



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

BR/GMI/26  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – XII**

**GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO - GMI**

**AS MELHORES PRÁTICAS APLICADAS PARA AS CALDEIRAS, USANDO A METODOLOGIA DO EPRI, NA  
BUSCA DOS BENCHMARKS PARA USINAS TÉRMICAS.**

**Luiz Felipe\***  
**TRACTEBEL ENERGIA**

**Eduardo Cardoso Lima**  
**TRACTEBEL ENERGIA**

**Sebastião Guesser**  
**TRACTEBEL ENERGIA**

**RESUMO**

As falhas em tubos de Caldeiras são mundialmente reconhecidas como a maioria das ocorrências de paradas forçadas nas usinas térmicas.

Os especialistas em engenharia e manutenção de caldeiras da Tractebel têm acumulado dezenas de análises de falhas em tubos de Caldeiras e isso permitiu agregar conhecimento para a Tractebel Energia. As melhores práticas da metodologia do EPRI (*Electric Power Research Institute*) nas ações de longo prazo para a confiabilidade das caldeiras. Os níveis de ação requerem o conhecimento apurado dos mecanismos de dano, a investigação da causa-raiz das falhas e as melhorias propostas para longo período resultam em *benchmarks*.

**PALAVRAS-CHAVE**

Falhas, Caldeiras, Análises, Melhorias, Benchmarks.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho técnico aborda a prática da análise, diagnóstico e ações de melhorias para coibir a recorrência de falhas e em alguns casos, anteciparem-se as falhas conhecendo-se as melhores práticas recomendadas pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*) e pelos especialistas da engenharia de manutenção e das próprias equipes de operação e manutenção do dia a dia. As falhas em tubos de caldeiras atingem valores elevados de perda de disponibilidade, na maioria das usinas. Este arquivo pretende mostrar os aspectos envolvidos nas interpretações dos mecanismos de falhas acompanhados nos últimos anos, as lições aprendidas com as estatísticas das falhas nas Caldeiras do Complexo Jorge Lacerda bem como as ações consideradas melhores práticas para o alcance de levados níveis de disponibilidade e segurança das pessoas e das instalações. Deve-se, por conseguinte, centrar um programa de redução de falhas calcado no conhecimento dos mecanismos de falhas, como estes agem nas caldeiras, buscando a causa-raiz das falhas, as ações imediatas para retorno à operação das unidades e, ações de longo prazo para solução definitiva. Os níveis mais atrativos de benchmark situam-se na faixa de 0 % a 0,5 % de indisponibilidade forçada por furos em tubos de Caldeiras.

## 2.0 - A PRÁTICA DA ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO PARA AS CALDEIRAS

Tem-se observado ao longo destes últimos 20 anos de acompanhamento de falhas nas usinas térmicas que a tendência da maioria das falhas atribuídas as Caldeiras tem sido diferente se comparado com a tendência mundial. O programa de redução de falhas em tubos das Caldeiras, após a associação ao EPRI, através da aplicação de ações proativas, contrariou as expectativas das estatísticas mundiais. De acordo com a mais recente publicação na revista *Power Magazine* sobre o tema (Edição Outubro 2009) as falhas nas Caldeiras dos EUA tem mantido a marca superior a 50 % das falhas das usinas térmicas daquele país.

Na aplicação de ações proativas, os especialistas em Caldeiras entendem que, segundo a metodologia do EPRI, as melhores práticas devem necessariamente considerar os seguintes tópicos:

- Conhecer os mecanismos de falhas (como surgem e como atuam);
- Aplicar uma metodologia de investigação confiável das prováveis causas-raiz das falhas;
- Propor uma solução de longo prazo (inspeções confiáveis, reparos com qualidade e implantação de melhorias).

Paralelamente a estas estratégias é muito importante a disseminação do conhecimento para os envolvidos nas mais diversas áreas relacionadas a Caldeiras e ciclo térmico.

As melhores práticas recomendam que a disseminação do conhecimento deva ser conduzida como um processo de orientação contínua do tipo “um a um” aos times de manutenção.

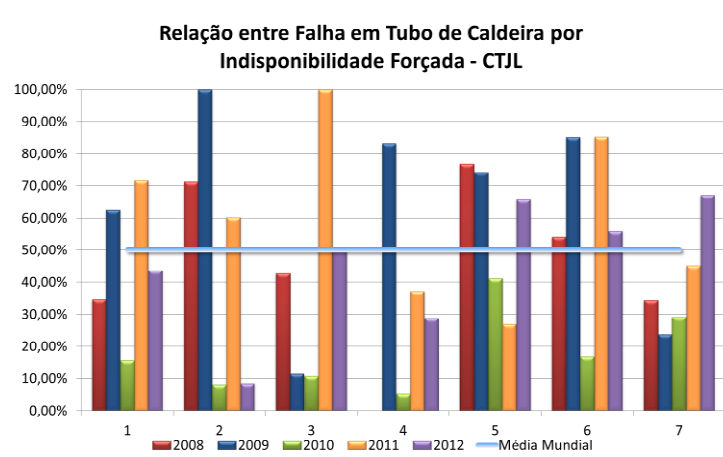
Em 2004, um projeto piloto de MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade) foi aplicado para as Caldeiras e estabeleceram-se, para cada componente das Caldeiras, em função das degradações conhecidas, os intervalos mais adequados de tarefas de inspeção.

A estratégia de proporem paradas anuais com prazos de curta duração para encontrar fatos (degradações), inspeção e executar pequenos reparos foi acordada visando a redução das falhas nas Caldeiras. Uma contribuição reconhecida destas pequenas intervenções foi a possibilidade de melhor planejar as paradas futuras (aquisição de materiais, mão de obra, cronograma, etc..).

Ressalta-se que foi escolhida a unidade 7, a maior planta a carvão da Tractebel Energia (363 MW) para avaliação dos indicadores de desempenho em relação as falhas.

Segundo referência EUCG (Electric Utility Cost Group), ainda vale a estatística mundial para as Usinas Térmicas, ou seja, *“The bad news hasn’t changed: Boiler tube failures are still the leading cause of forced outages in coal-fired boilers”*.

Na figura 1 abaixo se pode observar que ainda persistem as estatísticas internacionais quanto a indisponibilidade forçada devido a furos em tubos de Caldeiras.



**Figure 1:** Relação entre falhas em tubos das caldeiras pela indisponibilidade total da usina.

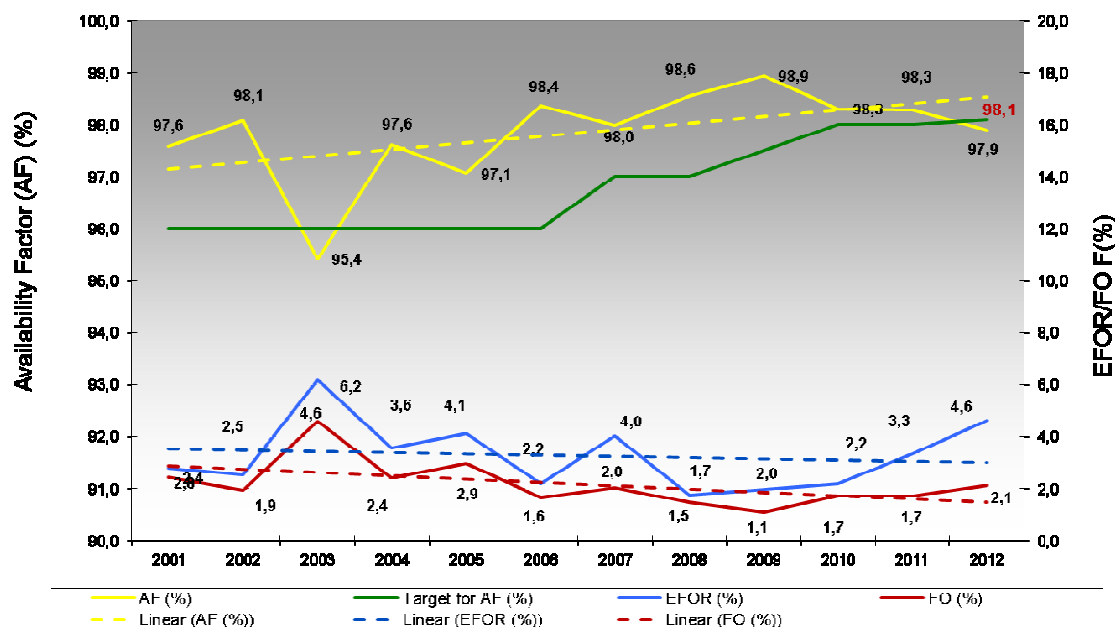
## 2.1 Resumo dos mecanismos de falhas em tubos com maior impacto para a Caldeira 7da UTLC.

Para uma maior visão geral dos mecanismos de falhas de maior criticidade, observe na tabela 1 abaixo, para a principal Caldeira do Complexo Jorge Lacerda, que há uma dispersão de diferentes tipos de mecanismos de falhas atuantes. Através dos programas do EPRI (063 e 064) tornou-se possível investigar e identificar os mecanismos de degradação com menor grau de incerteza. A contribuição do conhecimento desenvolvido foi de suma importância na redução das ocorrências de paradas forçadas nos últimos 15 anos. O histórico das falhas em tubos e suas causas-raiz, também têm contribuído para a aplicação da ferramenta de análise MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade).

**Tabela 1: Dados da Caldeira e histórico das falhas em tubos**

Caldeiras	Potência (MW)	Fornecedor / Fabricante	Falhas em tubos mais significativas e componentes afetados
7 (1996)	1 x 363	D. BABCOCK/ SES Timace	Corrosão-fadiga, Corrosão lado fogo nas paredes laterais do Evaporador, Fadiga térmica no teto do Evaporador e nos tubos de sustentação da parede traseira da fornalha e erosão no SH primário.

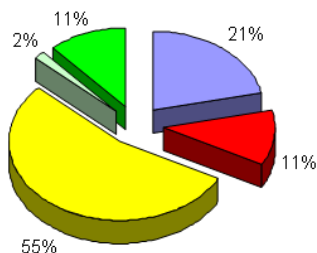
A contribuição das falhas ao longo dos últimos anos teve seu impacto maior nos anos de 2003, 2007 e 2012 em função do aumento do fator de capacidade das unidades geradoras. A figura 2 abaixo ilustra este acréscimo de TEIF (Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada) ou EFOR.



**Figure 2:** Fator de Disponibilidade (AF), Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada (EFOR) e tendências.

## 2.2 Resumo das estatísticas de falhas em tubos para cada grupo de Caldeiras

O gráfico abaixo ilustra as estatísticas de falhas com base no histórico de 10 anos. A distribuição das falhas para cada componente da caldeira foi analisada para cada ocorrência individualmente. Assim, as informações obtidas dos relatórios criaram uma motivação contínua para diagnóstico e prognóstico da caldeira visando definições quanto a futuras inspeções e reparos.



**Figura 3:** Distribuição das falhas por componente e para cada grupo de Caldeira ou individualmente (caso específico da Caldeira 7).

A grande maioria das falhas está concentrada no Evaporador (55%) e nos Superaquecedores (21%).

A Caldeira 7, fornecida pela D. Babcock & SES Tlmace em 1996, após quase 14 anos de operação nos mostra abaixo o histórico de falhas:

- Corrosão-fadiga nas paredes d'água do Evaporador (próximo de ligamentos e amarrações externamente a Caldeira);
- Corrosão lado fogo nas paredes laterais do Evaporador (lado esquerdo e direito);
- Fadiga térmica nos tubos do Evaporador (nos tubos do teto, parte final da parede espiralada e nos tubos de sustentação da parede traseira);
- Paradas programadas para limpeza devido ao depósito excessivo de cinzas no passo intermediário;
- Erosão por sopradores de fuligem no SH primário;

Nas próximas figuras (4 a 7), os mais críticos mecanismos de danos são os relativos a Corrosão lado fogo, Corrosão-fadiga e Fadiga térmica. A maioria das falhas ocorreu no Evaporador (55 %).

Especialmente em relação a Corrosão lado fogo (Figura 4) a melhor prática implantada foi o monitoramento periódico (através de medições por Ultrassom e inspeção visual) para acompanhamento da taxa de corrosão. Foram realizadas análises dos gases para verificação da influência do H<sub>2</sub>S no processo corrosivo.

Ainda, para investigação das prováveis causas foram realizados serviços especializados (pela GE) denominados "RotorProbe™ Testing" para avaliar se havia desbalanço de fluxo de carvão pulverizado entre os dutos dos queimadores. Foi utilizado um desenvolvimento de P&D para instalar placas de orifício de ajuste variável de vazão, visando reduzir as diferenças de fluxo observadas.

Para investigação das prováveis causas deste ataque corrosivo nos tubos, foram instalados termopares do tipo cordal para comparações de temperaturas de metal dos tubos.

Quanto ao subsídio a decisão gerencial quanto a troca de tubos comprometidos foram estimadas as vidas restantes com base na taxa de corrosão (0,5 mm/ano) a partir de cálculos da TRD 508 e formulações de especialistas (D. W. C. Baker et al., Londres) em 1977, da antiga CEGB (Electricity Generating Board). As formulas consideram 02 cenários, um conservador e outro para casos de decisões urgentes com vida requerida de 1 a 2 anos.



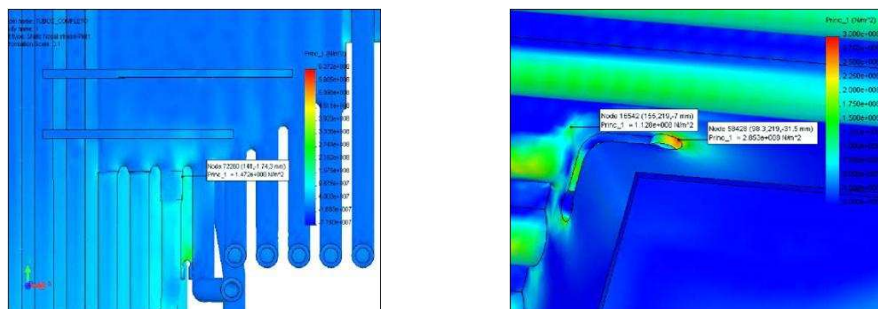
**Figura 4:** Localização predominante das falhas ocorridas devido Corrosão lado fogo.



**Figura 5:** Localização das falhas devido a Corrosão-fadiga

Na figura 5 acima, a ilustração mostra todas as áreas críticas para o mecanismo de dano Corrosão-fadiga. Para as falhas relacionadas as fotos G e D, as melhores práticas, com soluções de longo prazo, consideram a aplicação de ferramentas de análise de tensões, a FEA (*Finite Element Analysis*) para avaliação do surgimento de trincas nas paredes do evaporador, nos tons, caixas de sopradores de fuligem, etc..

Nestas zonas de elevada concentração de tensões foi possível modificar o projeto original e eliminar as falhas frequentes. A figura 6 abaixo mostra as modificações realizadas.



**Figura 6:** Simulações de tensões pela FEA em zonas expostas a tensões cíclicas

Após aplicar estas simples alterações de projeto, nenhuma falha em tubos foi registrada desde 2005.

De acordo com a metodologia do EPRI TR-100455 “Corrosion Fatigue Boiler Tube Failures in Waterwalls and Economizers”, a engenharia da Tractebel Energia aplicou as melhores praticas para monitorar a fadiga e as deformações em ligamentos e amarrações no Evaporador (attachments / buckstays).

A figura 7 abaixo apresenta um exemplo do que se pode realizar através do monitoramento de deformações em pontos de extrema rigidez nas paredes da fornalha. Numa partida da Caldeira 7 conseguiu-se observar os efeitos dos queimadores da fila 1 na deformação da parede traseira da Caldeira as 09:41 h do dia 27/7/2009.



**Figura 7:** Experiências com a aplicação de extensometria para monitorar fadiga e deformações, auxiliando na operação da Caldeira 7.

### 2.3 Melhores práticas de acordo com o Programa de Aumento de Confiabilidade para as Caldeiras

Nos itens seguintes são apresentadas outras ações que constituem estratégias de manutenção das Caldeiras.

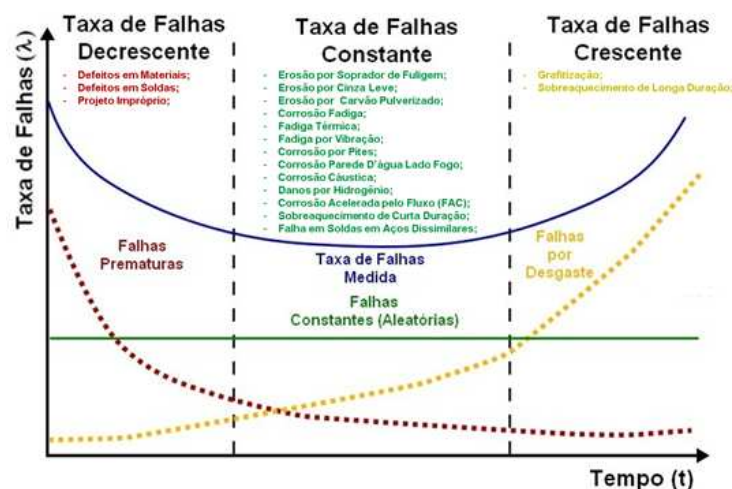
2.3.1) Estratégias para um programa de inspeção de Caldeiras: “Ciclo de três anos de Manutenção com paradas anuais de curta duração para buscar fatos”.

Inúmeras discussões e debates foram desenvolvidos envolvendo conhecedores das Caldeiras. Um dos resultados mais expressivos foi a manutenção dos intervalos de manutenção para 03 anos. Contudo, este período é mantido, condicionado a realização de paradas anuais para inspeção e pequenos reparos nos itens mais críticos das Caldeiras e do ciclo térmico.

A prática mais relevante é a antecipação da detecção dos defeitos objetivando atacar a causa-raiz das falhas ainda na etapa do sintoma observado. Veja na figura 15 abaixo um cronograma de longo prazo apresentando os ciclos de manutenção e as paradas anuais para aumentar a confiabilidade das Caldeiras.

2.3.2) A Avaliação dos mecanismos de falhas na Curva da Banheira para as Caldeiras.

Ao longo da vida das Caldeiras (vide figura 8), as falhas que ocorrem na sua maioria estão situadas na parte central do tempo de vida e podem ocorrer de forma aleatória. Devem-se concentrar os maiores esforços de análise nesta etapa, ou seja, entre 5 a 20 anos de operação da Caldeira. No final da vida, as revitalizações são definições gerenciais que acabam por contribuir na forma da troca plena de determinados componentes e isso prolonga a vida da mesma.

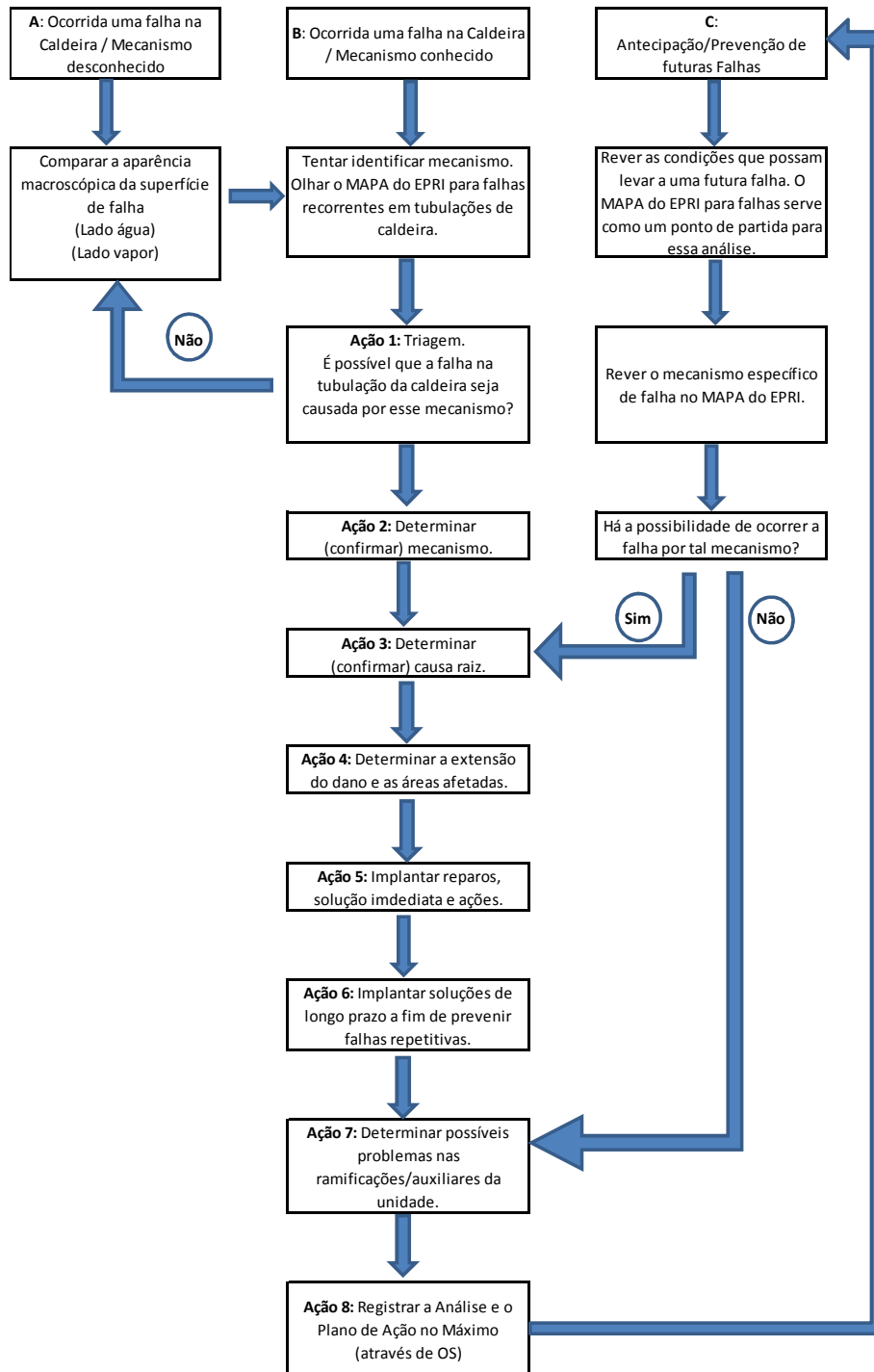


**Figure 8:** Mecanismos de Falha vivenciados na “Curva da Banheira” das Caldeiras.



### 2.3.3) Programas do EPRI (063: Redução de falhas em tubos & 064: Melhorias no ciclo químico da água/vapor)

O fluxograma abaixo apresenta as etapas as quais permitirão a correta identificação do mecanismo de falha, avaliação, solução e antecipação das falhas em tubos das caldeiras.



O EPRI recomenda que as etapas não devam ser suprimidas já que as análises e os diagnósticos de caldeiras dependem de cada passo a ser seguido. A credibilidade das informações das inspeções, reparos e propostas de melhorias dependem fundamentalmente das análises apuradas. Devem-se levar em conta todas as formas de registro dos eventos para quaisquer tipos de falhas, desde as recorrentes até as falhas inéditas.

A aplicação destas melhores práticas para cada tipo de falha ocorrida tem evidenciado a detecção de problemas e o aumento considerável do conhecimento em torno dos mecanismos de falhas.

As melhores práticas advindas do EPRI desde 1996 (do livro EPRI CS 3945 - *Manual of Investigation and Correction of Boiler Tube Failures*) têm contribuído para o domínio do conhecimento das falhas em tubos.

Após 2007, a Tractebel se tornou uma das empresas na América do Sul a aderir aos programas do EPRI e isso tem agregado valor na busca de marcas históricas atingindo indicadores próximos aos de *benchmark*.

Através de ações conjuntas de equipes de Operação, Engenharia e Manutenção, trazem os resultados atrativos de desempenho das Usinas Térmicas.

### 3.0 - CONCLUSÃO

Após terem sido apresentados os mais relevantes mecanismos de falhas em tubos das Caldeiras e associados reforça-se que sempre haverá oportunidades de aprendizado para as diversas áreas do tema. As especialidades de inspeção reparos e análises (diagnósticos e prognósticos) devem sempre atentar para o que há de mais moderno no assunto. A própria associação aos programas do EPRI estimula as ponderações que frequentemente são feitas em prol do aumento de disponibilidade e segurança das Caldeiras. Os indicadores de desempenho para a maioria das Caldeiras evidencia que reparos adequados, investimentos oportunos e ações de melhoria através de soluções de longo prazo trazem resultados apreciáveis. No caso da Caldeira 4 da UTLA, a mesma operou 9363 horas ininterruptas sem Falhas e esta marca já é importante se comparada com o Record mundial citado no *Guinness Book of Records edition 1997* para a UTE Maasvlakte – Unidade 1, Holanda, a qual atingiu 13.000 horas sem falhas.

Outro indicador de sucesso é a indisponibilidade forçada devido a falhas em tubos de Caldeira (EAL) em 2009 que foi de 0,48 % para a Caldeira 3 e 0,46 % para a Caldeira 7. Estes níveis de desempenho posicionam-se no patamar do benchmark internacional.

A compreensão deste tema pelos envolvidos na manutenção e operação de Caldeiras deve ser continua e focada no conhecimento dos mecanismos de falhas atuantes (susceptíveis para cada componente e cada região da Caldeira e mesmo externamente a esta), numa metodologia confiável para a investigação da(s) causa(s)-raiz e finalmente recomendar a soluções duradouras de redução dos defeitos ou falhas detectadas. Consequentemente, os melhores resultados de O&M serão facilmente atingidos, continuamente.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FLOW-ACCELERATED Corrosion in Power Plants. TR-106611-R1, EPRI;
- STEAM, its Generation and Use. Babcock & Wilcox, 40<sup>th</sup> Edition. p. 31-1, 31-4;
- DOOLEY, R.B.; CHEXAL, V.K. - EPRI - Flow-Accelerated Corrosion. In: NACE CORROSION, paper #347., 1999;
- NR-13. In: Norma Regulamentadora do M.T.E., Portaria n.23, 1995;
- Software MÁXIMO<sup>®</sup> e S.A.U: Banco de dados da Gestão da Manutenção e Acompanhamento da Operação. Tractebel Energia S/A;
- JONES, R.B. Risk-Based Management, 1995;
- Apresentação de Luiz Felipe no XIX SNPTEE, 2007 – Rio de Janeiro - RJ;
- Banco de dados de estatísticas do NERC (*North American Electric Reliability Corporation* / [www.nerc.com](http://www.nerc.com)), 2009 e ABRAGE 2009 (CDE = Comissão de Desempenho de Equipamentos) / [www.abrage.com](http://www.abrage.com);
- Estimating the residual lifetime for Waterwall exposed to fireside corrosion (D. W. C. Baker et all., Londres), 1977, CEGB (Electricity Generating Board).
- EPRI TR-100455 “*Corrosion Fatigue Boiler Tube Failures in Waterwalls and Economizers*”;
- EPRI CS 3945 - *Manual of Investigation and Correction of Boiler Tube Failures*;