

# Avaliação hidrodinâmica e térmica de alternativas tecnológicas para mitigação de incrustações em trocadores de calor de hidrogeradores

Maurício N. Frota, Epifanio M. Ticona, Sergio L. Braga, Juan J. M. Guzmán, Jaime M. Ticona e José R. C. A. Neto

**Resumo** – Resultado do P&D E 06-07 (ANEEL-LIGHT Energia), o trabalho investigou a eficácia de uma tecnologia alternativa de mitigação da indesejável formação de incrustações minerais (*fouling*) e de material biológico (*biofouling*) nas superfícies internas dos trocadores de calor que alimentam os hidrogeradores da Usina Fontes Nova. Esses depósitos mudam a hidrodinâmica e as características térmicas do sistema já que aumenta a queda de pressão e reduz drasticamente a efetividade térmica dos trocadores de calor. A tecnologia objeto do estudo “excita o escoamento” pela aplicação de um campo elétrico gerado externamente por um dispositivo eletrônico. Para avaliar metrologicamente a efetividade do método de mitigação os trocadores de calor água/óleo do sistema de arrefecimento dos mancais dos hidrogeradores da Usina Fontes Nova foram instrumentados. A qualidade das águas de alimentação também foi estudada tendo em vista o impacto ambiental e a necessidade de explicar o indesejável mecanismo de formação de *biofouling*.

**Palavras-chave** – *Biofouling*, *Electronic-antifouling*, *Hidrogeração*, *Resfriamento de mancal*, *Trocadores de calor*.

## I. INTRODUÇÃO

O trabalho descreve o desenvolvimento e os resultados finais do projeto de P&D ANEEL-LIGHT Ref. OKE 06-07 desenvolvido pelo grupo do Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação da PUC-Rio. Os hidrogeradores da Usina Fontes Nova possuem um sistema de resfriamento de mancais que faz uso de trocadores de calor. O resfriamento dos mancais dos hidrogeradores se dá pela troca de calor ocorrida em um sistema de trocadores de calor do tipo placas verticais que faz uso de óleo (fluido de processo) resfriado pela água de descarga das turbinas (fluido de arrefecimento) na configuração do escoamento contracorrente. A experiência de manutenção dos trocadores de calor evidencia a formação de indesejáveis incrustações no seu interior. Incrustações essas que comprometem drasticamente

o seu desempenho hidrodinâmico/térmico e coloca em risco a sua operação. Com o propósito de estudar uma solução capaz de mitigar esse problema foi desenvolvido o projeto Tecnologia de Tratamento de água de Refrigeração da Usina Fontes Nova.

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 armazena um volume útil de aproximadamente 445 milhões de metros cúbicos de água para regularização das vazões. Essa água represada constitui-se em reserva estratégica para suprimento da quase totalidade da água potável que abastece a região metropolitana do Rio de Janeiro. Os mancais de cada uma das três turbinas (acoplada ao seu respectivo gerador) são refrigerados por trocadores de calor que constituem objeto do presente estudo.

A literatura técnica especializada faz menção a alternativas mecânicas e químicas de mitigação e controle da formação de depósitos nas superfícies de transferência de calor. Para remoção dos depósitos de material biológico (*biofouling*) são utilizados métodos mecânicos e químicos ou uma combinação de ambos que forçosamente resultam em paradas técnicas de manutenção e que fazem uso de agressivos métodos de limpeza do material biológico depositados na superfície dos trocadores de calor. Estas técnicas consistem em (a) tratamentos de choque térmico [3], (b) escoamento pulsado de água em alta velocidade em períodos curtos de tempo [6], (c) limpeza *on-line* por esferas abrasivas [6] entre outros. Os métodos químicos, por sua vez, empregam produtos tóxicos (biocidas) na água de resfriamento que atuam contra os microorganismos e são utilizados em circuitos fechados, normalmente causando indesejáveis impactos ambientais. Para reduzir a quantidade de biocida requerido é utilizada uma combinação deste com os métodos mecânicos de limpeza. A tecnologia de aplicação de campos elétricos denota um estágio avançado de desenvolvimento que teve início com a aplicação de campos magnéticos, cuja eficácia não se mostrou eficaz. O primeiro dispositivo comercial que utilizou campos magnéticos para evitar e eventualmente remover a formação de depósitos foi patenteado na Bélgica em 1945 [1]. Inicialmente foram utilizados ímãs intrusivos permanentes interferindo diretamente no escoamento; posteriormente outros desenvolvimentos foram testados de forma não intrusiva formando um anel (Grampo) [2] igualmente

---

Trabalho desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL; Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), Fortaleza/CE, no período de 17-19, agosto, 2011.

Agradecimentos são devidos ao apoio financeiro viabilizado pelo Programa de P&D ANEEL-LIGHT.

M. N. Frota (Coord. P&D 06/07) e J. M. Ticona, vinculados ao Programa de Pós-graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação da PUC-Rio; Tel: (21) 3527-1171 (mfrota@puc-rio.br; jmt@esp.puc-rio.br).

J. R. C. A. Neto Gerente - LIGHT do P&D (jose.rodriago@light.com.br).

E. M. Ticona, S. L. Braga, e J. J. M. Guzmán, Instituto de Energia da PUC-Rio (slbraga@puc-rio.br; emt@puc-rio.br; milonjj@gmail.com).

apresentando resultados não satisfatórios. Uma vasta revisão da literatura realizada por [2] mostra que esta tecnologia de tratamento ainda apresenta questões controversas, baixa eficácia e cujo fenômeno ainda não é suficientemente bem compreendido.

Já o presente trabalho investiga o efeito de um campo elétrico induzido por um dispositivo eletrônico (patente inglesa conhecida pelo seu nome comercial HydroFLOW) para “excitar o escoamento” com o propósito de mitigar a formação de incrustações. Na realidade o campo elétrico utilizado para excitar no escoamento é obtido a partir de um campo magnético variável gerado pelo dispositivo eletrônico.

Anteriormente ao presente trabalho, Ferraz [7] fez uso de um sistema similar, porém para avaliar o efeito do campo elétrico para mitigar a corrosão em um circuito de água de refrigeração. Fazendo uso de um *by-pass* do circuito principal, corpos-de-prova metálicos suscetíveis à corrosão foram montados em bases metálicas conectadas à parede do duto (placas ditas “protegidas contra corrosão”) e corpos-de-prova “não protegidos” montados em base de plástico. Ensaios de perda de massa realizados no circuito de *by-pass* indicaram taxas médias de corrosão (*corrosion rate*) de 1,91 mpy (*mils per year penetration*) nas amostras submetidas à proteção e taxas superiores a 30% (~2,53 mpy) quando medidas nos corpos-de-prova não protegidos expostos a 150 dias de exposição ao campo elétrico. A pesquisa concluiu que a exposição reduz o processo de corrosão. Embora para fins distintos, esta sinalização positiva motivou a presente investigação de se estudar o efeito da excitação externa do escoamento por um campo elétrico como alternativa tecnológica de mitigar a indesejável formação de incrustações (*biofouling*) nos trocadores de calor.

Do ponto de vista técnico e econômico, os indesejáveis efeitos da bioincrustação se acumulam na rede hidráulica e nos trocadores de calor e comprometem a eficiência hidrodinâmica (aumento de perdas de carga por atrito e obstrução) e térmica (efetividade dos trocadores de calor) do sistema. Esses efeitos adversos aumentam a perda de carga (e, por conseguinte, aumenta os custos de bombeamento) e reduz a efetividade térmica dos trocadores de calor.

Depósitos sólidos decorrentes da existência de contaminantes na água de arrefecimento impactam sobre custos operacionais (potência de bombeamento) e de manutenção (paradas frequentes dos hidrogenadores) para desobstrução e limpeza.

A formação de depósitos (orgânicos e inorgânicos) reduz os mecanismos de troca de calor associados ao arrefecimento de componentes críticos dos hidrogenadores, compromete a integridade dos sensores que integram o sistema de medição e impactam negativamente nos controles e dispositivos de segurança do sistema global.

Ao comprometer a integridade da instalação, ameaça a saúde, o meio ambiente e a segurança e impacta economicamente já que reduz o tempo de geração.

Do ponto de vista econômico, o trabalho avalia os impactos resultantes de paradas para manutenção do sistema de refrigeração que poderiam ser evitadas (ou reduzidas) e que forçosamente levam à interrupção da operação do sistema de geração. Ou seja, interrupção no fornecimento de energia elétrica implicando em elevados custos de manutenção e interrupção da geração.

Adicionalmente ao estudo dos mecanismos de mitigação das incrustações, o trabalho investigou também a natureza química e biológica das incrustações, o que é discutido em seção específica deste trabalho à luz de análises químicas e biológicas das incrustações e das águas de alimentação da Usina. No que concerne o impacto ambiental, as análises realizadas confirmaram a presença (indesejável) de contaminantes e microorganismos nas fontes de águas de refrigeração e de geração, que obstruem os elementos dos trocadores de calor e que retornam aos rios na forma de contaminantes.

O sistema de medição desenvolvido e utilizado foi testado no laboratório (acreditado) de Caracterização de Fluidos da PUC-Rio. Uma vez validado, este sistema foi utilizado para a monitoração e coleta de dados do sistema de arrefecimento (óleo resfriado a água) que alimenta os mancais dos hidrogenadores. Assim, o trabalho avalia uma tecnologia inovadora de indução de um campo elétrico controlado no sistema de refrigeração visando mitigar o indesejável processo de crescimento acelerado de microrganismos observado nos canais (de geometria complexa) dos trocadores de calor.

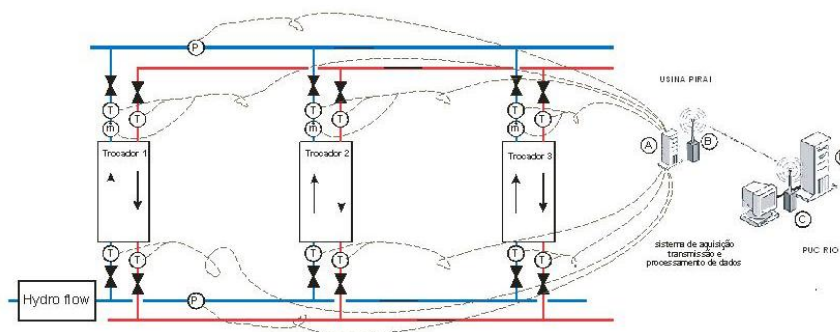


Figura 1. Esquema do Modelo Experimental. **T** denota o sensor de temperatura tipo PT-100; **m-dot** o medidor de vazão; **P** o sensor de pressão diferencial; **A** a placa de aquisição de sinais; **B** o transmissor de sinais; **C** o receptor de sinais e **D** o computador dedicado ao sistema de medição.

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

### A. Modelo Experimental

A figura 1 ilustra o esquemático de um sistema típico de

três trocadores de calor (óleo-água) utilizados para realizar o arrefecimento dos mancais dos hidrogenadores da usina Fontes Nova. Trocadores de calor esses que foram devidamente instrumentados para compor o modelo experimental conce-

bido. Deste constam os seguintes sistemas complementares: subsistema de medição de vazão, temperatura, pressão diferencial e subsistema de aquisição, transmissão e processamento de dados, esquematicamente ilustrado na figura 1.

**Sistema de medição** — A figura 2 ilustra o bocal-padrão especificamente desenvolvido para medir parâmetros do fluxo de água nos trocadores de calor tipo placas vertical (água-óleo) devidamente instrumentado para monitoramento e medição de vazão, temperatura e pressão diferencial. As fotos que compõem a figura 3 ilustram detalhes do sistema de medição desenvolvido composto por: bocal para medição de vazão; estações de medição com suas tomadas de pressão e sensores de temperatura; sistema de *by-pass*, que permite o teste de equalização dos múltiplos canais do sistema de medição. O bocal-padrão foi construído em conformidade à Norma ISO 5167-3:2003 [8]) e acoplado a um transmissor de pressão diferencial Modelo FDW de fabricação Honeywell calibrado na faixa de operação de 0 a 25 psid (diferencial). Este dispositivo normalizado reflete a prática internacional para medição de vazão de fluidos e escoamento em tubulações e possui um nível de exatidão adequado (cf. Tabela I) para os propósitos do trabalho. As medições de temperatura foram realizadas nas estações de medição indicadas (circuito da água) e os elementos sensitivos são do tipo PT-100 (Resistência-padrão de Platina) cuja exatidão encontra-se igualmente especificada (cf. Tabela I). Tomadas para medição de pressão e temperatura foram instaladas em ambos os circuitos, de água e de óleo. As medições de pressão diferencial através do bocal (proporcional à vazão da água de refrigeração) são realizadas por um transmissor de pressão diferencial. O sinal eletrônico deste transmissor é corrente 4-20 mA transmitido ao sistema de aquisição de dados.

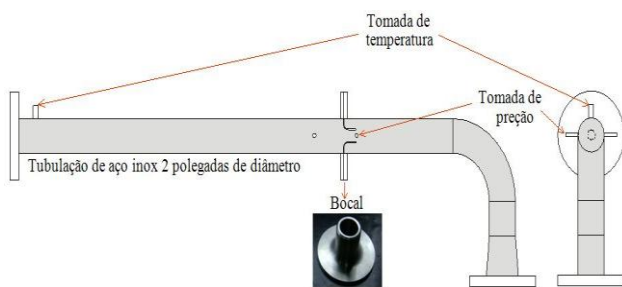


Figura 2. Aparato experimental do sistema de medição de vazão.



Figura 3. Detalhes do sistema de medição instalado na Usina).

O conjunto de fotos da figura 3 ilustra detalhes da instalação e dos sensores e, também, o equipamento (patente inglesa) utilizado para gerar o campo elétrico aplicado.

Tabela I. Parâmetros de medição e incertezas associadas.

Grandeza Física	Incerteza
Temperatura do fluido	0,1 °C
Pressão diferencial	0,3%
Vazão mássica	3%
Calor Trocado	4 %
Coefficiente global de troca de calor	$= f \Delta T_1; \Delta T_2; \delta \Delta T_1; \delta \Delta T_2$

- **Sistema de aquisição e processamento de dados** — O sistema de aquisição, transmissão e processamento de dados integra os seguintes componentes: placa de aquisição de sinais; transmissor de sinais; receptor de sinais e a unidade de armazenamento removível. Inicialmente os dados são armazenados na placa de aquisição e, posteriormente, para cada intervalo de tempo, o transmissor envia os sinais até a unidade de armazenamento removível com uma taxa de amostragem de 120 s. Periodicamente estes dados são extraídos para análise e avaliação.
- **Sistema de geração do campo elétrico** — A tecnologia objeto do estudo gera um campo elétrico variável na vizinhança da tubulação do circuito da água de refrigeração. O campo elétrico é induzido pela energia eletromagnética gerada por um transformador com núcleo de ferrita que cria uma onda senoidal de amplitude variável periódica de 200 kHz a 300 kHz. O trabalho visou testar a hipótese do fabricante que afirma que as incrustações e material em suspensão serão desalojadas após a operação do sistema por prolongados regimes (~1500 horas) de operação.

## B. Procedimento Experimental

O procedimento experimental desenvolveu-se segundo duas vertentes distintas de análise: (i) avaliação de desempenho hidrodinâmico e térmico dos trocadores de calor e (ii)

análise química e biológica das águas de abastecimento da Usina. A título de ilustração do problema objeto do estudo, as figuras 4 e 5 ilustram a gravidade do problema causado por incrustações nos elementos dos trocadores de calor drasticamente reduzindo a sua eficácia hidrodinâmica e, por conseguinte, térmica.

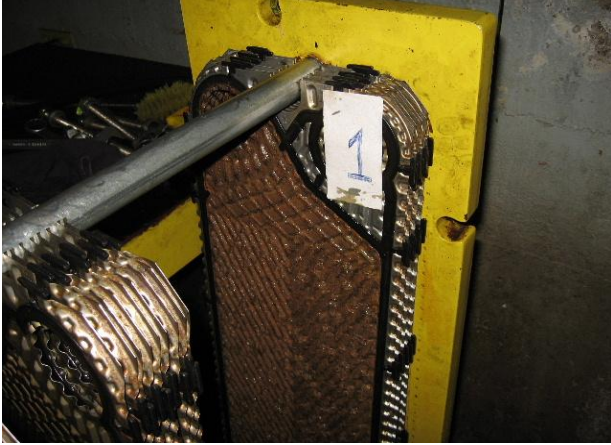


Figura 4. Incrustações nas placas do trocador de calor



Figura 5. Incrustações nos dutos do circuito de água de refrigeração

A Figura 6 ilustra o arranjo experimental e a sistemática de coleta de dados utilizada para se proceder a avaliação do desempenho dos trocadores de calor. Os experimentos foram planejados para causar interferência mínima no funcionamento de rotina da Usina Fontes Nova cuja operação não sofreu interrupções em função da investigação conduzida. O procedimento experimental utilizado é descrito a seguir.

Os parâmetros térmicos e hidrodinâmicos são medidos na presença (Fig. 6a) e na ausência (Fig. 6b) do campo elétrico por um período de tempo controlado. Essas figuras ilustram a Etapa 1 do processo de coleta de dados sob o efeito do campo elétrico, situação em os trocadores de calor A e B são simultaneamente colocados em funcionamento, permanecendo fora de operação o trocador de calor C. Já na Etapa 2, ilustrada pela figura 6b, os trocadores de calor A e B após sofrerem um processo de limpeza são novamente colocados em operação porém na ausência do campo elétrico. Observa-se assim que, em conformidade às configurações indicadas, para fins de comparação mantiveram-se os mesmos trocadores de calor.

O trocador de calor C (também instrumentado) foi mantido como reserva na eventualidade de uma pane em um dos trocadores de calor mantidos sob teste.

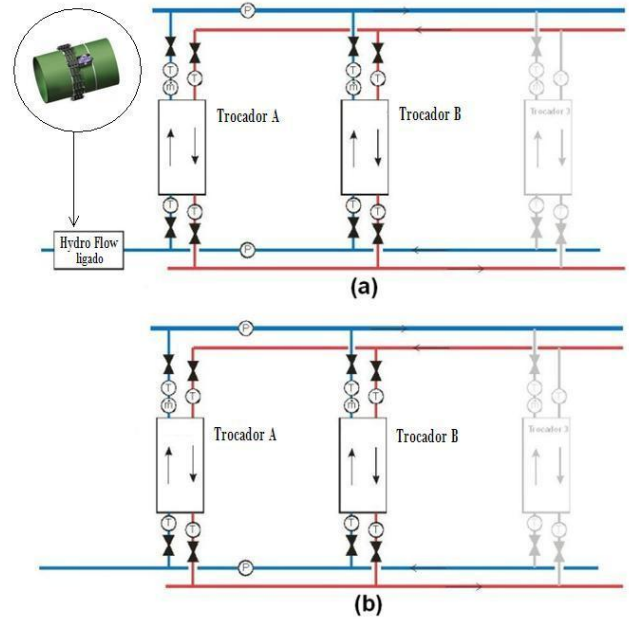


Figura 6 – Procedimento experimental (6a: escoamento excitado por um campo elétrico; 6b: escoamento sem excitação).

Segundo esse procedimento experimental, medições de pressão, temperatura e vazão dos fluidos de trabalho (água e óleo) que circulam nos trocadores de calor parâmetros foram realizadas permitindo avaliar o desempenho hidrodinâmico e térmico dos trocadores de calor na ausência e na presença do campo elétrico utilizado para “excitar o escoamento”.

### III. RESULTADOS

#### A. Avaliação do desempenho hidrodinâmico

Avaliou-se a variação da perda de carga nos trocadores de calor. A queda de pressão é calculada em função dos seguintes parâmetros geométricos e hidrodinâmicos:

$$\Delta P = f \frac{L}{D_H} \frac{G^2 v}{2} \quad (1)$$

Nesta expressão,  $G$  é o fluxo mássico ( $G = \dot{m} / A$ ),  $v$  é o volume específico do fluido,  $f$  é o fator de atrito. Considerando a hipótese estabelecida em [4] de que o fator de atrito em trocadores de calor placas planas possui o mesmo comportamento hidrodinâmico que aquele em tubos é razoável fazer a analogia hidrodinâmica entre esses escoamentos assim admitindo-se que o fator de atrito igualmente atinge um valor constante para elevador regimes de operação (escoamento turbulento).

Na expressão acima  $D_H$  denota o diâmetro hidráulico e  $A$  a área total normal ao escoamento, calculados em (2) a partir dos parâmetros geométricos característicos do trocador de placas planas verticais;  $b$  é a largura da placa e  $B$  o espaçamento entre placas.

$$D_H = 2b \quad A = b \cdot B \quad (2)$$

Retrabalhando (1) e (2) e introduzindo a definição de fluxo mássico nesse resultado é possível mostrar que:

$$\frac{\Delta P}{\dot{m}^2} = f \frac{L}{2D_H A^2} v \quad (3)$$

Obtém assim (3), ou seja, a razão que mede o quociente entre a queda de pressão medida no bocal e o quadrado da vazão da água de resfriamento.

Para o caso de ausência de incrustação (situação logo após a limpeza dos trocadores de calor) é de se esperar que esta razão permaneça constante tendo em vista que os parâmetros geométricos e hidrodinâmicos permanecem inalterados e o regime do escoamento (comprovado pelas medições) é turbulento (i.e.: fator de atrito constante).

A figura 7 resume os dados coletados na ausência e na presença do campo elétrico utilizado para excitar o escoamento. Com base nas medições realizadas foi possível calcular o valor da razão (3) para ambas as situações, na ausência e na presença do campo elétrico. Conforme ilustrado na figura 7, quanto mais o valor deste quociente se desviar de um valor constante (linha horizontal no gráfico), maior será o grau de incrustação. Os dados das medições confirmam, portanto que a condição de escoamento excitado pelo campo elétrico corresponde a uma condição de menor incrustação que aquela sem a ação do referido campo elétrico. Essa constatação foi confirmada para os experimentos realizados em ambos os trocadores de calor estudados (A e B).

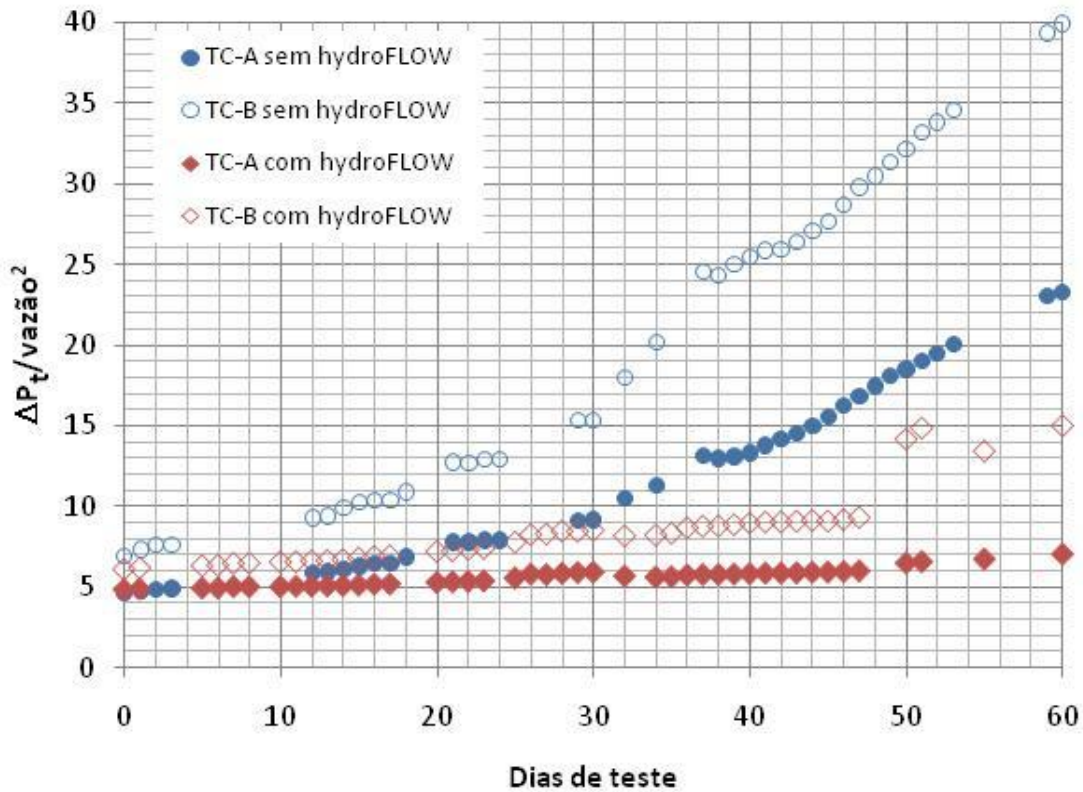


Figura 7. Quociente entre a queda de pressão  $\Delta P$  e o quadrado da vazão da água de refrigeração.

### B. Avaliação do desempenho térmico

Por representar um conceito energético, a avaliação térmica do sistema de trocadores de calor se desenvolveu com base na efetividade do trocador de calor água-óleo. Conseguiu-se, assim, avaliar o desempenho do sistema estudado, na presença e na ausência do campo elétrico aplicado para excitar o escoamento.

A figura 8 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, respectivamente, as condições de entrada e de saída dos fluidos (água-óleo) nos trocadores de calor.

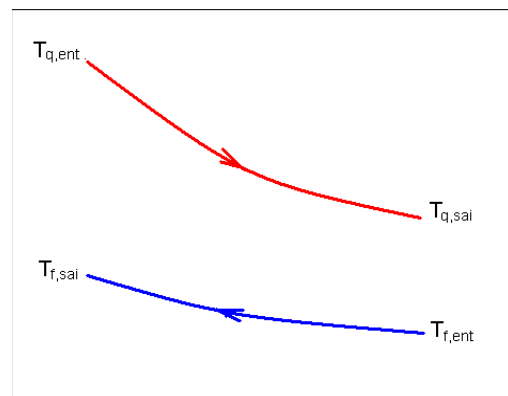


Figura 8. Distribuições de temperaturas do “fluido quente” e do “fluido frio” em um trocador de calor em escoamento contracorrente.

Por definição, a efetividade do trocador de calor [4] 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):

$$\varepsilon = \frac{C_q (T_{q,ent} - T_{q,sai})}{C_{\min} (T_{q,ent} - T_{f,ent})} = \frac{C_f (T_{f,sai} - T_{f,ent})}{C_{\min} (T_{q,ent} - T_{f,ent})} \quad (4)$$

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 do fluido.

À luz dos preceitos teóricos apresentados, a figura 9 sintetiza a análise térmica realizada para avaliar o efeito do campo elétrico na efetividade dos trocadores de calor A e B, definida em (4). Da análise das tendências das curvas apresentadas (medições na presença e na ausência do campo elétrico) fica comprovado o efeito benéfico da ação do sistema utilizado para excitar o escoamento. Conforme documentado pelos na figura 9, a efetividade permanece praticamente constante quando o escoamento é exposto ao efeito do campo elétrico, decaindo na sua ausência.

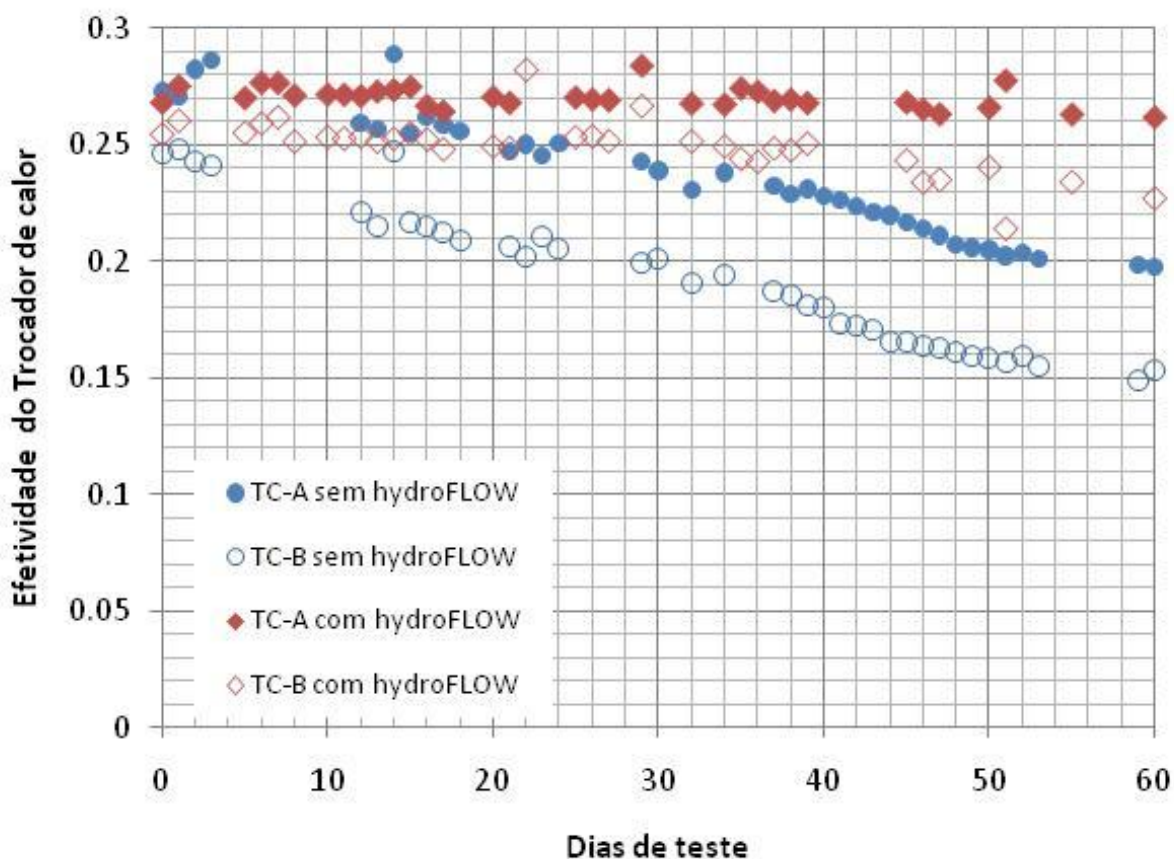


Figura 9. Efeito da exposição do escoamento da água de refrigeração a um campo elétrico controlado na efetividade dos trocadores de calor A e B.

#### IV. ANÁLISE QUÍMICA E BIOLÓGICA DAS ÁGUAS

Resultados da microscopia óptica realizadas nos laboratórios de Química Analítica da Universidade Federal Fluminense (UFF) e do Núcleo de Estudos Limnológicos do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRio) mostram o resultado de análises do material coletado com a presença de flocos orgânicos e inorgânicos. A figura 10, em particular, ilustra cianobactérias filamentosas (aumento de 200x). Outras análises realizadas (figuras 11 e 12) confirmam agregados de crescimento bacteriano, com algas filamentosas (cianobactérias) e algas bacilariofíceas. A figura 13 detalha com aumento de 600x um agregado que caracteriza os flocos predominantes no material analisado assim confirmando a presença de material biológico nas águas que alimentam a usina Fontes Nova.

Resultados pormenorizados da pesquisa sobre os microorganismos detectados encontram-se devidamente documentados em relatórios de desenvolvimento do projeto submetidos à LIGHT [5]. As análises químicas realizadas pelas técnicas de Espectrometria no Infra-vermelho e Espectrometria de emissão por plasma, além de mostrar claramente a presença de óxidos metálicos (resultados esperados) mostrou, também, a presença de material orgânico. Estes são indicativos de microorganismos que podem explicar o indesejável fenômeno de biofouling nos elementos internos dos trocadores de calor dos hidrogeradores, objeto do presente projeto de P&D. Essa constatação foi confirmada pela análise biológica realizada pela técnica de microscopia óptica aplicada à amostra preservada em meio de cultura, então identificando a natureza desses microorganismos. Tal identifica-

ção permitirá, em fase subsequente da pesquisa, propor medidas profiláticas para mitigar esse indesejável efeito que tão drasticamente afeta a eficiência dos sistemas de refrigeração dos hidrogeradores.

Um diagnóstico preliminar das análises realizadas permite concluir que embora a água originária do Rio Paraíba seja “barrenta” e rica em resíduos sólidos, aparentemente essas impurezas não causam obstruções dos trocadores de calor, ao contrário, induzem uma limpeza por abrasão mecânica. Já a água originária do Reservatório de Lajes —embora visualmente cristalina— possui a presença de microorganismos que crescem em colônias de reprodução rápida. Essas obstruções causam danos e perdas de carga severas no sistema de refrigeração, levando quase que a sua obstrução total. Em decorrência, a eficiência térmica e hidrodinâmica dos trocadores de calor ficam fortemente prejudicadas. Em termos práticos, o material identificado é semelhante aos lodos ativamente presentes em estação de tratamento biológico.

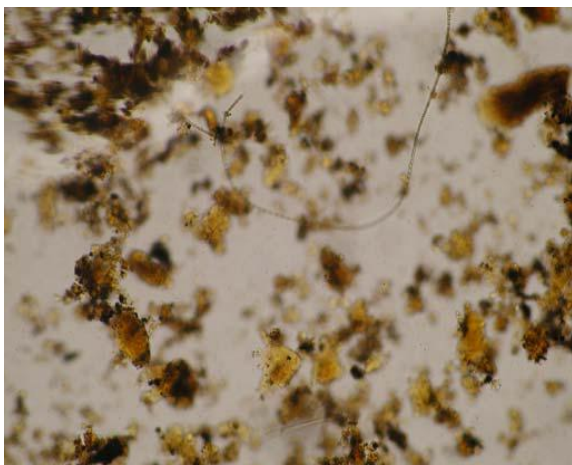


Figura 10. Aspecto geral do material coletado com a presença de flocos orgânicos e inorgânicos e cianobactérias filamentosas (aumento de 200x).



Figura 11. Evidências da presença de microorganismos: hifas de fungos entre os detritos.

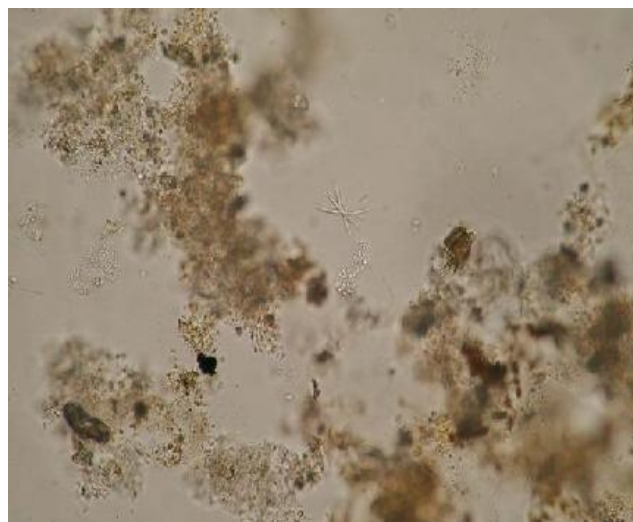


Figura 12. colônias de cianobactérias e algas clorofíceas e detrito amorfo.



Figura 13. Detalhe do agregado biológico que constitui os flocos predominantes no material analisado (aumento de 600x).

## V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Estudos realizados confirmaram a necessidade de implantação de um sistema de medição automatizado capaz de produzir medições em tempo real com níveis de exatidão que permitiram testar a hipótese pretendida. O sistema de medição desenvolvido —que permite registro contínuo de parâmetros térmicos e hidrodinâmicos do escoamento em tempo real— mostrou-se eficaz averiguar o papel do campo elétrico no escoamento como inibidor do mecanismo de *biofouling*. Com base nos resultados obtidos é possível afirmar que, para o caso das águas que abastecem a Usina Fontes Nova e para o sistema estudado (que possui características construtivas muito específicas) a aplicação do campo elétrico reduziu (mas não eliminou) o grau de incrustação formada nas passagens internas dos trocadores de calor. Ou seja, contribuem para a mitigação dos mecanismos de formação de *biofouling* nos trocadores de calor do sistema de refrigeração dos mancais dos hidrogeradores.

O estudo das águas lastreado em análises químicas e bio-

lógicas confirmou que de fato culturas de microorganismos proliferam e constitui-se na causa principal de obstrução dos canais internos dos trocadores de calor.

Como resultado indireto do projeto, destaca-se a cooperação viabilizada por dois projetos independentes de P&D da LIGHT em desenvolvimento pelo Grupo de Metrologia para Qualidade e Inovação da PUC-Rio e pelo Núcleo de Estudos Liminológicos do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRio). Dessa cooperação espera-se avançar o entendimento do complexo problema relacionado ao crescimento de microorganismos que afetam a refrigeração dos mancais dos hidrogeradores.

Como subsídio ao planejamento de desdobramentos da presente pesquisa, e tendo em vista a constatação da presença de microorganismos, recomenda-se:

- Colocar em operação permanente o novo sistema de medição e de monitoramento dos parâmetros térmicos e hidrodinâmicos necessários ao monitoramento do sistema de arrefecimento dos hidrogeradores.
- Pesquisar dados de outros projetos (eg: Bioaqua, em desenvolvimento pela UNIRIO) que estuda microorganismos na fonte primária de água (Represa de Lajes), em diferentes condições de operação do reservatório e em sazonalidades distintas.
- Propor, com base nos resultados, métodos profiláticos adequados para combater o indesejável fenômeno de biofouling que tão drasticamente obstrui a tubulação e os elementos dos trocadores de calor.

O projeto visou estudar o efeito do sistema de excitação do escoamento por um campo elétrico como estratégia de redução do biofouling, ou seja, propor alternativas para reduzir a população de organismos contaminantes.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à LIGHT e à ANEEL pela oportunidade de contribuir, por meio do Programa de P&D, para o desenvolvimento do setor elétrico. Agradecimentos são também devidos aos grupos de pesquisa em Química Analítica da Universidade Federal Fluminense (UFF) e do Núcleo de Estudos Liminológicos do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRio). Em particular os pesquisadores da PUC-Rio desejam registrar o elevado espírito de colaboração da equipe da Usina Fontes Nova que não mediu esforços para colaborar no desenvolvimento do Projeto que viabilizou o presente artigo.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### *Periódicos:*

- [1] T. Vemeiren, "Magnetic treatment of liquids for scale and corrosion prevention," *Corros. Technol.*, vol. 5, pp. 215-219, 1958.
- [2] J. Baker and S. Judd, "Magnetic amelioration of scale formation," *Water Res.*, vol. 30 (2), pp. 247-260, 1996.

### *Livros:*

- [3] A. D. Mercer, *Corrosion in Seawater Systems* (Ellis Horwood Series in Corrosion and Its Prevention), vol. I. Ellis Horwood Ltd, 1990, pp. 53-64.
- [4] H. Martin, *Heat Exchangers*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988, p. 205, ISBN 1-56032-119-9.

### *Relatórios Técnicos:*

- [5] M.N., Frota, E.M. Ticona, J.M.Ticona, J.J. Milon, S.L. Braga, Relatório Final Relatório Final Consolidado do P P&D OKE 06-07 (ANEEL-LIGHT Energia), Tecnologia de Tratamento de água de Refrigeração da Usina Fontes Nova. Projeto desenvolvido pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação da PUC-Rio. Documento interno da LIGHT. Dezembro de 2009.

### *Artigos em Anais de Conferências (Publicados):*

- [6] Y. G. Mussalli and J. Tsou, "Advances in *biofouling* control technologies: US and Japanese perspectives," in *Proc. 1989 Proceedings of the American Power Conference 52*, pp. 1022-1027.

### *Dissertações e Teses:*

- [7] R. C. Ferraz, "Avaliação de sistema alternativo de proteção contra a corrosão em circuito de água de refrigeração," Dissertação de mestrado, COPPE, UFRJ, 2007.

### *Normas:*

- [8] *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 3: Nozzles and Venturi nozzles*, ISO 5167-3:2003, 18 de março, 2003.



### VIII. ANEXO: AVALIAÇÃO DO EFEITO DO *FOULING* NO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para assegurar que o *fouling* presente no sistema não tenha afetado o sistema de medição de vazão, este foi 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. O bocal selecionado para o sistema de medição de vazão se deu em conformidade à Norma ISO 5167-3:2003 [8], que determinou um bocal com coeficiente  $\beta=0,5$  (razão entre o diâmetro do bocal e o diâmetro da tubulação).

Os dados da figura 14 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.

A figura 15 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. Da observação visual do estado do bocal 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 14 (que refletem as medições realizadas) de fato confirmam este fato. Com o bocal sujo o valor lido da vazão mássica foi de  $\dot{m}=2,98$  kg/s; mantido o bocal sujo e realizada a limpeza apenas nos orifícios das tomadas de pressão, o valor da vazão mássica medida man-

teve-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.

Conforme evidenciado pelos dados da figura 14, 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 sistema de perturbação do escoamento tiveram uma duração de cerca de três meses, o que sugere que, para os propósitos da pesquisa, o bocal não requer manutenção sistemática durante o ciclo de medição (erros inferiores a 3,7%).

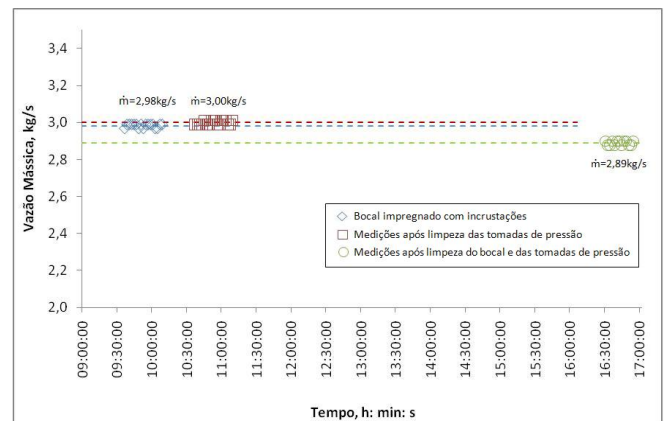


Figura 14. Efeito da incrustação (i) no bocal ASME ( $\beta=0,5$ ) utilizado para medição de vazão e (ii) nas tomadas de pressão (medições de vazão da água de resfriamento do trocador de calor água-óleo).

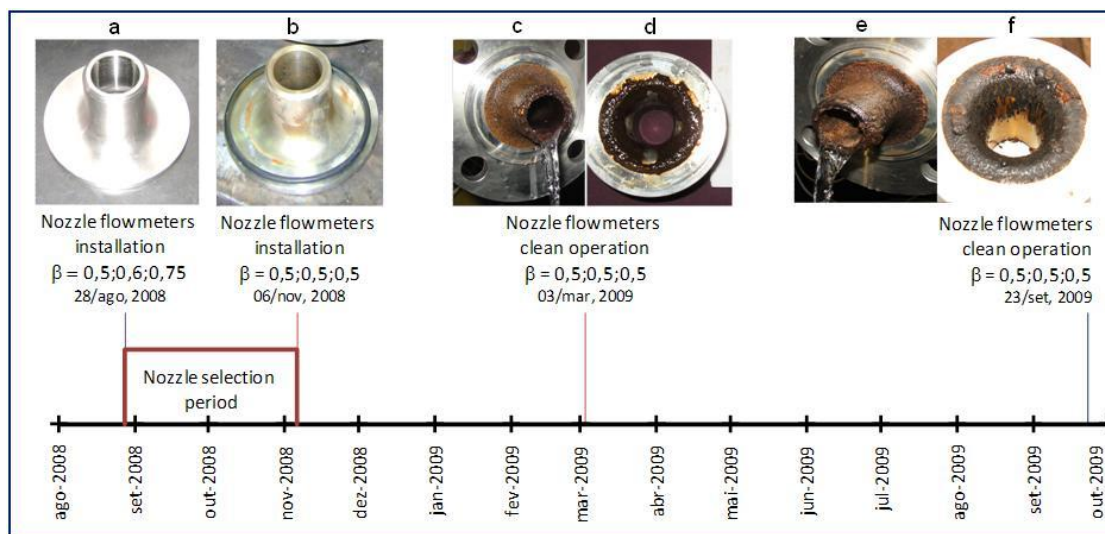


Figura 15. Imagens 15a e 15b: processo de seleção do  $\beta$  mais indicado para o bocal (selecionado  $\beta=0,5$ , experimentos realizados entre setembro a novembro de 2008). Imagens 15c e 15d: medições realizadas com o bocal incrustado (março 03, 2009); Imagens 15e e 15f: replica das medições realizadas após formação da incrustação (setembro 23, 2009).