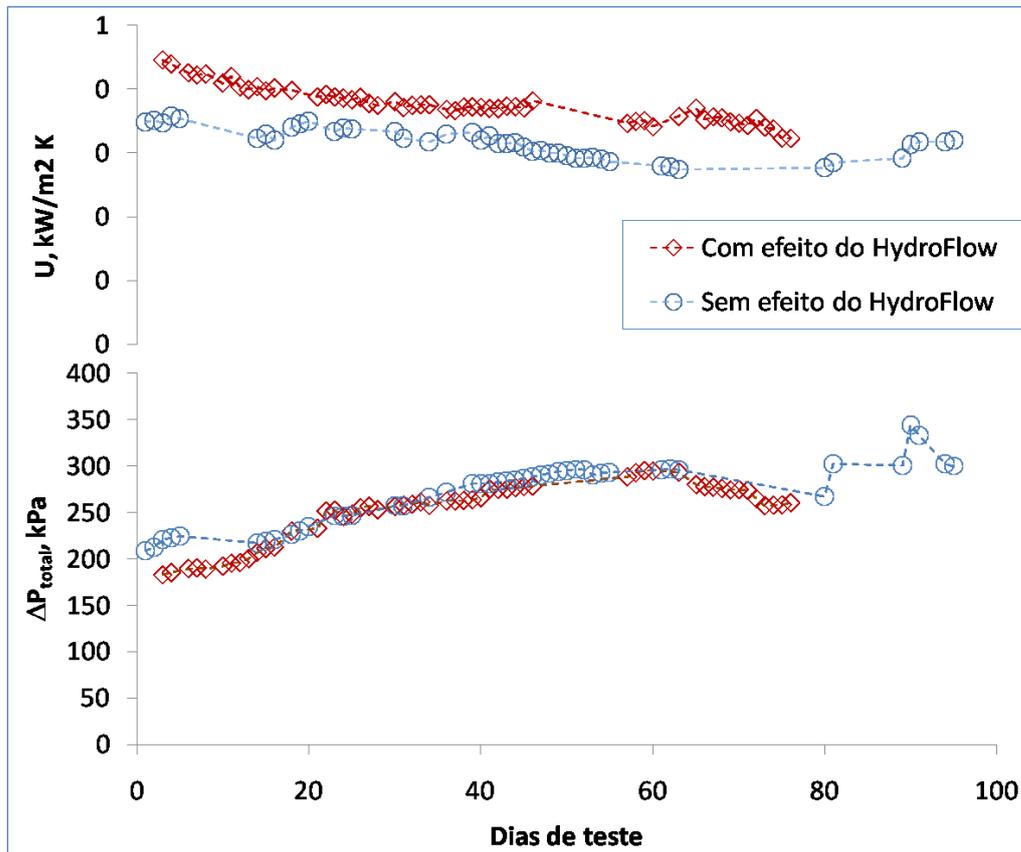


Figura 34 - Desempenho térmico
Efetividade do trocador de calor água-óleo (kW/m²K)

4.6.2.6. Avaliação térmica pela efetividade do trocador água-óleo

Por representar um conceito energético, a avaliação da efetividade (em inglês *effectiveness*) do trocador de calor água-óleo (kW/kW) apresenta-se como alternativa atraente para análises dessa natureza.

A figura 28 apresentada anteriormente (Fundamentos teóricos) estabelece a base para a análise da efetividade de um trocador calor. Nessa figura é ilustrada a variação das temperaturas dos chamados “fluido quente” (T_q) e “fluido frio” (T_f) de um trocador de calor operando em contracorrente. Os subscritos “e” e “s” denotam as condições de entrada e de saída desses fluidos no trocador de calor. Por definição, a efetividade do trocador de calor (Kays & London, 1964) é dada pela razão entre a taxa de transferência de calor real e a taxa de transferência de calor máxima possível que poderia ocorrer em situações ideais (e.g.: trocador com comprimento infinito), tal qual caracterizado pela equação 11 anteriormente apresentada. Assim, a taxa de transferência de calor real (dada pela equação 13) permite calcular a efetividade do trocador de calor (equações 17 e ou 18).

A título de ilustração dos mecanismos de transferência que ocorrem e que fundamentam a análise da efetividade do trocador de calor, a Figura 35 apresenta a razão $C_{\text{óleo}}/C_{\text{água}}$ que relaciona as capacidades caloríficas do óleo e da água no ciclo de medições realizadas. Tendo em vista que o propósito aqui é o de ilustrar esse mecanismo de transferência de energia, apenas são mostrados os dados na ausência do efeito induzido pelo dispositivo antifouling (embora disponíveis, dados similares na presença do dispositivo antifouling apenas sobrecarregariam a ilustração pretendida e, por esse motivo, foram omitidos).

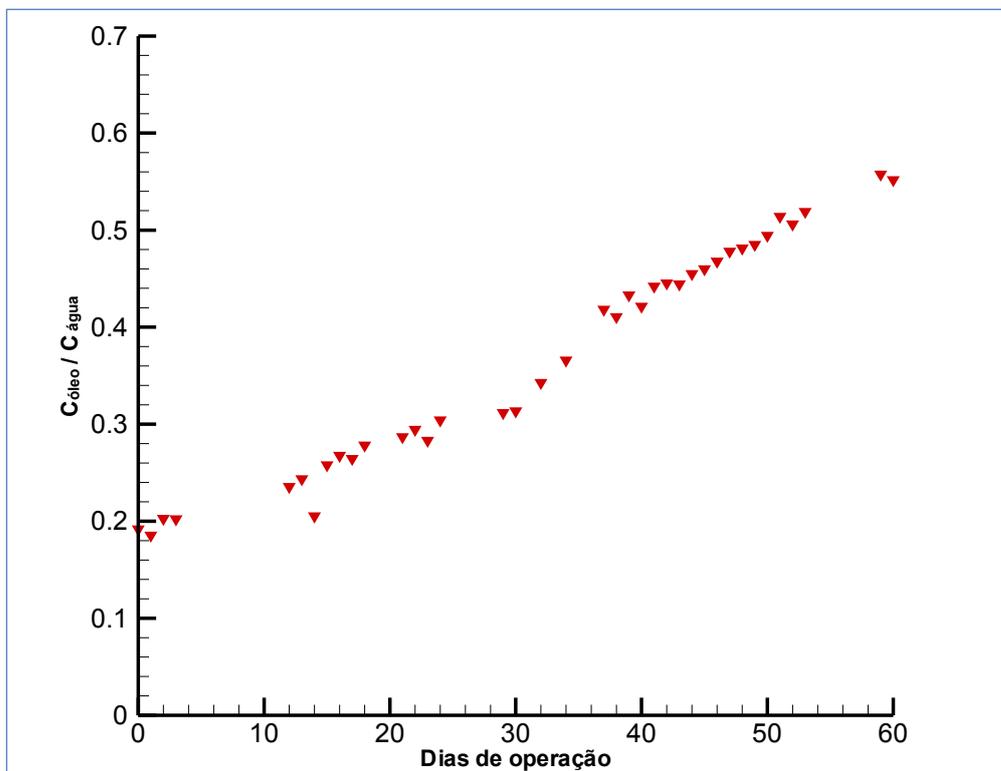


Figura 35 - Relação das capacidades caloríficas do óleo e da água

Ciclo de medições realizadas na ausência do efeito induzido pelo dispositivo *antifouling*

Similarmente, as Figuras 36 e 37 ilustram (i) a diferença de temperatura da água-óleo ao passar pelo trocador de calor e (ii) a vazão da água e óleo no trocador de calor B. Similarmente aos dados da Figura 31, apenas dados referentes ao escoamento na ausência do efeito do campo elétrico utilizado para excitar o escoamento são mostrados para não poluir a figura.

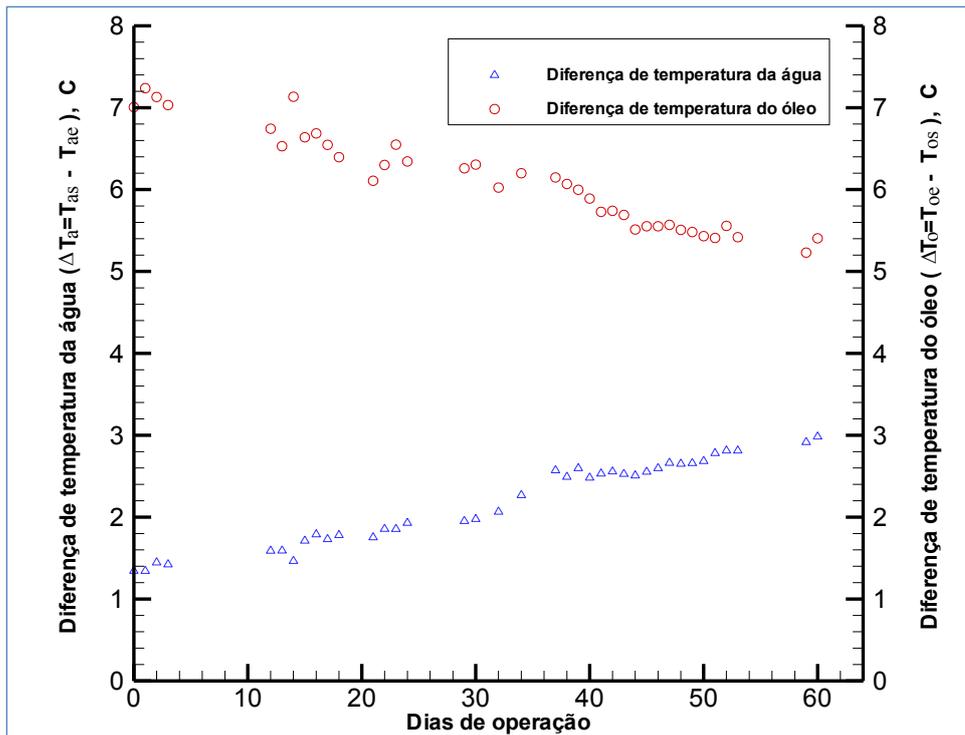


Figura 36 - Diferença de temperatura da água-óleo

Medição realizada ao passar pelo trocador de calor sem o dispositivo *antifouling*

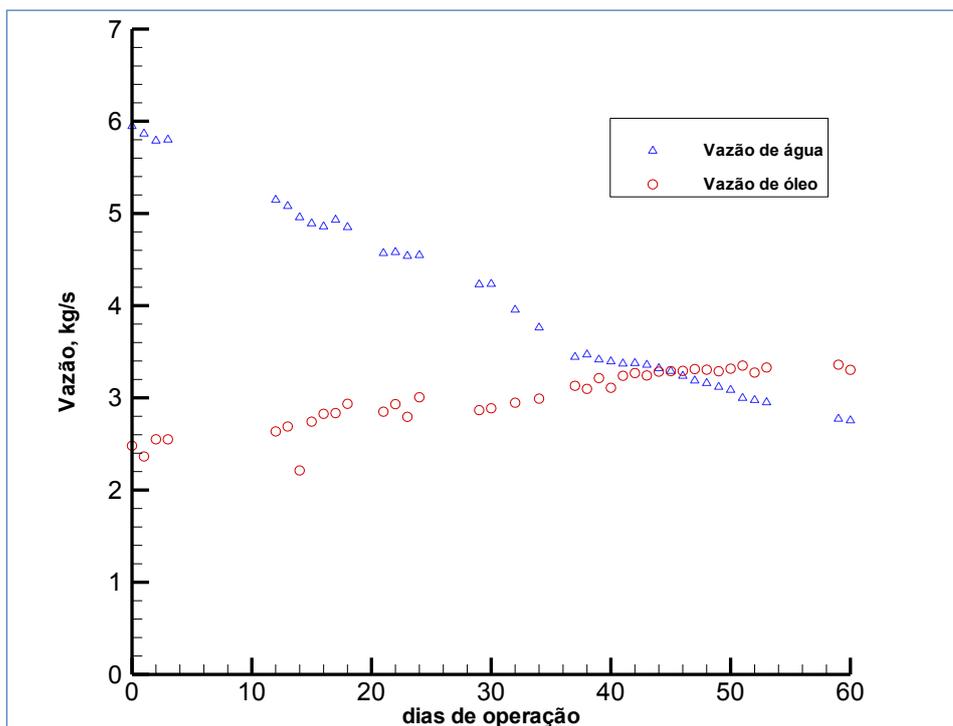


Figura 37 - Vazão da água e óleo no trocador de calor #B

Finalizando a análise da evolução da efetividade do trocador de calor B, realizada com base nos resultados das medições realizadas na ausência e na presença do efeito elétrico induzido pelo dispositivo *antifouling*, a Figura 38

apresenta a evolução da efetividade calculada do trocador de calor B estudado para ambos os experimentos realizados. Embora a tendência para ambos os casos seja de decréscimo da efetividade com o tempo (à medida que a incrustação aumenta), observa-se que a exposição do escoamento da água de resfriamento ao campo elétrico induzido pelo dispositivo *antifouling*, sistematicamente, apresenta um maior valor da efetividade. Embora tal comportamento induza à conclusão de que o dispositivo *antifouling* possua uma ação benéfica nos mecanismos de troca de calor que ocorrem no trocador de calor, é preciso ter em mente que não foi possível manter a mesma vazão da água de resfriamento em ambos os estudos e, tampouco, foi possível manter controle da origem das águas que abasteceram o anel do circuito de água de resfriamento. Conforme sabido, sazonalidades das águas e a diferença entre as águas da Represa de Lajes e de Vigário (originária do Rio Paraíba do Sul) podem impactar a análise.

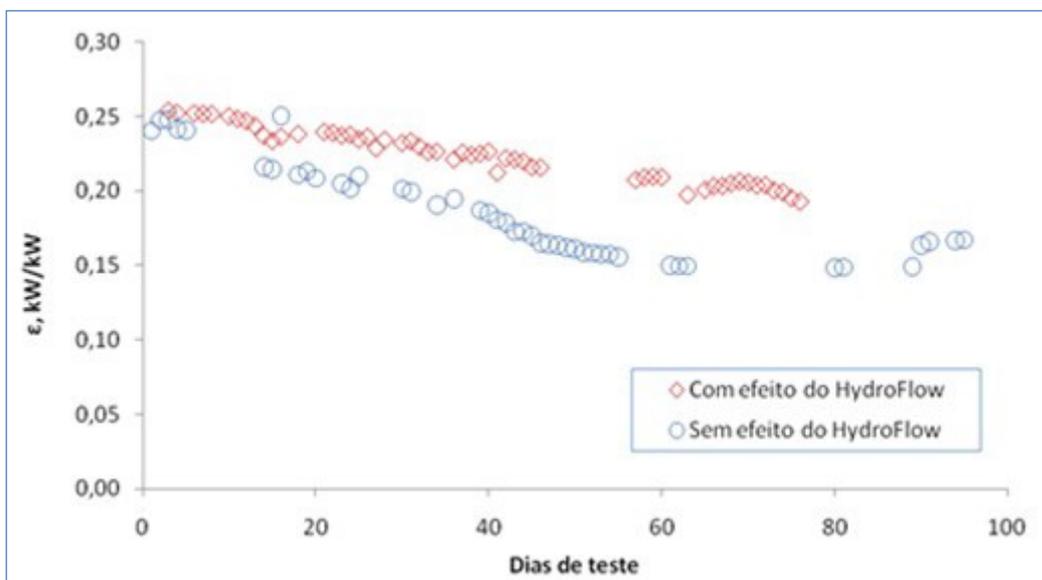


Figura 38 - Decréscimo da efetividade do trocador

Decréscimo devido ao aumento da incrustação para os casos na presença e na ausência do campo elétrico induzido pelo HydroFLOW

4.6.2.7.

Avaliação de desempenho hidrodinâmico do trocador de calor

Tomando por base os conceitos apresentados na seção 4.5 (Fundamentos da hidrodinâmica e da transferência de calor), cabe lembrar que o parâmetro crítico que define o regime do escoamento é o Número de Reynolds (Re). Conforme mostrado à luz dos fundamentos da mecânica do escoamento entre placas, a

equação 7 apresenta-se como um estratégico fator para avaliar o efeito da formação de incrustações no escoamento.

Esta equação mostra que a razão entre o quociente da queda de pressão medida no bocal e o quadrado da vazão da água de resfriamento deve permanecer constante na ausência de incrustação. O valor desse quociente foi, portanto, calculado para as ambas as condições de escoamento, na presença e na ausência da ação do dispositivo antifouling.

Os dados da Figura 39, calculados com base nas medições realizadas nos ciclos 1 (na presença do efeito do dispositivo antifouling) e 2 (na ausência do efeito do dispositivo antifouling) de medições permitem avaliar o impacto benéfico causado pelo dispositivo antifouling.

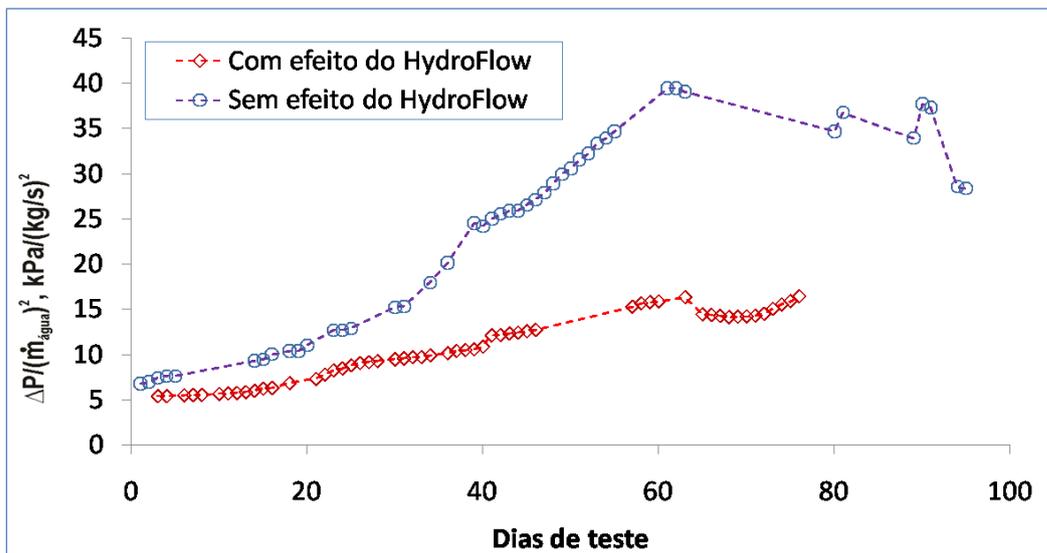


Figura 39 - Relação entre a queda de pressão ΔP e o quadrado da vazão (m^3/s)². Quociente esse que deveria se manter constante na ausência de incrustações

Tomando-se por base a condição essencialmente hidrodinâmica dada pela equação 7, os dados da figura 39 mostram que o quociente entre a queda de pressão ΔP e o quadrado da vazão é uma razão constante caso não existissem mecanismos de incrustação nas passagens internas do trocador de calor de placas verticais. Entretanto, isto não é o que verifica para o escoamento no interior dos trocadores de calor que apresentam incrustações, independentemente de o equipamento dispositivo antifouling indutor de um campo elétrico externo aplicado no escoamento. Os dados da figura 39 mostram, entretanto, que, não obstante o indesejável mecanismo de incrustação se fazer presente, o dispositivo

antifouling de fato retarda a sua formação (os símbolos em vermelho apresentam um menor desvio da horizontalidade do que os símbolos em azul).

Ao contrário do que deveria ser esperado na ausência de incrustações, os dados da figura 39 (construídos com base nos resultados das medições conduzidas na presença e na ausência do efeito HydroFLOW) mostram que o quociente entre a queda de pressão ΔP e o quadrado da vazão não se mantém constante. Dois fatores contribuem (na mesma direção) para o crescimento desse quociente (razão de parâmetros hidrodinâmicos). Ou seja, a incrustação acarreta não apenas o aumento da queda de pressão (numerador da razão) como também a diminuição da vazão (que aparece ao quadrado como denominador da razão). Ou seja, dois mecanismos que fortemente induzem à não constância da razão entre os parâmetros hidrodinâmicos mencionados. Assim, essa razão mostrou-se de interesse para “medir” o grau de incrustação nos dutos de passagem do trocador de calor. Conforme evidenciado, o efeito do HydroFLOW reduz o valor da razão; i.e.: a razão apresenta um desvio menor (pontos de medição na cor vermelha) em relação ao valor constante de referência que caracteriza a condição de ausência total de incrustação. Já os resultados mostrados pelos símbolos na cor azul mostram um afastamento maior da condição ideal (valor constante). Ou seja, os dados medidos na ausência do dispositivo *antifouling* parecem confirmar um grau mais elevado de incrustação. Evidência essa que permite concluir que ação do dispositivo *antifouling* atua como retardador do indesejável fenômeno da incrustação.

Não obstante as evidências fornecidas pela avaliação térmica que poderiam suscitar um efeito benéfico do HydroFLOW nos mecanismos de transferência de calor mas que não foram considerados pela dificuldade de se manter a mesma condição inicial (vazão da água de resfriamento) nos experimentos realizados na ausência e na presença do efeito do dispositivo *antifouling*, a análise puramente hidrodinâmica sustenta a mesma tese. Ou seja, o dispositivo *antifouling* de fato atua como um retardador dos indesejáveis mecanismos de transferência de calor. A natureza da incrustação enquadrada como *biofouling* constitui objeto de um relatório independente que discute os resultados das análises químicas e biológicas realizadas.

4.6.3.

Comparação #2: dispositivo instalado no circuito principal

A Figura 40 caracteriza a comparação #2 com base na qual são avaliados os dados das medições que caracterizam o experimento 2 (escoamento não exposto à ação do campo elétrico) em relação às medições que caracterizam o experimento 3 (escoamento exposto à ação do campo elétrico).



Figura 40 - Comparação entre as medições

Figura 40a: comparação entre os experimentos 2 (na ausência do efeito do HydroFLOW) e 3 (sob a ação do HydroFLOW). Figura 40b: posição do HydroFLOW no ciclo de medições #3

4.6.3.1.

Características dos experimentos

A Comparação #2 aqui discutida difere da Comparação #1 anteriormente apresentada em dois aspectos considerados essenciais:

- **Posicionamento do HydroFLOW** - ao contrário da Comparação #1 em que o dispositivo antifouling foi posicionado numa tubulação adjacente, na Comparação #2 o HydroFLOW foi reposicionado para a tubulação que diretamente alimenta os trocadores de calor tipo placas-verticais (ilustrado na Figura 40b, acima).
- **Equilíbrio da vazão para os testes com o trocador de calor B** - desta vez conseguiu-se um melhor balanceamento entre as vazões de início dos ciclos 2 de medições (na ausência do efeito do HydroFLOW) e do ciclo 3 de medições (na presença do efeito do dispositivo *antifouling*), o que foi conseguido pelo fechamento controlado (tarefa não trivial) dos trocadores de calor tipo placas verticais. Para o presente teste comparativo os ciclos 2 e 3 se iniciaram com as seguintes vazões de água: vazão inicial do ciclo 2: 5,9 kg/s; vazão inicial do ciclo 3: 6,1 kg/s (i.e.: cerca de 3% de diferença).
- **Teste incluindo o trocador de calor A** - resolvidos os problemas de vazamento anteriormente identificados no trocador de calor A, este foi igualmente instrumentado e monitorado durante o ciclo 3 de medições

(escoamento de água exposto à ação do dispositivo *antifouling*). Por limitações experimentais, entretanto, a vazão de água no início do ciclo 2 (escoamento mantido sem a ação do dispositivo *antifouling*) foi de 7,3 kg/s enquanto a vazão mais próxima conseguida para início do ciclo 3 de medições foi de 6,8 kg/s (i.e.: uma diferença superior a 7%). Muito embora não se tenha conseguido equilibrar as vazões de entrada, ao contrário do que ocorreu com a Comparação #1, no contexto da comparação #2 o escoamento na ausência do efeito do dispositivo *antifouling* teve início com uma vazão (7,2 kg/s) superior àquela conseguida no início (6,8 kg/s) do ciclo 3 de medições. Na impossibilidade de equilibrar as vazões para ambas as situações na ausência e na presença do efeito do dispositivo *antifouling*, esta inversão de vazões é favorável para não “mascarar” o estudo sobre o efeito da ação do dispositivo *antifouling* já que a hidrodinâmica do escoamento (que afeta os mecanismos de transferência de calor) desempenha um papel crítico em estudos comparativos desta natureza.

De forma compacta os resultados da comparação #2 são apresentados em três figuras que estabelecem a comparação entre os ciclos 2 e 3 de medições; i.e.: na ausência e na presença da ação do dispositivo *antifouling*. Para todos os casos estudados, a comparação é feita para ambos os trocadores de calor acoplados à unidade hidrogeradora #A, os trocadores de calor A e B.

4.6.3.2.

Efeito do campo magnético na vazão de água de resfriamento

A Figura 41 compara os valores de vazão. Para ambos os trocadores de calor observa-se que a ação do campo elétrico retarda a incrustação (o aumento da queda de vazão ao longo do tempo reflete uma maior taxa de incrustação). Ou seja, para ambos os trocadores de calor A e B, os símbolos em vermelho (que caracterizam as situações de escoamento sob o efeito do campo elétrico externo) mostram um decaimento sensivelmente atenuado quando comparado com o decaimento dos símbolos em azul (sem o efeito do dispositivo *antifouling*). Para o caso particular do trocador de calor A (símbolos cheios) cabe observar que a despeito do fato de a vazão no início do ciclo 2 (sem o efeito do dispositivo *antifouling*) ter sido 7,2 kg/s; i.e.: inferior à vazão de 6,8 kg/s para o caso em que o escoamento esteve submetido ao efeito do campo elétrico, ainda assim o decaimento da vazão foi nitidamente mais acentuado que aquele que ocorreu para o caso do escoamento exposto ao efeito do dispositivo *antifouling*.

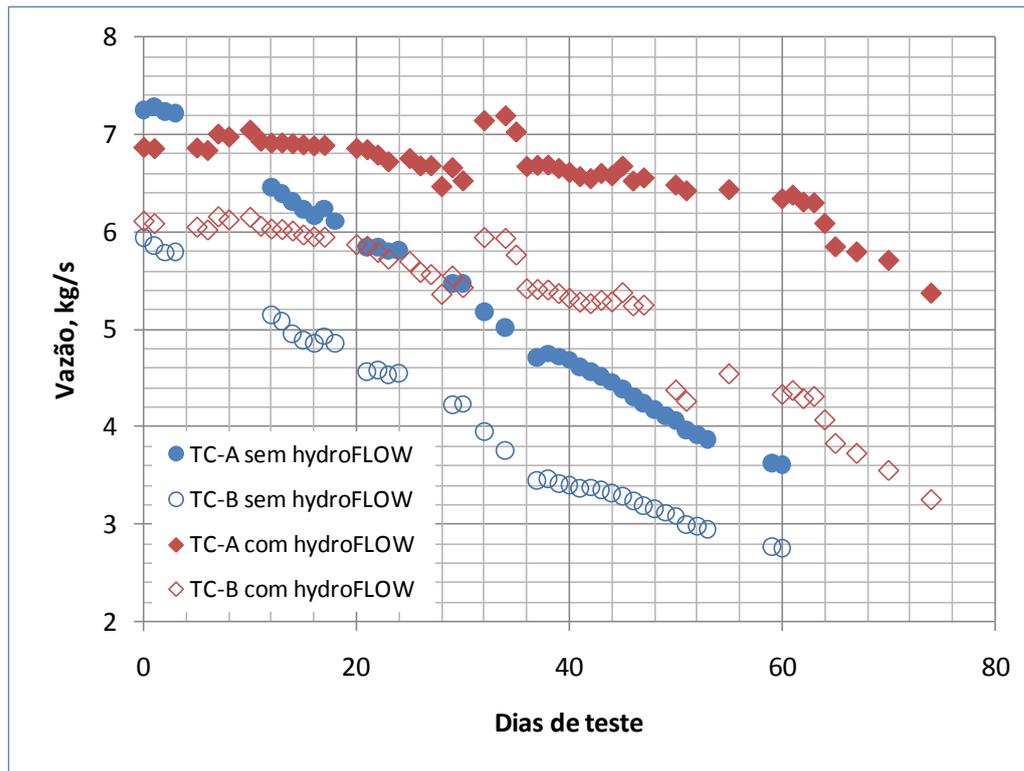


Figura 41 - Comparação dos valores de vazão

O trocador de calor #B foi acoplado à Unidade Hidrogeradora #A. As medições de vazão de água de resfriamento realizada pelo bocal sônico na ausência e na presença do HydroFLOW

Importante, entretanto comentar que ao final do ciclo 3 (cerca de 30 dias) observa-se um “saturamento” desse efeito benéfico do HydroFLOW. Após praticamente dois meses de operação percebe-se claramente uma mudança na tendência dos dados e a vazão, também para o caso do escoamento sob o efeito do dispositivo *antifouling*, apresenta maiores taxas de decaimento confirmando que o processo de incrustação foi acelerado.

4.6.3.3.

Efeito do campo elétrico na efetividade dos trocadores de calor

À luz dos preceitos teóricos apresentados na seção 4.5, a Figura 42 sintetiza a análise térmica realizada para avaliar o efeito do campo elétrico na efetividade (definida pela equação 17) dos trocadores de calor A e B. Da análise das tendências das curvas apresentadas (medições na presença e na ausência do campo elétrico), fica comprovado o efeito benéfico da ação do dispositivo antifouling já que a efetividade permanece praticamente constante enquanto o escoamento é exposto ao efeito do campo elétrico, decaindo na sua ausência.

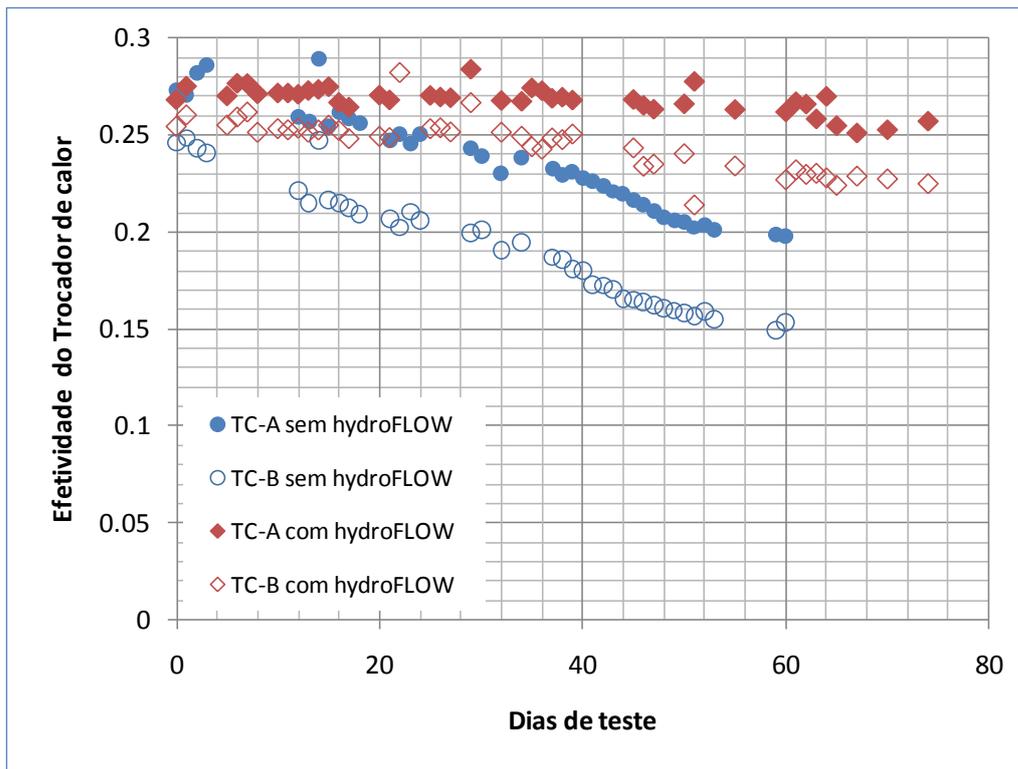


Figura 42 - Efeito da exposição do fluido de refrigeração a um campo elétrico

Efeito da exposição do escoamento da água ao campo elétrico. O campo elétrico controlou a efetividade dos trocadores de calor A e B acoplados à unidade hidrogeradora #A

Similarmente ao que foi observado no gráfico anterior referente às vazões, também para o caso da efetividade dos trocadores de calor percebe-se uma redução da eficácia da ação do campo elétrico. Esses dados de fato confirmam que a tecnologia de aplicação do campo elétrico contribui para a redução do mecanismo de formação de *fouling* embora não resolva o problema.

4.6.3.4.

Efeito do dispositivo antifouling na hidrodinâmica do escoamento

Finalmente, a Figura 43 resume a análise hidrodinâmica do efeito que resulta da aplicação do campo elétrico no quociente entre a queda de pressão no bocal e o quadrado da vazão de água.

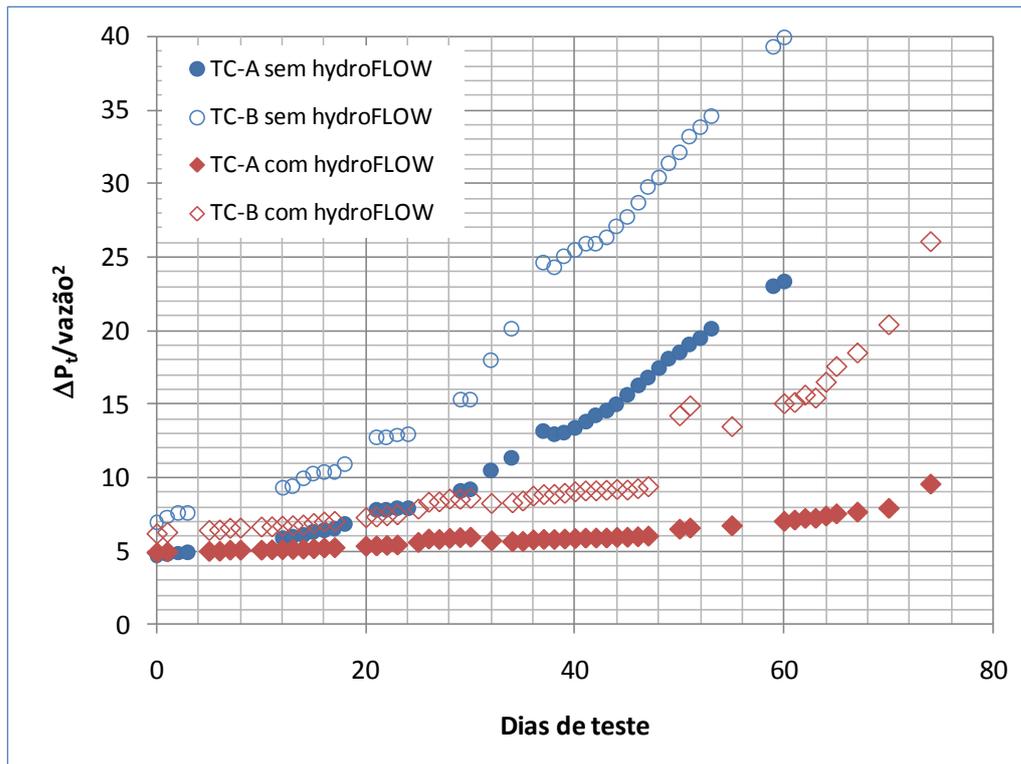


Figura 43 - Quociente entre a queda de pressão ΔP e o quadrado da vazão (m^2)
 (Quociente entre a queda de pressão e o quadrado da vazão da água de refrigeração.
 Quociente que deveria se manter constante na ausência de incrustações)

Quanto mais o valor deste quociente se desviar da horizontalidade, maior será o grau de incrustação. Conforme evidenciado pelos dados da figura 43, a condição de escoamento excitado pelo campo elétrico corresponde a uma condição de menor incrustação que aquela sem a ação do dispositivo *antifouling* testado.

4.7. Síntese dos resultados obtidos

A Figura 44 ilustra o esquema global da usina Fontes Nova mostrando o trocador de calor, objeto do processo de limpeza, exposto à ação do dispositivo *antifouling* instalado em duas posições: alinhado com o circuito principal da água de resfriamento (posição DEAF#1) e numa posição adjacente de um circuito paralelo (posição DEAF#2).

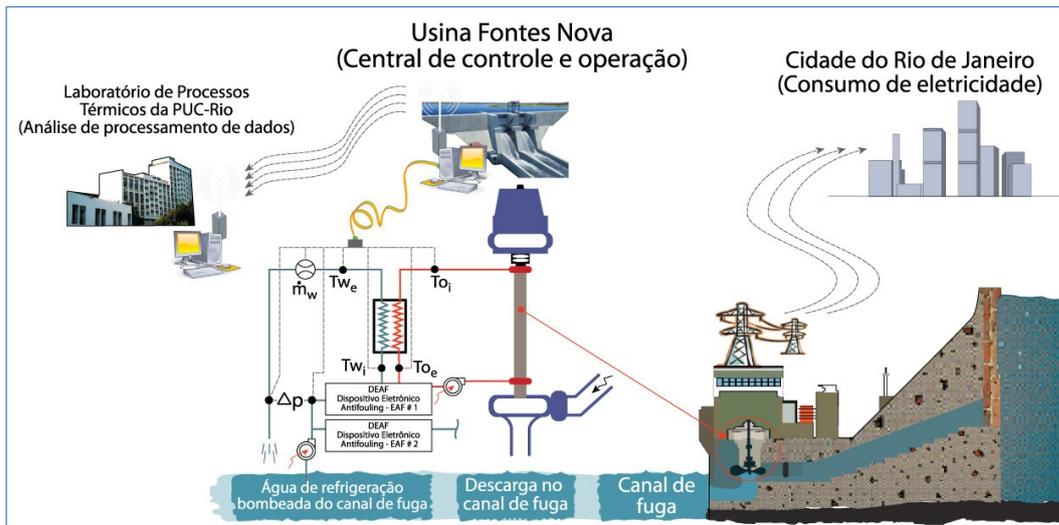


Figura 44 - Esquema ilustrativo da usina Fontes Nova

A Equação 7 apresenta a base teórica para a avaliação do dispositivo *antifouling* com base no critério hidrodinâmico adotado, que se baseia no quociente $\Delta P/\dot{m}^2$ medido num período de aproximadamente 60 dias em ambas as condições de operação: com e sem o efeito do dispositivo *antifouling* que expõe o escoamento a um campo elétrico externo tal qual ilustrado na Figura 44.

Os dados da Figura 45 ilustram os valores medidos de $\Delta P/\dot{m}^2$ normalizados nos valores correspondentes para uma condição de trocador de calor limpo (imediatamente o processo de limpeza mecânica).

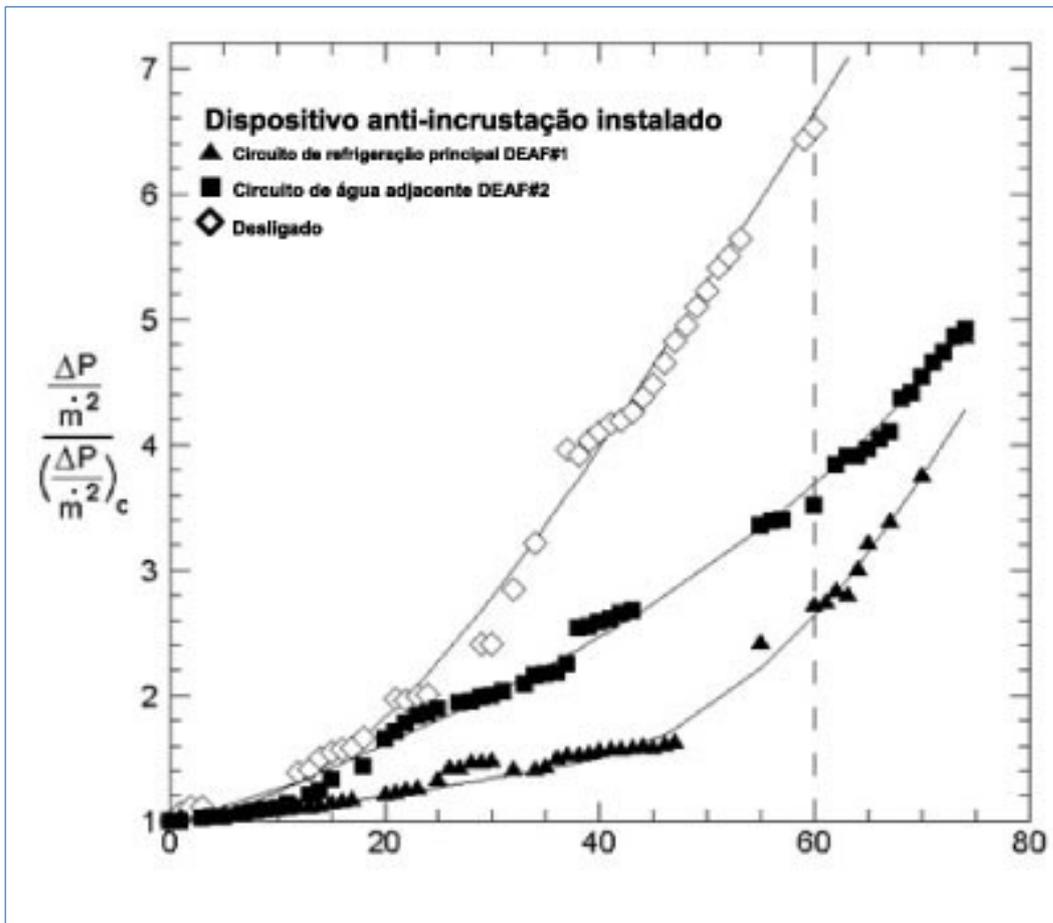


Figura 45 - Critério hidrodinâmico para avaliação do dispositivo *antifouling*

Os símbolos vazados denotam escoamento na ausência do campo elétrico, ou seja, dispositivo *antifouling* desligado. Dados representados pelos triângulos cheios (▲) representam a operação do sistema mantido sob o efeito do dispositivo *antifouling* na posição DEAF-1 (ver figura 44) enquanto os símbolos quadrados cheios (■) denotam experimentos com o dispositivo *antifouling* instalado na posição DEAF-2, i.e.: num circuito adjacente da água de resfriamento. Conforme pode ser observado pelos resultados mostrados na Figura 44, o *fouling* cresce rapidamente (símbolos) quando o dispositivo *antifouling* está desligado, assim desviando da condição de trocador limpo.

Em analogia ao circuito elétrico, $\Delta P / \dot{m}^2$ pode ser entendido como um tipo de índice que mede a *resistência hidrodinâmica da incrustação*. Devido a função quadrática que aparece no denominador da razão $\Delta P / \dot{m}^2$, este índice de incrustação é maximizado. Na ausência do efeito do campo elétrico, a *resistência hidrodinâmica da incrustação* cresce a uma taxa elevada e pode ser observada pelos resultados da figura 46, após o período de testes de 60 dias de operação do

trocador de calor na ausência do efeito do campo elétrico externo aplicado (dispositivo desligado), a *resistência hidrodinâmica da incrustação* atinge o valor 6,6. Para um período similar de operação, resultados mais favoráveis serão obtidos quando o dispositivo *antifouling* é acionado: o valor da *resistência hidrodinâmica da incrustação* reduz-se drasticamente para o valor 2,6 (dispositivo *antifouling* instalado no circuito primário de resfriamento, posição DEAF#1) e para 3,7 (dispositivo *antifouling* instalado no circuito adjacente, posição DEAF#2). Em outras palavras, o efeito do dispositivo é no sentido e de retardar qualquer operação de manutenção (limpeza).

Para um intervalo de confiança de 95%, a Tabela 9 resume as contribuições da incerteza de medição nos parâmetros secundários associados à medição da razão $\Delta P/\dot{m}^2$.

Tabela 9 – Incerteza da medição associada à razão $\Delta P/\dot{m}^2$

		Coeficiente de sensibilidade	Valor de sensibilidade, S	Incerteza, U_{95}	$(S \cdot U_{95})^2$
ΔP	Queda de pressão	1	1	0,1%	0,01
\dot{m}	Densidade do fluido	2	2	2%	16
Sum of squares $\sum(S \cdot U_{95})^2$					16,01
Square root of sum of squares $\sqrt{\sum(S \cdot U_{95})^2}$					4%

A Figura 46 ilustra a evolução do índice de resistência da incrustação (IF), definido com base nos valores da efetividade do trocador de calor nas condições incrustado e não incrustado, conforme definido por Jerónimo et al. (1997) pela Equação 19:

$$IF = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon}{\varepsilon_c - \varepsilon_f} \quad (19)$$

Nesta equação, $IF = 0$ denota a condição de trocador limpo (unfouled) enquanto $IF = 1$ a condição extrema de trocador incrustado no limite tolerável (i.e.: condição que coloca em risco a integridade do mancal por este atingir a temperatura máxima admissível; no caso da usina Fontes Nova: $T < 85 \text{ }^\circ\text{C}$).

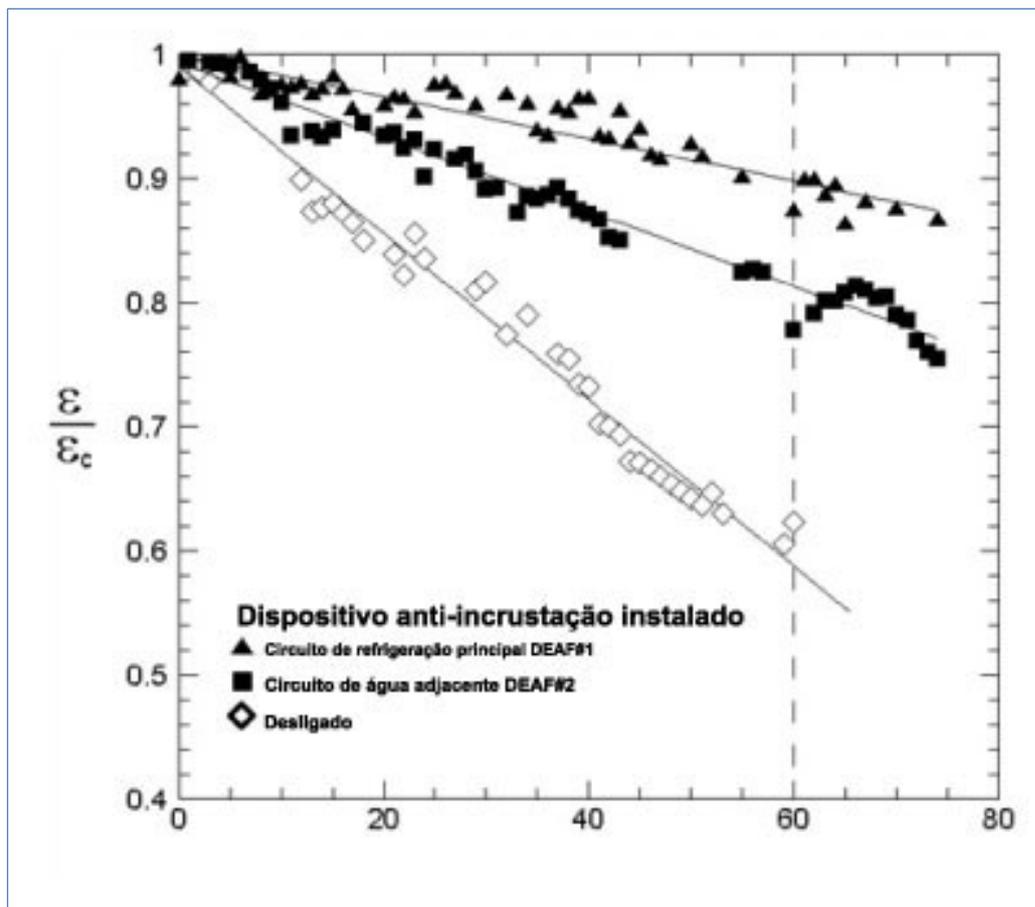


Figura 46 - Critério para avaliação térmica do dispositivo

Os dados da Figura 46 documentam a evolução da efetividade do trocador de calor em ambas as situações de operação, na ausência e na presença do campo elétrico. Com base nos valores calculados da efetividade foi possível calcular o índice IF de resistência ao *fouling* (definido à luz do critério térmico) mostrado na Figura 47, entendido como parâmetro-chave.

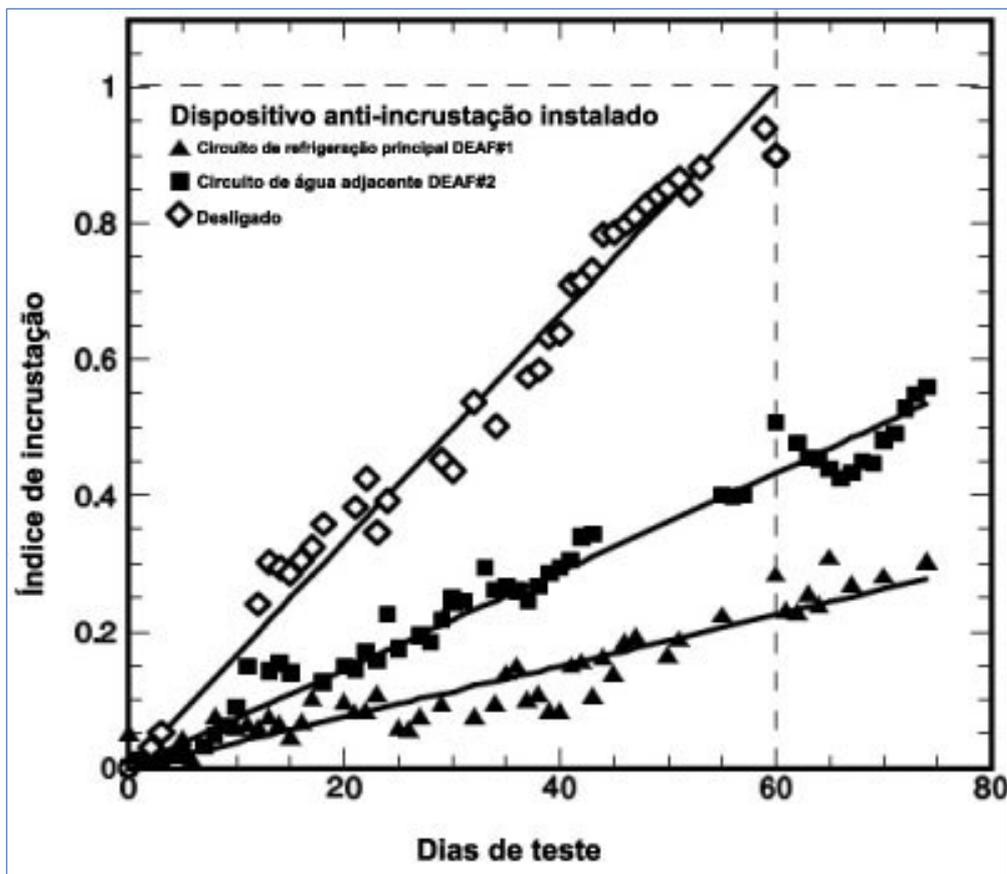


Figura 47 – Evolução da resistência ao *fouling*

A Figura 47 ilustra esses valores de IF para as condições de operação investigadas. Conforme esperado, este *index of fouling*, IF , calculado com base nos dados experimentais, exibem a mesma tendência que aquela exibida com base no critério hidrodinâmico. Nessa Figura, os símbolos abertos representam o escoamento da água de refrigeração na ausência do efeito do campo elétrico; já os símbolos em triângulos cheios denotam a condição de escoamento excitado com o dispositivo antifouling instalado na posição DEAF#1 (ver Figura 44). Similarmente, os símbolos em quadrado cheios representam a condição em que o dispositivo antifouling foi instalado na posição menos favorável (adjacente) DEAF#2.

Contrariamente ao que vendedores e representantes comerciais anunciam, a instalação do dispositivo *antifouling* não pode se dar de qualquer forma, requer *know how*. A sua eficácia é melhor quando instalado no circuito primário da água de resfriamento.

Conforme mostrado na figura acima, se o escoamento não estiver sob o efeito do campo elétrico externo, o *biofouling* cresce rapidamente e o valor do

index of fouling, $IF = 1$ é atingido num período de aproximadamente 60 dias de operação; i.e.: a temperatura dos mancais se aproxima do máximo admissível ($T \approx 85$ °C). Entretanto, se o dispositivo *antifouling* for ativado no circuito primário da água de resfriamento do trocador de calor, o índice IF atinge valor significativamente mais baixo; i.e.: $IF = 0,23$. Este *index of fouling* praticamente dobra de valor ($IF = 0,43$), assim comprovando a importância do posicionamento adequado do dispositivo *antifouling*. Em resumo, conclui-se que quando corretamente instalado, o dispositivo *antifouling* de fato mitiga o *fouling*, embora não o erradique completamente.

Para um nível de confiança de 95%, os dados da Tabela 10 apresentam as incertezas associadas ao cálculo do *index of fouling*, IF .

Tabela 10 - Incerteza associada ao cálculo da efetividade ε e do índice IF

		Coefficiente de sensibilidade	Valor de sensibilidade, S	Incerteza, U_{95} (%)	$(S \cdot U_{95})^2$
ΔT_1	Temperatura diferencial	1	1	0.2	0.04
ΔT_2	Temperatura diferencial	1	1	0.2	0.04
Sum of squares $\sum(S \cdot U_{95})^2$					0.08
Uncertainty associated with the effectiveness, $\varepsilon = \sqrt{\sum(S \cdot U_{95})^2}$					0.28%
Absolut uncertainty associated with the index of fouling, $\delta_{IF} = 0,02^*$					

* Calculado a partir da propagação da incerteza associada aos valores de ε e ΔT

Os experimentos foram realizados em conformidade a ambos os critérios adotados (hidrodinâmico e térmico) para avaliar a eficácia do dispositivo antifouling testado.

5

Método alternativo de limpeza de trocadores de calor

O estudo detalhado das diversas alternativas tecnológicas de limpeza de trocadores de calor e a constatação de que a técnica não invasiva pela aplicação do campo elétrico mitiga o *fouling* mas não o erradica, inspirou o desenvolvimento de uma técnica que faz uso de esferas abrasivas bombeadas juntamente com a água de resfriamento pelo interior dos dutos dos trocadores de calor. Diferentemente de outras aplicações em que as esferas ao serem bombeadas passam pelo rotor da bomba comprometendo a sua integridade, a alternativa proposta nesta dissertação fundamenta-se na concepção de um sistema inovador denominado sistema injetor de esferas (SIE), cujo projeto constitui objetivo complementar desta pesquisa de mestrado. Uma característica do dispositivo proposto é impedir a passagem das esferas pelo interior da bomba centrífuga utilizada na circulação forçada do sistema esferas-água de resfriamento do trocador de calor. Preserva-se, assim, a integridade das esferas, aumentando a sua vida útil e evita-se a contaminação do meio ambiente com os possíveis resíduos projetados. Dentre as características inovadoras, destacam-se:

- ineditismo na limpeza de trocadores de calor, de hidrogeradores, no cenário nacional
- a técnica pode ser utilizada de modo contínuo e/ou intermitente no instante em que a eficiência energética for comprometida
- adequações das esferas abrasivas às características da tenacidade do *fouling* presente nos dutos dos trocadores. Permitindo, desse modo, um controle na abrasividade das esferas ideal às paredes dos dutos
- baixo investimento na adequação (acoplamento) do sistema de limpeza ao tramo dos trocadores de calor
- limpeza realizada sem a interrupção dos processos de geração de energia
- baixa complexidade para a realização da limpeza. A limpeza é controlada por manobras de válvulas.

O método proposto, suas características, vantagens e desvantagens, bem como a sua aplicação nos trocadores de calor água-ar da usina Fontes Nova são discutidos neste capítulo.

5.1. Caracterização das esferas abrasivas

A Figura 48 ilustra as esferas abrasivas, utilizadas para realizar a limpeza mecânica por abrasão controlada durante as fases incipientes de formação da incrustação. Para assegurar eficácia do processo de limpeza essas esferas são construídas de material elástico resiliente recoberto com microesferas abrasivas, com um diâmetro ligeiramente superior (22,5 mm) ao diâmetro dos dutos (22 mm). Esta técnica elimina acúmulos de partículas materiais, formação de biofilme, camadas e depósitos de produtos corrosivos presentes no escoamento durante as fases de formação do *fouling*. Seu uso excessivo deve ser evitado para minimizar o desgaste do interior das superfícies dos trocadores. Conforme será discutido, a frequência da passagem das esferas pelos tubos do TC deve ser estabelecida conforme o tempo de ciclos programados de limpeza.

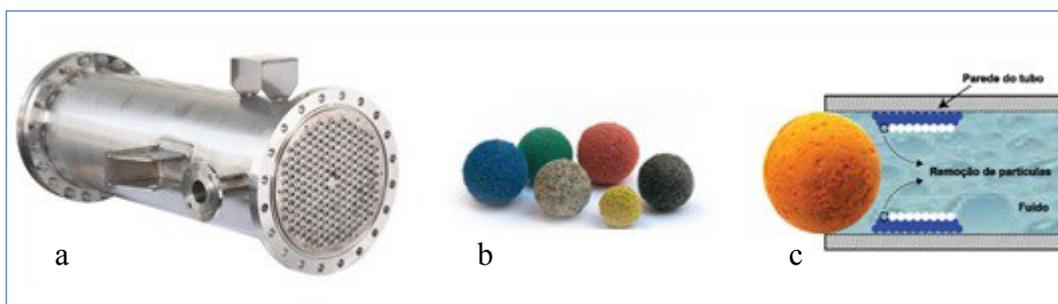


Figura 48 - Uso de esferas abrasivas para limpeza de dutos do TC

a: trocador de calor do tipo tubular; b: esferas abrasivas de diferentes diâmetros e materiais; c: ilustração da passagem de uma esfera por um tubo do TC

A título de ilustração, a Figura 48 mostra, também, um TC tubular e esferas abrasivas de diferentes materiais, selecionadas em função da natureza da incrustação (*fouling*) a ser removida. As esferas são introduzidas no escoamento por meio de uma bomba injetora i.e.: impulsionadas pelas passagens do trocador de calor pela pressão positiva da bomba no TC e circulando pela chicana (acessório que alterna a entrada e saída do fluxo no interior do TC) que cria um espaço na entrada e saída dos tubos do trocador. Após circularem, as esferas são capturadas e retornam a uma câmara coletora para serem injetadas novamente no sistema. O regime turbulento da água de resfriamento impulsiona as esferas de forma randômica assegurando a probabilidade de que todos os tubos estarão

expostos ao processo de limpeza. A Figura 49 ilustra um dispositivo que orienta a entrada das esferas no TC em que se deseja realizar o processo de limpeza.

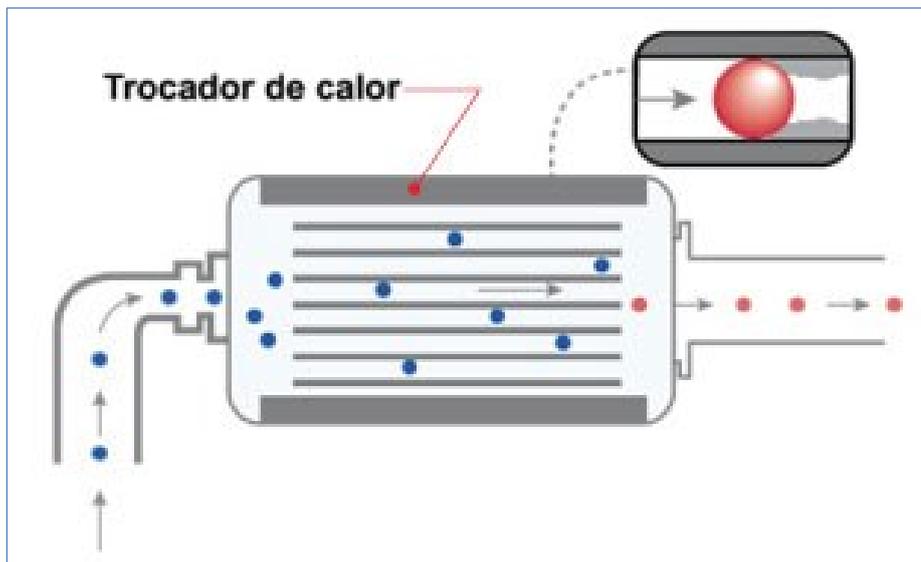


Figura 49 - Circulação de esferas abrasivas no interior do trocador de calor

Eimer (1985) sugere um fórmula para determinar o parâmetro f_k (quantidade de esferas (f_k) que deve circular por hora) em cada duto para assegurar eficácia do processo de limpeza calculado a partir da seguinte expressão:

$$f_k = \frac{c_f \cdot 3600}{t_u} \quad (19)$$

Em que:

f_k : frequência de passagem de esferas por cada tubo (esferas/h). Fabricantes recomendam 12 esferas por hora

c_f : fração de carga de esferas. É o número de esferas dividido pelo número de tubos em paralelo (passe)

t_u : a média de tempo (em segundos) de circulação de uma esfera pelo sistema de limpeza.

Se $t_u = 30$ s e a fração de carga $c_f = 0,1$ então:

$$f_k = \frac{0,1 \cdot 3600}{30} = 12 \text{ esferas /h} \quad (20)$$

Para o exemplo dado, por cada tubo, estatisticamente as esferas circulam 12 vezes em um intervalo de tempo de 1 hora. Segundo Eimer (1985), esta é uma frequência típica que garante a limpeza dos tubos. A técnica deve ser aplicada logo após o processo de limpeza para assegurar que as limpezas subsequentes ocorrerão durante o processo incipiente de formação do *fouling*; ou seja, deve agir antes que a incrustação de consolide. Se houver qualquer depósito ou acúmulo de sujeira, a efetividade do sistema de limpeza pode ser comprometida. Sob estas circunstâncias, o tubo não poderá receber esferas, tornando-se susceptível à incrustação. Limpezas preliminares são exigidas antes de se fazer uso desta técnica para garantir que a má distribuição das esferas não se torne um problema. A eficácia da técnica é alcançada também ao ser levado em consideração: (i) a qualidade da água; (ii) o material de construção dos tubos; (iii) a caracterização da formação do *fouling*; (iv) a necessidade de uma limpeza anterior com o objetivo de evitar possíveis obstruções; e (v) a existência e grau de corrosão interna.

O uso de esferas abrasivas no controle e mitigação das incrustações pode ser caracterizado pela: (i) prevenção da formação da incrustação e deposição de produtos corrosivos; (ii) utilização em depósitos tenazes e limpezas preliminares; (iii) não interrupção do funcionamento dos equipamentos durante sua circulação; (iv) variabilidade do material, da dureza e do diâmetro das esferas; e (v) exigência de pouca manutenção. Porém, quando esferas abrasivas são utilizadas existe: (i) a possibilidade de retenções de esferas no interior das passagens do TC; (ii) limitação à geometria circular das passagens de seção transversal dos tubos internos do TC; (iii); uso restrito à tubulações simples ou possíveis tubos em formato “U”; e (iv) redução da sobrevida da tubulação em função da perda de integridade de suas paredes internas devido à abrasão que resulta do uso continuado desta técnica.

5.2. Concepção do sistema injetor de esferas

A Figura 50 apresenta um desenho esquemático do Sistema de Injeção de Esferas Abrasivas (SIE) concebido para realizar a limpeza dos trocadores de calor utilizados para refrigerar os hidrogeradores da usina Fontes Nova sem a

necessidade de parada da turbina. Caracterizados na figura pelas abreviações indicadas, compõem o SIE os seguintes subsistemas:

- bomba centrífuga (B) - responsável pela circulação forçada da água e das esferas abrasivas pelo interior dos tubos do trocador de calor (tubos objeto da limpeza).
- reservatório intermediário (RI) - compartimento para armazenamento das esferas abrasivas entre ciclos de operação do sistema injetor de esferas abrasivas.
- lançador de esferas (LE) - dispositivo para introduzir as esferas de forma controlada no 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 solenoides (V1 e V2) - válvulas para abertura e fechamento automático do fluxo: permanecem totalmente abertas durante a operação de limpeza e totalmente fechadas durante a operação de transferência das esferas abrasivas.
- válvulas solenoides (V3 e V4) - válvulas para fechamento e abertura automático do fluxo: permanecem totalmente fechadas durante a operação de limpeza e totalmente abertas durante a operação de transferência das esferas abrasivas.
- válvula reguladora (VR) - objetiva regular 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 resfriamento do sistema injetor de esferas abrasivas para o aflente durante a operação de transferência.
- conector de entrada (CE) - conector do trocador de calor ao SIE. 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.

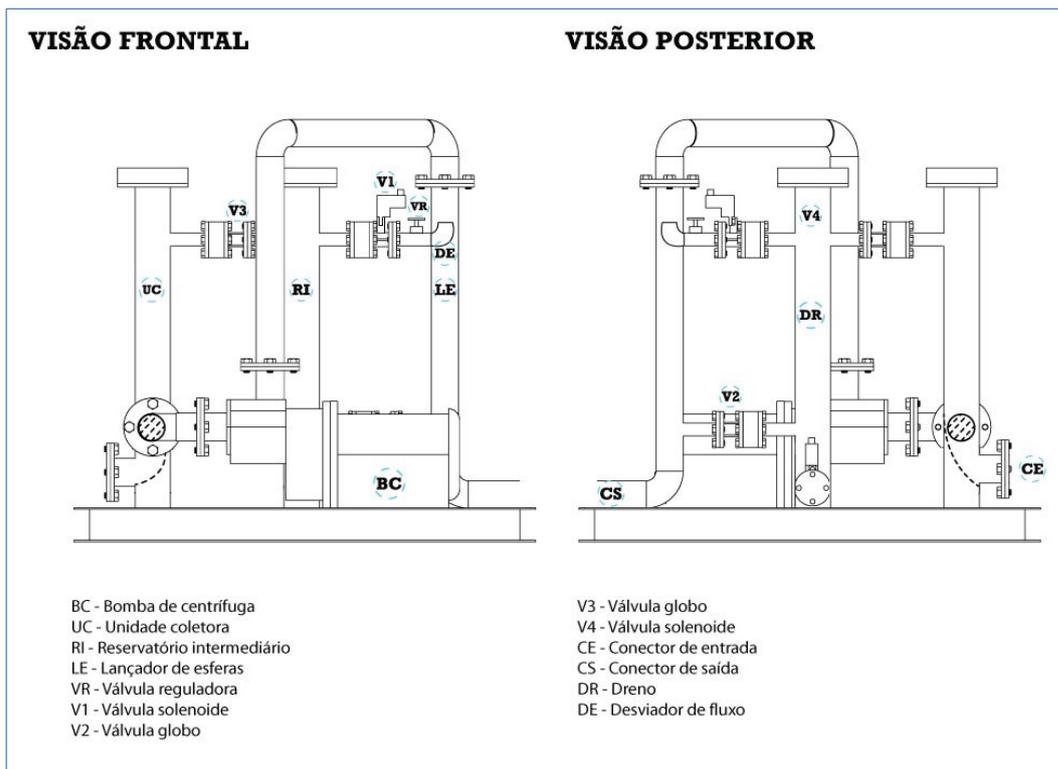


Figura 50 - Esquemático e componentes do SIE

Conforme ilustrado na Figura 51, e para atender o caráter inovador da pesquisa de mestrado, o SIE foi concebido para realizar a circulação das esferas abrasivas em circuito fechado, em série com o TC que se pretende limpar, e sem a necessidade de interrupção da operação do hidrogenador, assim, evitando onerosas paradas técnicas de manutenção. Anteriormente à introdução do SIE, a água de resfriamento era bombeada diretamente do canal de fuga (água que já gerou energia), para o interior dos trocadores e descartada no afluente. O sistema de limpeza proposto não altera essa lógica de funcionamento, apenas introduz o SIE em série com o TC para permitir a injeção de esferas abrasivas em ciclos controlados de operação.

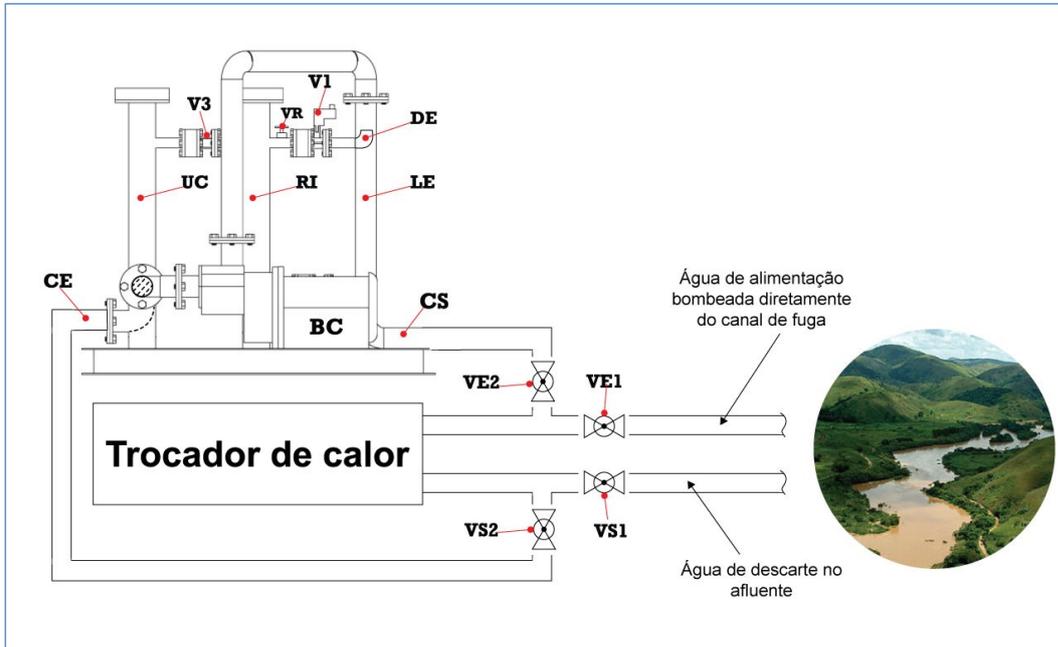


Figura 51 - Circuito fechado com o SIE acoplado no trocador de calor

5.3. Funcionamento do sistema injetor de esferas abrasivas

Antes do início do processo de limpeza, as esferas abrasivas (descritas na seção anterior) são introduzidas no reservatório intermediário, conforme ilustrado na Figura 52.

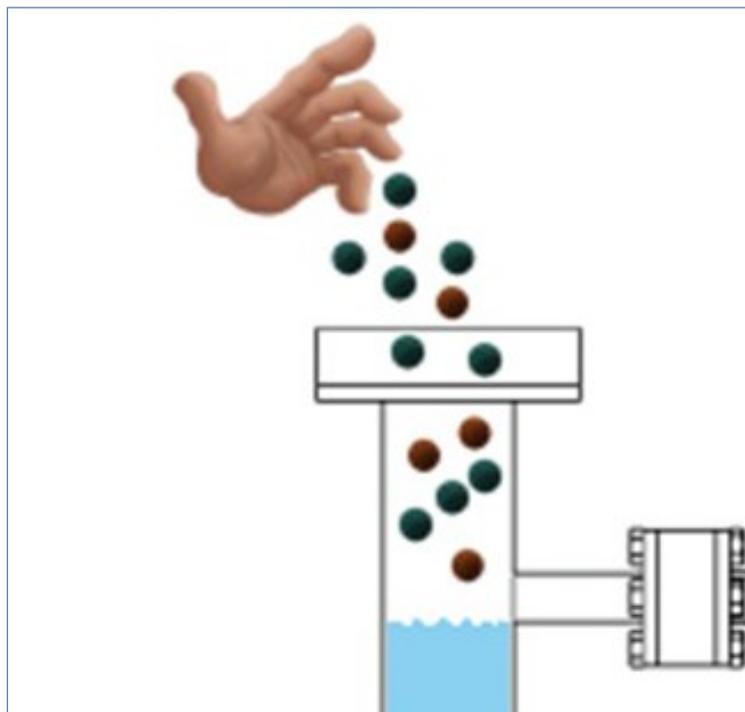


Figura 52 - Alimentação de esferas no sistema de limpeza

Para a geometria e configuração dos TC tubulares (água-ar) da usina Fontes Nova, cálculos e estimativas preliminares sugerem que para se assegurar que todos os tubos serão visitados pelas esferas abrasivas (que devem escoar numa certa velocidade efetiva capaz de promover a limpeza de forma efetiva e sem atropelamento de esferas), cerca de oitenta esferas abrasivas (diâmetro = 22 mm) devem ser utilizadas em cada ciclo de limpeza. Um dispositivo eletrônico desenvolvido para atuar nas válvulas solenoides assegura uma injeção controlada das esferas abrasivas no circuito de água de refrigeração. Entende-se, entretanto, que em função das particularidades do sistema de injeção e do TC em questão, o número ótimo de esferas capaz de assegurar um processo adequado de limpeza deverá ser determinado por meio da prática de uso do sistema de limpeza proposto.

Uma vez abastecido de esferas, o sistema é conectado ao TC que se pretende limpar. Esta conexão é realizada por meio de engates rápidos e manobra de válvulas, que permitem acoplamento rápido, assim, permitindo que a bomba centrífuga passe a operar impulsionando as esferas abrasivas imersas na água de resfriamento (fluido frio de trabalho) pelo TC, evitando a formação de *fouling*.

Quando em operação em circuito fechado (ver Figura 51), manobras de válvulas permitem que a água que sai do trocador, juntamente com as esferas abrasivas que acabaram de circular pelo trocador, sejam desviadas para retornar ao SIE, ao invés de serem rejeitadas no afluente. Assim, a água de resfriamento e as esferas abrasivas retornam ao SIE pelo conector de entrada CE; após passar pela bomba, a água segue para o lançador de esferas LS, onde o fluxo se divide em duas correntes. Uma passa direto para a saída do lançador de esferas LE, enquanto a corrente complementar é desviada pelo joelho J para o reservatório intermediário. A vazão do escoamento é regulada pela válvula VR, que após posicionada na posição que assegura a vazão desejada (empiricamente determinada) permanecerá travada nessa posição para controlar o ritmo de liberação das esferas. Quanto mais aberta estiver essa válvula, maior será o fluxo de água pelo reservatório e, conseqüentemente, maior o número de esferas que deixarão o reservatório intermediário RI em direção ao TC. Durante a operação de limpeza as válvulas V_1 e V_2 permanecem totalmente abertas enquanto as válvulas V_3 e V_4 permanecem fechadas, conforme procedimento de operação caracterizado na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 - Condições de operação e manobra das válvulas do SIE

Válvulas	Operação de limpeza	Operação de transferência
V1	Aberta	Fechada
V2	Aberta	Fechada
V3	Fechada	Aberta
V4	Fechada	Aberta
VR	Parcialmente aberta	Parcialmente aberta
VE1	Fechada	Aberta
VE2	Fechada	Aberta
VS1	Aberta	Fechada
VS2	Aberta	Fechada

A Figura 53 ilustra as possíveis trajetórias das esferas abrasivas impulsionadas pelo fluxo de água de refrigeração. Após circularem pelo TC (objeto do processo de limpeza), as esferas abrasivas retornam ao SIE pelo DE e ficam retidas na tela da UC. Quando todas as esferas tiverem sido recolhidas no compartimento UC, o processo de limpeza deve ser interrompido e as esferas abrasivas transferidas de volta ao reservatório intermediário RI. Durante este processo a bomba será desligada. Abrem-se as válvulas V3 e V4 e fecham-se as válvulas V1 e V2. Nessa condição, o fluxo de água através do SIE 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 na tela do reservatório intermediário RI. Após o término da transferência é possível reverter a manobra de válvulas e repetir a operação imprimindo mais um ciclo de limpeza ou, se assim decidido, instalar o sistema de injeção de esferas num outro TC que se deseja limpar. Após o término de um ciclo de limpeza, pode-se reverter a manobra de válvulas e repetir a operação imprimindo mais um ciclo de limpeza ou, se assim decidido, instalar o sistema de injeção de esferas num outro trocador de calor que se deseja limpar.

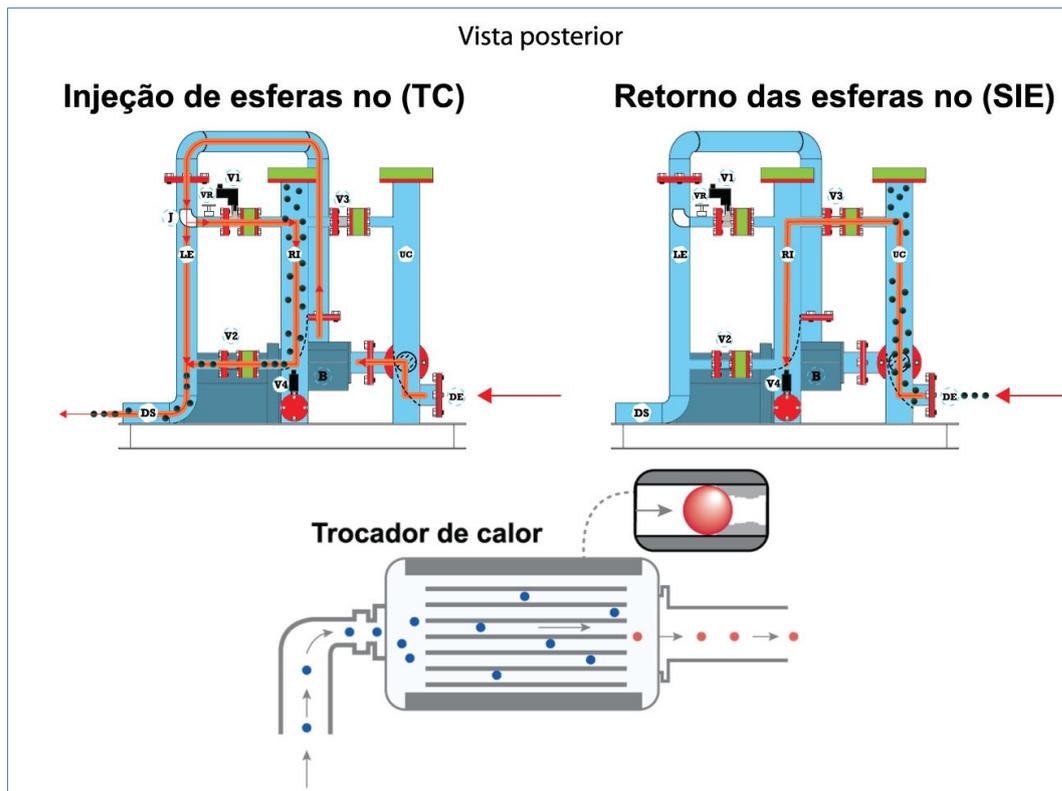


Figura 53 - Trajetória das esferas abrasivas no interior do sistema injetor

Ilustrado na Figura 54, o controle das válvulas do sistema injetor de esferas abrasivas (SIE) faz uso de uma placa condicionadora de sensores Beckhoff, para realizar o controle automatizado das válvulas do sistema injetor de esferas.

Opera a partir de um sistema computadorizado já testado, desenvolvido especificamente para atender as demandas da pesquisa de campo.

Esse sistema foi testado e validado nas dependências do Laboratório de Engenharia Veicular (LEV) do Instituto Tecnológico da PUC-Rio.



Figura 54 - Placa condicionadora de sensores de operação das válvulas

A Figura 55, a seguir, ilustra os ciclos de abertura e fechamento das válvulas solenoides para assegurar uma injeção controlada de esferas abrasivas, assim evitando obstrução dessas nas passagens internas do SIE.

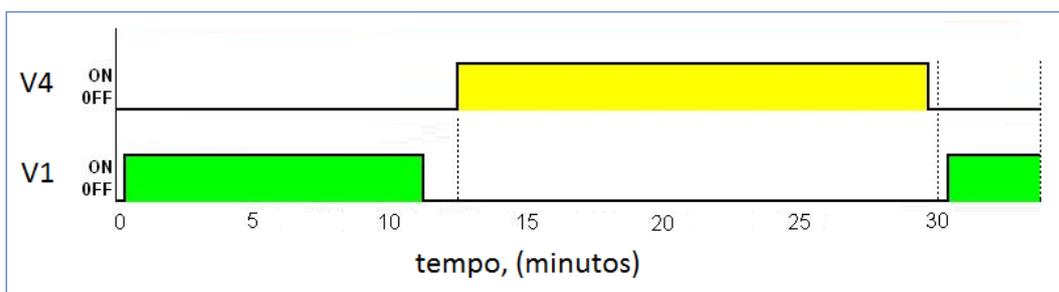


Figura 55 - Controle de injeção de esferas abrasivas
Controle dos ciclos de abertura e fechamento das válvulas

Entendido como objetivo complementar da pesquisa de mestrado, o Sistema injetor de esferas abrasivas (SIE) foi concebido, projetado e construído. Seus testes em laboratório, e posteriormente na usina Fontes Nova, constituem, entretanto, objetivo de trabalho futuro.

6 Conclusões e recomendações

A presente pesquisa cumpriu os objetivos originalmente propostos: (i) avaliar a eficácia de um dispositivo eletrônico *antifouling* (sistema comercial) que expõe o escoamento da água de resfriamento do trocador de calor ao efeito de um campo elétrico externo e (ii) propor uma tecnologia alternativa de tratamento de incrustações em trocadores de calor (TC). A solução alternativa deverá evitar a interrupção da geração. A técnica foi testada no trocador de calor do tipo água-óleo utilizado para resfriar o óleo de arrefecimento dos mancais da turbina.

A pesquisa desenvolvida mostrou que a manutenção programada para a limpeza deve contrabalançar o desempenho geral do sistema assim gerando redução dos custos operacionais, o que reflete uma grande preocupação dos agentes que atuam nesse mercado altamente competitivo de energia elétrica.

Dados experimentais confirmaram que a tecnologia anti-incrustação testada de fato mitiga a bioincrustação, embora não a erradique por completo. Ao contrário do que é usualmente anunciado por representantes comerciais, a tecnologia não é uma panaceia. Ou seja, pode produzir resultados adequados desde que corretamente instalado no circuito principal da água de refrigeração. Os resultados são sensíveis às peculiaridades do ambiente e das características e propriedades das águas estudadas. As experiências também mostram que a posição do dispositivo anti-incrustação na corrente de arrefecimento desempenha um papel essencial na eficiência do processo de limpeza. Os experimentos realizados com base nos critérios hidrodinâmicos e térmicos propostos para avaliar o desempenho do dispositivo anti-incrustação confirmaram a sua eficácia: reduz a bioincrustação de resistência hidrodinâmica por um fator de 2,6 e o índice de incrustação por um fator de 3,7.

O impacto econômico resultante do uso de sistemas alternativos de limpeza foi demonstrado. Considerando que o dispositivo eletrônico *antifouling* é capaz de reduzir pelo menos uma parada técnica de um único dia (caso mais conservador) o

impacto resultante é de R\$ 211.200,00 (impacto da interrupção de geração em um dia).

Estas conclusões estão limitadas às condições do equipamento, ambiente e das águas estudadas.

Biofouling e controle de biofilmes em superfícies de trocadores de calor ainda carecem de um estudo sistemático para quantificar os efeitos de variáveis diferentes. Deve-se ter em mente que incrustações também aderem às superfícies das turbinas e de outros equipamentos de refrigeração do hidrogenador. O fenômeno de formação de biofouling é altamente complexo e continua sendo objeto de estudos por especialistas. Apesar de décadas de esforço de pesquisa a solução definitiva do problema permanece indefinida.

Como contribuição, o presente trabalho propõe uma tecnologia alternativa de limpeza pelo uso de esferas abrasivas e apresenta o projeto de um sistema inovador para introdução das esferas sem a necessidade de interrupção da geração. A validação desse sistema alternativo constituirá, entretanto, objeto de um desdobramento futuro deste trabalho.

Como sugestões para desdobramento deste trabalho recomenda-se: (i) testar o sistema injetor de esferas (objeto do capítulo 5) em condições laboratoriais e na própria Usina e (ii) aprofundar os estudos de impacto econômico associados ao uso de sistemas inteligentes de limpeza dos trocadores de calor.

Referências bibliográficas

AZEVEDO, N. J. R. C.; MILON J. J.; TICONA, E. M.; TICONA, J. M.; BRAGA, S. L.; & FROTA, M. N. **Avaliação técnica e econômica da bioincrustação de trocadores de calor em sistemas de hidrogenação: a experiência da Usina Fontes Nova**. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. XX SNPTEE. 22-25. Novembro de 2009. Rio de Janeiro. Seminário.

AZEVEDO, N. J. R. C. **Avaliação da experiência com o aparelho HydroFLOW**. Rio de Janeiro: Relatório interno da Light, Usina Fontes Nova, Barra do Pirai, 1995, 34p. Relatório Técnico.

BELL, K. J. & MUELLER, A. C., **Wolverine heat transfer data book II**. 2001. p.45. Wolverine Tube Inc. Eletronic distribution. <http://www.wlv.com/products/thermal-management-databooks.html>

BOTT, T. R. **Aspects of crystallization fouling**. In: **Experimental thermal and fluid science**. v.14, May 1997. p.356- 360.

BOTT, T. R. **Fouling of heat exchangers**. 1.ed. New York. Elsevier. Livros Tecnicos e Cientificos, 1995. 523p.

BOTT, T. R. Fouling of heat exchangers. In: Elsevier Science & Technology Books, 1994. 529p. · ISBN: 0444821864

BRUSILOVSKY, M.; BORDEN, J. & HASSON, D. **Flux decline due to gypsum precipitation on RO membranes**. Desalination. v.86, p. 187-222, 1992.

BRYERS, J. & CHARACKLIS, W. **Early fouling biofilm formation in a Turbulent flow system: overall kinetics**. Water Research, v.15, p. 483-491, 1980.

CALLOW, M. E.; PITCHERS, R. A. & SANTOS, R. **Non-biocidal anti-fouling coatings**. Elsevier Aplplied Sciences, New York, v.7, p. 43-48, 1988.

CHARACKLIS, W. G. **Microbial fouling**. In: CHARACKLIS, W.R, Marshall KC. Biofilms. Wiley, New York, 1990. p. 523-584.

DONALDSON, J. D. “**Scale prevention and descaling**”. Tube International, p. 39-42, Janeiro de 1988.

WALLHÄUBER E.; HUSSEIN M.A.; BECKER T. **Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry**, Food Control, v. 27, ed.1, p. 1-10, September. 2012.

FLEMMING, H. C & RIDGWAY H. **Biofilm Control: Conventional and alternative approaches**. In: Flemming H. C, Venkatesan R.; Murthy P.S.; Cooksey K.C. Marine and industrial biofouling. Springer, Heidelberg, 2009. p. 103-118.

FLEMMING, H. C. & WINGENDER, J. **The crucial role of extracellular polymeric substances in biofilms**. In: Flemming H. C.; Vekatesan R.; Murthy

P.S.; Cooksey K.C.; *Marine and Industrial Biofouling*. Springer, Heidelberg, 2003. p. 103-118.

FLEMMING, H. C. **The biofilm matrix: key for the biofilm mode of life**. *Nat Rev. Microbiol*, v.8, p. 623-633. 2002.

FÖRSTER, M. & BOHNET, M. **Influence of the interfacial free energy crystal/heat transfer surface on the induction period during fouling**. *Int. J. Th. Sci.*. v.38, p. 944-954. 1999.

FROTA, M. N.; TICONA E. M.; NEVES A.V.; MARQUES R. P.; BRAGA S. L.; VALENTE G. **On-line cleaning technique for mitigation of biofouling in heat exchangers: a case study of a hydroelectric power plant in Brazil**. *Experimental Thermal and Fluid Science*, In: *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, Paper accepted for publication under Code # Ref. n. ETFS-D-13-00399R1, December, 2013.

GARRETT, P. B. A.; SMITH, S. A.; WATTS, R. L.; KNUDSEN, J. G.; MARNER, W. J. & SUITOR, J. W. **Fouling of heat exchangers: characteristics, costs, prevention, control, and removal**. Overview of fouling, Noyes Publications, New Jersey. 1985.

GUAN-MIN ZHANG; GUAN-QIU LI; WEI LI; ZHAOYAN ZHANG; XUE-LI LENG; MAO-CHENG TIAN. **Particulate fouling and composite fouling assessment in corrugated plate heat exchangers**. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 60, p. 263-273, May. 2013.

European Patent Specification 0 720588 B1), European Patent Office, Bulletin 1999/55, HYDROPATH TECHNOLOGY. **Hydropath Holding Limited, Linpac Gouse**, Patent granted in February 3rd, 1999, International Publication, n. WO 95/08510, 30 March 1995 Gazette 1995/14. Otterspool Way, Watford, Hertfordshire WD2 8HL/GB.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**: LTC Editora. Rio de Janeiro-RJ, 2003. ISBN 978-85-216-1584-2.

JERÓNIMO M. A. S.; L. F. MELO; BRAGA A. S.; FERREIRA P. J. B. F. & MARTINS C. **Monitoring the thermal efficiency of fouled heat exchangers: a simplified method**. *Thermal and Fluid Science*, n. 14, v. 9, p. 455-463. 1997.

KAYS, W. M. & LONDON, A. L. **Compact heat exchangers**. McGraw-Hill, 2.ed., New York: Livros Técnicos Científicos, 1964. 272p.

KAZI, S. N. **Fouling and fouling mitigation on heat exchanger surfaces, Heat exchangers - Basics Design Applications**, Department of Mechanical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur. Malaysia: Livros Técnicos Científicos. 2012. 586p. ISBN: 978-953-51-0278-6, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/heat-exchangers-basics-design-applications/heat-exchanger-fouling-and-its-mitigation>.

KERN D. Q & SEATON, R. E. **A theoretical analysis of thermal surface fouling**. *British Chemical Engineering*, v.4, p. 258-262, 1959.

MADI, M. **Otimização do período de limpeza de trocadores de calor utilizados no refino de petróleo**. Curitiba, 2005. 102p. Dissertação -

Universidade Tecnológica do Federal do Paraná, Campus Curitiba - Departamento de Pesquisa e Pós-graduação, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - PPGEM Unidade de Curitiba, CEFET-PR.

MARTINS, A. B. **Avaliação da utilização de ligas de cobre-zinco (latão) em permutadores de calor que trabalham com água de resfriamento na UN-RECAP/PETROBRAS**. Porto Alegre, 2009. 114p. Tese de Mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação de Minas, Metalurgia e de Materiais - PPGEM.

MELO, L. F. & BOTT, T. R. **Biofouling in water systems**. Elsevier Science Inc., Experimental Thermal and Fluid Science 1997; v.14, p. 375-381, 1996.

MOHANTY D. K. & SINGRU P. M., , **Use of C-factor for monitoring of fouling in a shell and tube heat exchanger**, Energy, v.36, n.5, p. 2899-2904, May, 2011.

MOSTAFA, M. A. **Fouling of heat transfer surfaces**. In: heat transfer - theoretical analysis, experimental investigations and industrial systems. Mansoura University, Faculty of Engineering, Mech. Power Eng. Dept., In Tech, Egypt: Livros Técnicos Científicos. 2011. 505-542p.

O'TOOLE, G.; KAPLAN, H. B. & KOLTER, R. **Biofilm formation as microbial development**. Annual Review of. Microbiology, v.54, p. 49-79. October, 2000.

Performance do Sistema HydroFLOW no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, ESA Sistemas Ltda., Fevereiro de 1999. Relatório Técnico.

NEVES A. V.; JUNIOR G. P. V., JUNIOR J. T. B.; FROTA M. N. “**Proposição de Solução Inovadora para o Sistema de Resfriamento dos Hidrogeradores da Usina Fontes Nova**”. Programa Regulado de P&D da Light/Aneel, P&D 07/11 E, Rio de Janeiro, 2013, 65 p. Relatório Técnico.

ROZENTAL, L. Y. **Avaliação de tratamentos de água de sistemas de refrigeração semi-abertos por meio de medidas eletroquímicas**. Rio de Janeiro, 1999. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

KAKAC S.; LIU H. **Heat Exchangers: Selection, rating and thermal design**, CRC Press, New York: Livros Técnicos Científicos, 1998. 232-354p.

SCHOPF J. W.; HAYES J. M. & WALTER M. R. **Evolution on earth's earliest ecosystems: recent progress and unsolved problems**. In: Schopf JW, Ed. Earliest Biosphere. Its Origin and Evolution. Princeton NJ: Princeton University Press, 1983. 360-384p.

SUGARMEN, C., SIBONI, U. & VOLANSKY, R. **Automatic tube cleaning system (Atcs) Installation in sulfide retrieval monoethanolamine treatment plant: case study and fouling global perspectives**. In: The ECI Heat Exchanger Fouling and Cleaning, VII Conference, Tomar, Portugal, July 1-6, 2007. 5p.

TABOREK, J.; AOKI, T.; RITTER, R. B.; PALEN, J. W. & KNUDSEN, J. G. **Predictive methods for fouling behavior**. Chem. Eng. Prog. 68, n.7, p.69-78, 1972.

TONIN, P. C. **Metodologia para monitoramento do desempenho térmico de redes de trocadores de calor**. Paraná, Fevereiro de 2003. 128p. Tese Mestrado - Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - PPGEM. Unidade de Curitiba, CEFET-PR.

VIDELA, H. A. **Biocorrosão, biofouling e bioterioração de materiais**. 1ª ed., Edgard Blücher Ltda. 2003. ISBN: 852120311X