



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de
2009
Recife - PE

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS – GPT

ABORDAGEM E RECUPERAÇÃO DAS CALDEIRAS 3 E 4 DA UTE SANTA CRUZ

Ângelo Pongeggi Vargas Filho *

Evandro Freire

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

RESUMO

As caldeiras 3 e 4 da Usina Termelétrica de Santa Cruz, com capacidade de tiragem de vapor de 1.470.000 lb/h, foram fabricadas em 1968. No início dos anos 2000, a quantidade de tubos furados aumentou substancialmente, a ponto de impedir a operação das respectivas unidades geradoras. O trabalho apresentará o diagnóstico do problema, o desenvolvimento da especificação técnica para a recuperação das duas caldeiras, os ensaios, as soluções técnicas e o controle de processos e, finalmente, os resultados obtidos, bem como, os custos envolvidos e a economia alcançada quando comparada a uma eventual solução mais conservadora e, portanto, mais dispendiosa.

PALAVRAS-CHAVE

Geração de Vapor, Manutenção, Ensaios, Custos

1.0 - INTRODUÇÃO

A UTE Santa Cruz, situada no município do Rio de Janeiro, está em operação desde 1968. Possui 6 unidades geradoras, sendo as 4 primeiras concebidas para trabalharem com vapor em ciclo Rankine totalizando 600 MW e as 2 unidades restantes em ciclo combinado, agregadas à instalação em 2005 e com 175 MW cada, para operarem com gás natural, mas com possibilidade de gerarem também com óleo Diesel. A capacidade total instalada da usina é de 950 MW.

As caldeiras 3 e 4 da UTE Santa Cruz foram fabricadas em 1968 e entraram em operação em 1974. Estas caldeiras são do tipo aquatubular, radiante e com circulação forçada, possuem uma elevada capacidade nominal de produção de vapor, sendo 1.470.000 lb/h a 2.491 psig de vapor superaquecido a temperatura 1010 °F e 1.290.000 lb/h a 527 psig de vapor reaquecido a temperatura 1010 °F, estando entre as maiores do Brasil.

A partir do final de 1999, ambas as caldeiras passaram a apresentar sucessivas interrupções operacionais não planejadas, provocadas por falhas em tubos de parede d'água. Para se ter uma idéia do problema, apenas a caldeira 4, durante o período que vai do final de 1999 ao início de 2005, esteve sob intervenção 38 vezes, quando, nestas oportunidades, foram detectados defeitos ou falhas e, conseqüentemente, reparados quase 200 tubos. Apesar da lavagem química realizada em 2001, o problema persistiu, tendo apresentado apenas uma breve melhoria. Face ao número crescente e recorrente de falhas, as caldeiras, na prática, ficaram impedidas de operar desde meados de 2005.

De maneira a enfrentar esta situação, FURNAS, a partir de análises fractográficas em uma série de amostras falhadas e ensaios de campo específicos, pesquisou e descobriu a motivação para a freqüente ruptura de tantos tubos. Após a determinação das causas das avarias, FURNAS deu uma abordagem para a questão, a qual levou em consideração diversos cenários relacionados a custo, confiabilidade e disponibilidade operacional das caldeiras.

(*) Rua Real Grandeza, 219 – sala 701 - Bloco A – CEP 22283-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-3185 – Fax: (+55 21) 2528-4057 – Email: ponseggi@furnas.com.br

2.0 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS CALDEIRAS

Fabricante: Combustion Engineering
 Tipo: circulação controlada
 Ano de Fabricação: 1968
 Produção Máxima de Vapor (lb/h): 1.544.000 a 2.620 psig
 Produção Nominal de Vapor (lb/h): 1.470.000 a 2.491 psig
 Pressão de Vapor Principal: 2.491 psig
 Temperatura de Saída do Vapor Superaquecido (°F): 1.010 (543 °C)
 Temperatura da água de alimentação (°F): 477 (247 °C)
 Rendimento Global de Projeto (%): 90,61
 Volume da Fornalha (ft³): 62.700
 Tipo de Superaquecedor: Multi-estágio
 Tipo de Reaquecedor: Multi-estágio
 Tipo de Economizador: Espiral aletado
 Número de Queimadores: 12 (queima tangencial)
 Combustível: Diesel, na partida, e óleo combustível 1B (classificação Petrobras)
 Horas de funcionamento: 96.621 horas

3.0 - MECANISMO DA FALHA E DIAGNÓSTICO

O material dos tubos de paredes d'água das caldeiras é o aço ASTM A210-84a, Seamless Medium-Carbon Steel Boiler and Superheater Tubes. A Figura 1 apresenta o aspecto macro da falha típica.

A microestrutura verificada nos ensaios (1) realizados foi ferrita mais colônias de perlita, exceto na região da falha (afetada pelo calor), onde se constatou ferrita mais bainita. Isto significa que, nesta região o tubo, foi submetido a um tratamento térmico de austêmpera, tendo sido alcançada uma temperatura, na faixa de 780 a 820 graus Celsius, necessária para a completa austenitização da ferrita e, posterior, transformação a uma temperatura menor para a bainita após a ruptura do tubo. Isto significa dizer que a temperatura do tubo de parede d'água alcançou valores superiores a de vapor superaquecido na caldeira.

É sabido que quando se tem água sub-resfriada passando por dentro de um tubo de uma caldeira, a diferença de temperatura entre a parede do tubo e a água em movimento é pequena, face a elevada transmissibilidade do coeficiente do filme, isto significa dizer que o fluxo de calor é mantido de forma estável por este pequeno gradiente de temperatura. No entanto, quando se possui vapor saturado de baixo título, o coeficiente de filme baixa muito, fazendo com que haja um fluxo de calor muito maior e, por conseguinte, uma diferença de temperatura entre a temperatura deste vapor saturado e a da parede do tubo também maior. A proporção que o título do vapor vai aumentando, este gradiente de temperatura vai diminuindo, até que volta a se tornar relativamente pequeno quando o vapor é superaquecido. Mas em casos extremos, quando o fluxo de calor é muito alto, face à formação de um coeficiente de filme instável, o gradiente de temperatura se elevará, a ponto de, teoricamente, provocar a fusão do tubo, mas na realidade o tubo falha antes por perder a sua capacidade de resistir a pressão interna a que está submetido. Por isto, no projeto e na operação de caldeiras, é muito importante garantir o adequado suprimento de água de alimentação do tubo.

Por outro lado, (1) mostra ainda que, nas regiões próximas a fratura, foram observadas microtrincas secundárias com separação intergranular. Tais evidências, segundo (2), permitem caracterizar que a falha se deu por sobreaquecimento do tubo. Por indução, podemos admitir que todos os outros casos de falha em tubos das caldeiras 3 e 4 tenham se dado pelo mesmo processo.

4.0- ABORDAGEM

Face ao exposto e ao fato de que a quase totalidade das falhas situavam-se na região da fornalha, ficou caracterizado que a causa para o sobreaquecimento prolongado foi a má circulação da água na caldeira e a alta temperatura da fornalha.

A formação de depósitos também acarretou falhas por sobreaquecimento, já que a temperatura da parede do tubo aumenta na região onde os depósitos se localizam. A caracterização do diagnóstico levou a ensaios complementares comprobatórios, tais como, medição de vazão mássica por parede (3), inspeção por endoscopia da sujidade dos tubos, com resultados fortemente correlacionados às maiores freqüências de ocorrências de falhas nos tubos. Em vista disto, a abordagem recomendada para a recuperação das caldeiras foi a limpeza

química da caldeira, seguida da recomposição do sistema de combustão e substituição dos tubos danificados da mesma.

5.0 – LIMPEZA QUÍMICA

A intervenção efetuada nos circuitos das caldeiras teve a finalidade de fazer a remoção dos produtos de corrosão depositados nas superfícies internas dos tubos, tais como óxido de ferro, cobre, etc., proveniente dos materiais dos equipamentos do ciclo térmico (4).

A limpeza química visa dois resultados fundamentais:

Obter uma cobertura metálica limpa após a retirada das coberturas não protetoras de óxido ou outros produtos;
Realizar a passivação do metal, formando óxido protetor firmemente aderido a superfície, permitindo condições para estabelecer um regime correto do tratamento químico da água da caldeira

5.1- EQUIPAMENTOS A SEREM LIMPOS

Duas caldeiras aquatubulares, fabricadas pela Combustion Engineering e composta de: paredes d'água, tambor superior e inferior, 2 bombas de circulação de água e seus coletores, e economizador.

5.2- INSPEÇÕES PRELIMINARES EFETUADAS

Foram efetuadas inspeções interna por boroscopia dos circuitos d'água das caldeiras visando conhecer a extensão da oxidação e a presença de corrosão localizada.

Foram efetuadas amostragens de tubos de parede d'água nas duas caldeiras, com retirada de quatro amostras por caldeira para verificação do grau de sujidade existente. Segundo os critérios The NALCO Guide to boiler failure analysis (5) e Mitsubishi Heavy Industries(6), as caldeiras foram consideradas muito sujas, pois apresentaram concentrações de depósitos superiores a 100mg/cm².

Foi realizado um ensaio de medição de vazão(3), por ultrassom, nos tubos coletores das paredes d'água e nas descargas das bombas de água de circulação da caldeira 4. Verificou-se uma diferença entre os valores de vazão dos tubos coletores e também entre os valores totais das paredes. As vazões medidas nas descargas das bombas apresentaram-se uniformes e balanceadas favorecendo um fluxo uniforme nas paredes da caldeira, entretanto, a parede oeste da caldeira apresentou uma vazão 13,0% menor quando comparada com as demais.

5.3 - ESTUDO DE SOLVENTES

Foram retiradas amostras representativas de pontos diferentes para determinar o tipo de produto químico, concentração a taxa de corrosão e sua eficácia na limpeza, em condição estática.

5.4 - METODOLOGIA APLICADA

Circulação pressurizada da solução, para a solubilização, fragmentação de óxidos e produtos de corrosão promovendo o arraste dos materiais insolúveis para o tambor inferior das caldeiras e promover a passivação das superfícies tratadas.

Para tal foi mantida a configuração original do sistema, retirando somente as bombas de circulação das caldeiras com o objetivo de preservação das mesmas, sendo utilizadas bombas externas para a circulação das soluções químicas.

O Superaquecedor, tubulação de vapor principal e tubulação de água de alimentação foram preenchidos com solução de hidrazina, formando um selo d'água para evitar a possível contaminação destes componentes por solução ácida.

5.5 - ETAPAS DO PROCESSO DE LIMPEZA QUÍMICA:

Etapa de carbonatação – Introdução de solução de carbonato de sódio 1% para hidratação das incrustações a serem removidas a 40° C, com posterior abertura do tubulão inferior para remoção de resíduos.

Etapa ácida – Introdução de solução de ácido clorídrico 5% com inibidor de corrosão a 0,15% e ácido fluorídrico (solução de pH 0), para a remoção de óxidos e cobre. Esta etapa é realizada com o metal da caldeira aquecido a 60°C e solução circulando por aproximadamente 8 horas ou até a saturação da solução. Drenagem com pressão positiva de N².

Etapa neutralizante – Eliminação de qualquer vestígio de solução ácida com aplicação de solução de hidróxido de sódio 1% e drenagem posterior. Abertura para inspeção e limpeza dos tubulões superior e inferior.

Etapa complexante de cobre e passivante – Eliminação de todo o cobre remanescente, através da solução de ácido cítrico 1%, circulando por duas horas e posterior elevação do pH para 9,0, através da introdução de hidróxido de amônia 1% circulando por duas horas com a temperatura do metal da caldeira em 45°C.

Etapa secagem, montagem dos componentes internos dos tambores e acondicionamento - A drenagem da caldeira foi efetuada com pressão positiva de nitrogênio.

Durante a execução da limpeza química das caldeira 4 foi necessária a introdução de somente uma carga ácida, e na limpeza da caldeira 3 foi necessária a introdução de três cargas ácidas, devido a ocorrência de vários furos nos tubos de parede d'água ocorridos durante a etapa de introdução de ácido.

5.6 - ANÁLISE QUANTITATIVA DE DEPÓSITO RESIDUAL NOS TUBOS DE PAREDE D'ÁGUA –

Retirada de amostra de tubos após limpeza para verificar a eficiência dos processos.

Tubo n°	Localização	Resíduo (mg/cm ²)	Condição
26 - caldeira 3	Parede leste	0,094	9,4% - limpa
88- caldeira 3	Parede leste	0,077	7,7% - limpa
48- caldeira 4	Parede sul	0,077	7,7% - limpa
40- caldeira 4	Parede oeste	0,081	8,1% - limpa

Utilizando os critérios de avaliação da limpeza, já definidos previamente (5 e 6), após a análise das amostras retiradas, as caldeiras foram consideradas limpas, pois apresentaram valores de concentração de depósitos inferiores a 15mg/cm² e 18mg/cm² respectivamente.

5.7- DESCARTE DOS PRODUTOS QUÍMICOS

Todos os produtos químicos utilizados nas etapas de limpeza química da caldeira, foram drenados para tanques provisórios, neutralizados e posteriormente descartados pela contratada. Para tal foram utilizados 5 tanques de 20 m³ cada, totalizando 100 m³.

5.8 - PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS

Ácido clorídrico 33% - 24.000 kg
 Ácido cítrico líquido - 2.000 kg
 Soda caustica 50% - 24.000 kg
 Hidróxido de amônia - 2.000 kg
 Bifluoreto de amônia - 500 kg
 Carbonato de sódio - 2.000 kg.
 Nitrito de sódio - 1.000 kg
 Inibidor IP 600 - 120 kg.

6.0- RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE COMBUSTÃO

Após FURNAS efetuar uma avaliação de campo detalhada destes sistemas, nas duas caldeira, para levantamento dos defeitos e não conformidades existentes, foram elencados alguns sistemas e/ ou componentes que necessitavam de serviços de manutenção para restabelecimento da configuração original (7).

6.1- PRINCIPAIS OBJETIVOS

A intervenção efetuada no sistema de combustão teve a finalidade de atingir os seguintes resultados fundamentais:

- Restabelecer as condições necessárias para a obtenção de um processo de combustão de maneira satisfatória, conforme parâmetros do projeto, sem a incidência de chama direta sobre os tubos de parede d'água;
- Restabelecer a formação do "Fire ball" , característica do processo de combustão em caldeiras de queima tangencial;
- Ajustar os parâmetros de funcionamento do sistema de óleo combustível da caldeira;
Possibilitar um melhor controle da temperatura da fornalha e do vapor.

6.2 - PRINCIPAIS COMPONENTES SUJEITOS A INTERVENÇÕES

Pré-Aquecedores de Ar Regenerativos;
 Dampers de Ar Primário, Secundário e Dispositivos de Acionamento dos Dampers;
 Direcionadores de Ar de Combustão;
 Sistema de Inclinação dos Queimadores “ burnner tilts “,
 Mecanismos de inserção e retração, Maçaricos;
 Instrumentação aplicada ao sistema de combustão da caldeira;
 Válvulas Hidromotoras dos Queimadores;

6.2.1- Pré-Aquecedores de Ar Regenerativos - Eixo horizontal, marca Lungstron.

Caldeira 3 - Substituição de todas as cestas e selos .
 Caldeira 4 - Cestas em boas condições de utilização e substituição de todos os selos .

6.2.2 - Dampers de Ar Primário e Secundário

Os cilindros foram recuperados por brunimento e montagem de novos componentes internos e os mecanismos de conexão recompostos.
 Os eixos de fixação dos cilindros pneumáticos de acionamento junto ao corpo da caldeira, foram substituídos devido a desgaste e corrosão.

6.2.3 - Direcionadores de Ar de Combustão

Todas as peças componentes do sistema de direcionamento de ar de combustão das duas caldeiras foram substituídos, devido a danos causados por empenamento, corrosão acentuada e falta de material e o funcionamento nestas condições, não permitia a formação do fire ball.
 A Figura 2 ilustra o componente direcionador de ar danificado.

6.2.4- Sistema de Inclinação dos Queimadores “ Burnner Tilts “,

O direcionamento vertical da mistura de ar/combustível e fluxo de ar secundário é ajustado pela movimentação sincronizada dos direcionadores de fluxo de ar e bocais de maçaricos, variando de um ângulo total de 60 graus, ou seja, ± 30 graus com a posição horizontal.
 As quatro unidades de controle da inclinação dos queimadores operam em conjunto, sincronizadas e de forma automática.
 Estes mecanismos são acionados por cilindros pneumáticos posicionados em cada canto da fornalha (elevação inferior de queimadores), e são acionados em conjunto, de forma remota, a partir do painel de controle das UGs .
 Os cilindros foram recuperados por brunimento com montagem de novos componentes internos, e os mecanismos de conexão foram recompostos.

6.2.5- Mecanismos de Inserção e Retração dos Queimadores, Maçaricos.

Cada conjunto de queimador consiste em um cilindro de ar equipado com um pistão de duplo efeito montado em um tubo guia, que permite os movimentos de inserção e retração do queimador.
 Todos os cilindros e componentes internos foram substituídos, pois apresentavam elevada falta de circularidade e empeno, impedindo a livre movimentação, ou seja, a inserção e retração do queimador.
 Os maçaricos foram ajustados em seu comprimento, e todos os cones de chama foram substituídos por apresentarem desgaste excessivo e corrosão acentuada.

6.2.6- Instrumentação.

Substituição de toda a instrumentação de controle do sistema de suprimento e retorno de óleo combustível, óleo diesel e ar comprimido.

6.2.7- Válvulas globo dos queimadores (hidromotoras).

Efetuada a manutenção e testes de estanqueidade de todas as válvulas, incluindo os motores hidráulicos de acionamento das mesmas.

7.0- MEDIÇÃO DE ESPESSURA DOS TUBOS DE PAREDE D'ÁGUA.

Foi realizada a medição de espessura dos tubos de parede d'água da fornalha das caldeiras pertencentes as unidades geradoras 3 e 4 da usina termelétrica de Santa Cruz..

O processo utilizado foi o ultra-som automático contínuo do tipo B - SCAN, e a medição efetuada na face externa dos tubos voltados para o interior da fornalha (8).

Foi considerada a espessura 3,27 mm, como espessura mínima necessária aos tubos de parede d'água, abaixo da qual, os tubos foram identificados para posterior substituição.

Esta espessura permite que a caldeira seja operada com a pressão em 2400 psig, a qual corresponde a 95% da carga nominal.

Caldeira 3 : De um total de 772 tubos somente 15 não apresentaram nenhum ponto com espessura inferior a 3,2 mm. Este valor representa menos de 2% dos tubos.

Caldeira 4: De um total de 772 tubos 415 não apresentaram nenhum ponto com espessura inferior a 3,2 mm. Este valor representa aproximadamente 57% dos tubos.

8.0 – SUBSTITUIÇÃO DOS TUBOS DE PAREDE D'ÁGUA.

Foi efetuada a substituição dos tubos de parede de água danificados da Caldeira nº 04, considerando a espessura limite do tubo de parede d'água igual a 3,20 mm.

Foram substituídos 472 metros lineares distribuídos em 292 tubos nas quatro paredes da caldeira.

Caldeira 3: Serviços ainda não executados e serão contratados futuramente juntamente com a reforma parcial da caldeira.

9.0 – CONTRATOS

Para o desenvolvimento e execução das atividades, FURNAS contratou as empresas relacionadas abaixo para a executar os seguintes serviços:

- ITUC/PUC-RJ - Análise fractográfica de tubos falhados;
- Decapametral Decalagem e Flushing Ltda - Limpeza química das caldeiras 3 e 4;
- KeiTek Equipamentos Industriais Ltda. - Recomposição do Sistema de Combustão das caldeiras 3 e 4;
- ASNDT Engenharia Consultoria e Inspeção Ltda. - Medição de espessura dos tubos de parede d'água das caldeiras 3 e 4;
- NUCLEP Equipamentos Pesados SA - Substituição dos tubos de parede d'água da caldeira 4.

FURNAS utilizou seu pessoal técnico para planejamento e coordenação geral dos serviços e fiscalização.

10.0 - RESULTADOS ALCANÇADOS

Após a conclusão dos serviços propostos, a caldeira 4 foi submetida a um teste de pressão hidrostático, sendo pressão máxima atingida 2000 psig, sem que fosse verificada a ocorrência de furos.

Desde então, a unidade geradora 4 esteve por três vezes em processo de partida, prosseguindo até a fase de rolamento da turbina, porém não ocorrendo o sincronismo da unidade por motivos alheios ao funcionamento da caldeira.

O valor da pressão nominal da caldeira 2400 psig, ainda não foi atingida, uma vez, que a unidade geradora não foi ainda sincronizada ao sistema elétrico.

Uma vez, que já foram atingidos valores de pressão próximo a 1400 psig, sem a ocorrência de furos, acreditamos que, uma vez, sendo atingido o valor de pressão nominal da caldeira, não deveremos ter a ocorrência de furos.

Com relação a caldeira 3, no que refere aos serviços adicionais necessários para a recuperação da mesma, FURNAS, somente iniciará o processo de recuperação após a conclusão dos testes a serem realizados na caldeira 4.

11.0 – ECONOMIA CONSEGUIDA

Em princípio, o cenário proposto para a recuperação da disponibilidade das caldeiras pertencentes as unidades geradoras 3 e 4 é composto dos serviços já descritos.

Os recursos necessários e planejados para a execução dos serviços propostos, foram estimados em R\$ 10.000.000,00, sendo já utilizados R\$ 6.782.864,20 nas duas caldeiras (caldeira 3 - R\$ 2.616.432,10 e caldeira 4 - R\$ 4.166.432,10).

Após os resultados obtidos pela medição de espessura dos tubos de parede d'água da caldeira 3, surgiu a necessidade de se efetuar a troca de todos os 722 tubos, reforma dos dutos de ar de combustão e saída de gases da caldeira, suportes de tubulações principais e chaparia da caldeira. Estes serviços tem um orçamento previsto aproximado de R\$ 14.000.000,00, e serão contratados futuramente.

O custo de manutenção corretiva necessária para recuperar a disponibilidade das caldeiras 3 e 4 será de aproximadamente R\$ 21.000.000,00, o que representa R\$ 52,50/kW (U\$ 22,34/kW), que é atrativo, visto que , serviços similares em caldeiras aquatubulares, já foram realizados na UTE Piratininga SP (1991), a um custo aproximado de U\$ 10,59/KW.

Caldeiras aquatubulares, com mais de 30 anos de operação, baixo índice de disponibilidade, que utilizam óleo combustível, necessitam de um custo de manutenção aproximado U\$13,00/KW/ano para recuperar a disponibilidade para um patamar de 80% (10).

12.0 – CONCLUSÃO

Usinas termelétricas com tempo de operação superior a 35 anos apresentam grande redução de disponibilidade, quando comparada com valores iniciais de projeto, e a decisão de se recuperar a disponibilidade de uma unidade geradora é de natureza econômica, após conclusão dos estudos de viabilidade.

A Usina Termelétrica de Santa Cruz com capacidade instalada de 950 MW, representa uma reserva estratégica de potencia para a região metropolitana do Rio de Janeiro, devido a sua proximidade de um grande centro consumidor de carga.

No caso das unidades geradoras 3 e 4 da usina termelétrica de Santa Cruz, FURNAS optou por atuar na recuperação das caldeiras e substituição dos equipamentos de supervisão das turbinas a vapor.

A vantagem deste tipo de ação programada e localizada é a flexibilidade de implantação das ações conforme necessidade técnica exigida e condições financeiras.

Após a conclusão dos serviços de retubagem da caldeira 3 e serviços adicionais necessários, ambas as caldeiras estarão disponíveis, confiáveis e sem limitação de carga.

13.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.Certificado ITUC 0162/05, Pontifícia Universidade Católica – RJ, junho de 2005.
- 2.Failure Analysis and Prevention, Metal's Handbook, Volume 10, 8th Edition.
- 3.Relatório Técnico Ensaio de Medição de Vazão nos Tubos da Caldeira 4 - USSC.O – FURNAS/ CTE.O.071/2005, novembro de 2005.
- 4.Relatório Técnico Limpeza química das caldeiras 3 e 4 – Decapametel N° 4747 – julho de 2007.
- 5.The NALCO Guide to boiler failure analysis
- 6.Mitsubishi Heavy Industries
- 7.Data Book - Recomposição do Sistema de Combustão das caldeiras 3 e 4.
Kei – Tek CPM03.3283-07 – abril de 2008
- 8.Relatório Técnico Ensaio de Medição de Espessura dos Tubos de Parede D'água das caldeiras 3 e 4.
ASNDT – PE US 001 – janeiro de 2008.
- 10.Steam Its Generation and Use. 40th Edition – Babcock & Wilcox
Editors – S.C.Stults e J.B.Kitto - 1992.



Figura 1 - Tubo parede falhado



Figura 2- Direcionador de ar deteriorado

