



GPT/022

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO II
GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS-GPT

**PESQUISA APLICADA AO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E VIDA
RESIDUAL DE TUBOS DE CALDEIRAS**

Luiz Felipe* / Sérgio Roberto Maes / José Piotrovski Neto – GERASUL S/A
Antônio C. R. Nogueira / Edson Bazzo / Rafaela Frota Reinaldo / Pedro Bernardini / Eleandro R. Bueno – UFSC
Heloisa C. Furtado – CEPTEL
Frantisek Gnyp – SES TImace

RESUMO

O trabalho objetiva o estabelecimento de uma metodologia que permita simular o efeito de diferentes cenários de operação de uma caldeira sobre o campo de velocidades e perfil de temperaturas, visando subsidiar a tomada de decisões quanto a ações que minimizem a indisponibilidade causada por fluência e especialmente por fadiga térmica nos componentes da unidade geradora de vapor. Uma avaliação preliminar dos campos de velocidade e temperatura, bem como investigações das condições metalúrgicas atuais dos componentes vêm sendo conduzidas de forma a propiciar meios de se detectar os mecanismos de falhas destes componentes e os parâmetros físicos que os influenciam. A instalação de controladores de fluxo de vapor é apresentada como uma solução alternativa para equalização de temperaturas e redução dos seus níveis ao longo dos componentes, acarretando uma readequação dos parâmetros operacionais. As soluções relativas ao processo operativo das Caldeiras também estão incluídas nos estudos visando reduzir os gradientes térmicos nos superaquecedores e reaquecedores.

PALAVRAS-CHAVE

Caldeiras, Superaquecedores, Reaquecedores,
Redistribuição Fluxo Vapor – Vida Útil Residual

1.0 - INTRODUÇÃO

A participação de usinas termelétricas inicia um processo de expansão com tendência de nos próximos anos representar 20% da energia elétrica gerada no Brasil. Com base em um cenário de crescimento médio previsto de consumo de energia no País, novos projetos estão em desenvolvimento de modo a permitir aumentar a oferta de energia. O Programa Prioritário de Termelétricas, recentemente lançado pelo governo federal, tem o propósito de aumentar a oferta de energia no País em mais de 15.000 MW até 2003. As novas usinas que estarão situadas em 18 estados brasileiros vão alterar a matriz energética, aumentando a geração de energia de origem térmica e consequentemente o grau de comprometimento das instalações térmicas.

Objetivando garantir confiabilidade operacional das termelétricas, há que se efetuar melhorias nos componentes que possam comprometer a disponibilidade de geração das unidades geradoras. Estes componentes pertencem as caldeiras e que historicamente são responsáveis pela maior parte das indisponibilidades forçadas, ou seja, valores acima de 50 % das falhas estão relacionadas aos tubos de caldeiras (16)(17)(20)(21).

2.0 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

* DP/CMS/CMSP - Av. Paulo Santos Mello S/Nº, Capivari de Baixo - SC, CEP 88745-000
Fone: (0 XX 48) 621 4067, Fax: (0 XX 48) 621 4007, E-mail: lfelippe@gerasul.com.br

Na Figura 1 é mostrado o esquema da unidade geradora de vapor, correspondente à unidade 6 da Usina Jorge Lacerda, localizada em Capivari de Baixo – SC. De acordo com a Figura 1, a unidade geradora de vapor consiste de uma caldeira aquotubular de circulação natural a carvão pulverizado, três superaquecedores, dois reaquecedores e um economizador. O vapor deixa o superaquecedor final a uma pressão de 122 bar e temperatura de 515 °C. No reaquecedor final, a pressão de trabalho é da ordem de 26 bar, para mesma temperatura do vapor. O carvão pulverizado é transportado de quatro moinhos com o auxílio do ar primário, para o interior da câmara de combustão, onde é queimado sob temperaturas acima de 1300°C. Os gases de combustão se deslocam na direção do superaquecedor final e reaquecedores localizados na saída da câmara de combustão, conforme apresentado na Figura 2. No caso específico da Usina Jorge Lacerda, estes são os componentes que apresentam maiores problemas de fadiga térmica. Nas unidades em operação há um gradiente térmico (1) acentuado na direção transversal ao escoamento principal dos gases de combustão, conforme apresentado na Figura 3, com temperaturas acima dos valores admissíveis de projeto, provocando paradas freqüentes e reduzindo a vida útil da instalação.

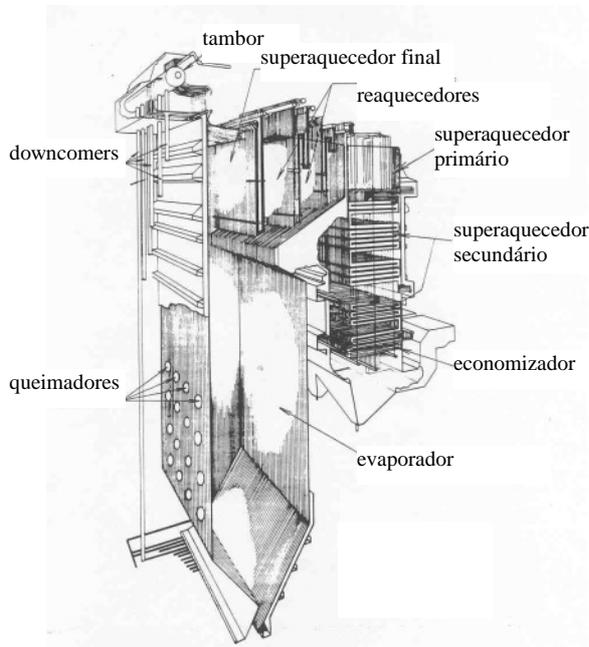


FIGURA 1- Caldeira e seus componentes

A ocorrência freqüente de falhas nos tubos do superaquecedor final e reaquecedores localizados na região de saída da câmara de combustão têm causado prejuízos às centrais termelétricas. No sentido de

resolver o problema, os especialistas de manutenção da GERASUL S/A e SES Tlmacé (22)(24) vêm coletando regularmente amostras destes tubos. Participando deste esforço o Laboratório de Materiais da UFSC (Labmat) vêm realizando estudos (2-5), bem como o CEPTEL (19) com o propósito de identificar alterações importantes nas características do metal e causas de falhas nestes tubos. Pesquisa vem sendo desenvolvida de forma a também determinar a vida útil residual da instalação.

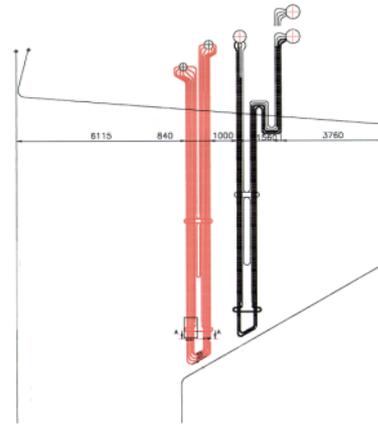


FIGURA 2- Superaquecedor e reaquecedor finais

De forma a verificar o nível de temperatura nos feixes tubulares do superaquecedor final e reaquecedores, medições foram realizadas pelos técnicos da Gerasul. Na Figura 3 é apresentado o gráfico dos valores medidos de temperatura dos tubos do reaquecedor finais da unidade 6 da usina Jorge Lacerda. As medições foram realizadas na primeira fila de tubos em região não atingida pelos gases da combustão.

É observado na Figura 3 um gradiente térmico acentuado na direção transversal ao escoamento principal, com uma diferença de temperatura de até 80 °C entre a região externa e central do feixe tubular, sendo a última próxima a 540 °C. Esse gradiente de temperatura acentuado sugere uma transferência de calor não uniforme nos feixes tubulares.

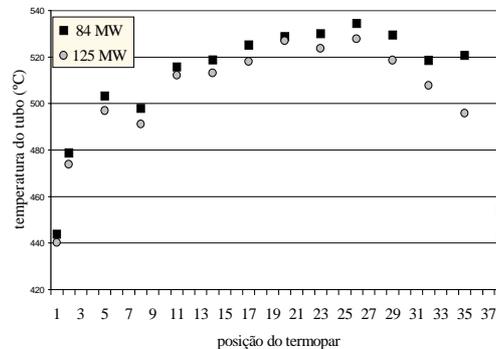


FIGURA 3- Temperatura medida nos tubos do reaquecedor final

3.0 METODOLOGIA PROPOSTA

Como solução imediata para resolver o problema causado pelo gradiente de temperatura, controladores de fluxo de vapor estão planejados para instalação no superaquecedor final e reaquecedores das unidades 5 e 6 da UTLB e/ou alterações no processo operacional da caldeira. A metodologia proposta para cálculo do campo de temperatura fornecerá informações valiosas para uma melhor definição dos controladores de fluxo (15) nas diversas fileiras dos feixes tubulares. A metodologia consiste na simulação numérica do processo de transferência de calor no interior da fornalha e na região de passagem dos gases de combustão, utilizando recursos computacionais e analíticos a fim de obter a análise do comportamento hidrodinâmico e térmico na região estudada.

Quanto a análise de perda de carga do fluxo de vapor superaquecido e reaquecido também a pesquisa prevê este tópico. Como exemplo, a figura 4 a seguir, apresenta a ligação quanto a fluxo entre as tubulações de vapor reaquecido final, tanto para entrada como para a saída de vapor, considerando o projeto original de perda de carga (14).

Legenda:

- p_t – perda de carga (pressão) nos tubos;
- p_e – perda de carga no coletor de entrada;
- p_s – perda de carga no coletor de saída;

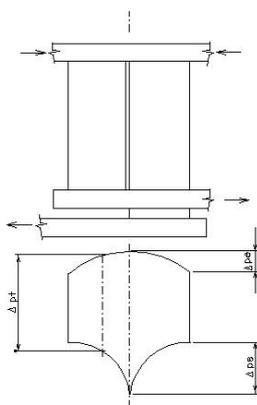


FIGURA 4 - Fluxo e perdas de carga do vapor reaquecido.

De forma a validar a simulação numérica, resultados teóricos serão comparados com dados experimentais disponíveis na planta. A partir do campo de temperatura obtido na simulação será então calculada a vida residual dos tubos dos superaquecedores e reaquecedores.

A metodologia proposta inclui testar a caldeira sob diferentes condições de carga e arranjos na disposição

dos queimadores para otimização do processo de transferência de calor.

Em relação a não uniformidade para as temperaturas do vapor pode-se observar a não uniformidade de temperaturas dos gases e do ar de combustão para os queimadores. Estes parâmetros devem ser simulados e posteriormente comparados com as temperaturas de metal e vapor do superaquecedor e reaquecedor.

Faz-se necessário destacar também que a uniformidade da combustão e o preciso ajuste dos queimadores são essenciais para obter as emissões de NOx e CO mínimos.

Através da otimização do processo de transferência de calor e do processo de combustão se pode melhorar também, em consequência, o rendimento da caldeira.

4.0 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Com o intuito de se obter um maior entendimento dos parâmetros que influenciam os níveis, bem como o gradiente de temperatura, se faz necessário obter os campos de velocidade e temperatura na região dos superaquecedores e reaquecedores finais. O campo de velocidade se faz necessário porque ele atua no mecanismo de troca de calor por convecção entre os gases de combustão e a parede externa dos tubos destes componentes de unidades geradoras de vapor (6). Já os campos de temperatura, estabelecerão os níveis de temperatura absoluta nas paredes externas dos tubos, bem como nos gradientes transversais de temperatura, aos quais estes últimos estarão sujeitos. Para a obtenção dos campos de velocidade e temperatura será necessário simular a dinâmica do escoamento dos gases de combustão e a transferência de calor com as paredes da caldeira e feixes tubulares (7). Com essa finalidade, uma simulação numérica será realizada utilizando um algoritmo computacional disponível comercialmente seguindo as seguintes etapas:

- Definição de malha e simulação do escoamento, na ausência de combustão, feixes tubulares e transferência de calor, de forma a caracterizar a o escoamento principal dos gases;
- Simulação do escoamento na presença dos feixes tubulares do superaquecedor final e reaquecedores, sem transferência de calor e sem combustão, nesta etapa será analisada a influência dos feixes tubulares sobre o escoamento principal, identificando a zona de influência de perturbação, verificando a possibilidade de se utilizar, a condição de escoamento localmente parabólico como hipótese simplificativa;
- Simulação do escoamento, na presença dos feixes tubulares do superaquecedor final e reaquecedores,

com transferência de calor, sem combustão, permitindo a determinação inicial dos campos de temperatura e identificando os gradientes de temperatura na região estudada;

- Simulação do escoamento real, levando em conta também o processo de combustão, obtendo-se uma distribuição de temperaturas no interior da fornalha e possibilitando avaliar a influência de carga dos queimadores no campo de temperatura na região estudada.

5.0 VIDA ÚTIL RESIDUAL

Em geral, superaquecedores e reaquadecedores estão sujeitos às seguintes degradações ao longo do tempo de operação: erosão da parede externa, oxidação da parede interna e alterações microestruturais do material (8-10) pois a temperatura possibilita ocorrência de difusão atômica e, conseqüentemente, fluência. Por sua vez, a fluência é um dos fenômenos considerados no projeto e na manutenção (avaliação de integridade) dos tubos de superaquecedores e reaquadecedores.

A fluência se caracteriza pela ocorrência de deformação contínua, ao longo do tempo, sob tensão abaixo do limite de escoamento quando a temperatura é suficiente para promover mobilidade atômica (11). A Figura 5 ilustra a evolução da deformação ao longo do tempo sob diferentes tensões, indicando que o aumento da tensão e/ou temperatura reduzem o tempo de vida.

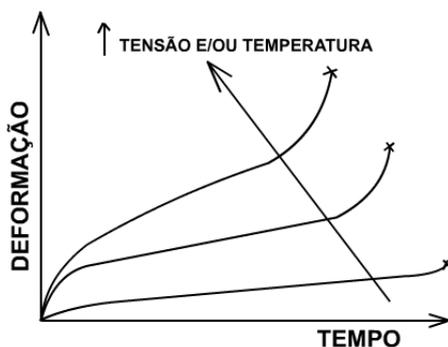


FIGURA 5 -Curva deformação ao longo do tempo.

Existem diferentes equações constitutivas e parâmetros estimadores da vida sob fluência. A Figura 6 ilustra uma delas, conforme apresentado em Viswanathan (8), relacionada ao parâmetro de Larson-Miller (LMP)

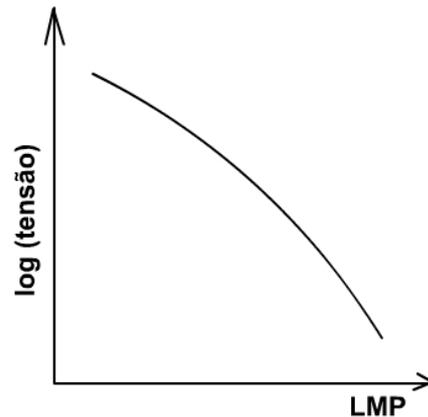


FIGURA 6- Relação entre tensão e LMP

No caso em estudo, o parâmetro de Larson-Miller (LMP) é correlacionado pela seguinte função da temperatura (T) e tempo (t):

$$LMP = T.[20 + \log(t)]$$

Analisando-se em conjunto a equação acima e a figura 5 constata-se que pequenas variações de tensão ou de temperatura de operação afetam intensamente o tempo de vida (11).

Os valores de tensão são determinados pela pressão de trabalho e dimensões do tubo, sendo que o diâmetro externo e interno variam ao longo do tempo devido à erosão externa e oxidação interna, resultando em uma contínua redução da espessura de parede do tubo. Portanto, a erosão e a oxidação provocam uma elevação contínua da tensão atuante (11).

Por outro lado, a redução de espessura de parede associada ao aumento da espessura de camada óxida interna provoca também uma elevação de temperatura no tubo ao longo do tempo.

Assim, uma das fontes de erro de estimativa de vida residual consiste na imprecisão de caracterização dos valores de tensão e temperatura em diferentes pontos da tubulação ao longo do tempo.

O modelo de estimativa de vida residual atualmente em desenvolvimento pretende reduzir tais fontes de erro mediante a utilização dos valores de temperatura e campos de velocidade (particularmente os coeficientes de transferência de calor) resultantes da simulação numérica descrita no item anterior, para se estabelecer o perfil de temperaturas ao longo da parede do tubo.

Adicionalmente estão sendo incorporadas ao modelo, equações constitutivas da cinética de oxidação interna e erosão externa (baseados em dados obtidos da planta industrial) visando refinar as estimativas quanto à evolução da tensão e do perfil de temperatura na parede ao longo do tempo.

Diante destas estimativas mais refinadas da evolução de temperatura e tensão, calcula-se a fração de vida consumida de um dado local da tubulação, em intervalos de 4 meses, para estabelecer a vida consumida até o presente tempo de operação (9). Neste estágio, o modelo é aferido mediante dados coletados na planta (oxidação e erosão) e valores de literatura (13) para ajustes finais, quando então finalmente se estima a vida residual dos componentes (considerando a futura perda de espessura por erosão e oxidação)(18).

Para aferição global do modelo, o resultado da estimativa de vida residual será confrontado com resultados de testes acelerados de vida sob fluência realizados em tubos extraídos de serviço (12).

6.0 RESULTADOS ESPERADOS

Os resultados obtidos com a simulação numérica permitirão avaliar o processo de transferência de calor nas regiões críticas da unidade geradora de vapor e diagnosticar os perfis de temperatura resultantes de diferentes cenários de operação dos queimadores. Por sua vez o modelamento da vida residual resultante de cada perfil de temperatura permitirá estabelecer qual o efeito de cada cenário de operação na vida residual da tubulação. Em termos globais, espera-se definir um arranjo adequado de operação, que leve em conta um nível aceitável de temperatura (vida residual) na região do superaquecedor final e reaquadecores. Isto inclui testar diferentes tipos de carvão sob diferentes condições de operação. Nestas circunstâncias, se o desenho atual da câmara de combustão e a disposição dos feixes tubulares permitir uma uniformização das temperaturas no plano de passagem dos gases de combustão, não haverá necessidade de instalação de controladores de fluxo de vapor nos tubos, conforme solução inicialmente proposta por empresas consultoras. Na pior das hipóteses, controladores de fluxo serão instalados, mas em novo cenário, já com um gradiente de temperaturas menos acentuado, com as medidas sugeridas pelo resultado numérico. Com o aumento da capacidade de geração, através da almejada repotencialização (23), torna-se imprescindível uma análise da questão da utilização dos redistribuidores de fluxo de vapor.

O campo de temperatura encontrado será importante para determinar a vida útil residual dos componentes mais críticos da unidade geradora de vapor. Resultados preliminares indicam a possibilidade de que uma redução da temperatura máxima em 15 °C permite uma extensão da vida residual dos tubos entre 50 e 100 % sob distintas condições de oxidação e erosão.

7.0 CONCLUSÃO

A metodologia proposta para avaliação do campo de velocidades e de temperatura irá proporcionar as informações requeridas para estimar a vida útil residual de componentes diversos de unidades geradoras de vapor que operem com carvão, óleo, biomassa ou a gás natural.

As medidas que vierem a ser adotadas para prolongar a vida útil dos componentes de caldeiras de centrais termelétricas terão reflexo imediato no aumento da disponibilidade de geração termelétrica e redução nos custos com operação e manutenção do equipamento.

8.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) DAIL, R. L.; KUNTZ, Todd A. **APTECH: Tube Alert Inspection of the Unit 6 Boiler Finishing Superheater and Reheater Tubing at GERASUL's Jorge Lacerda Plant.**, USA. Aptech: September 2000. 30p. (Relatório Técnico).
- (2) BERNARDINI, P.A.N. e BUENO, E.R. **Análise de falha em tubos de superaquecedor final da caldeira 5.** Florianópolis. UFSC. LABMAT. Jul/1999. 12 p.
- (3) BERNARDINI, P.A.N. e BUENO, E.R. **Análise de resultados de inspeção e de estimativas de vida residual em tubos de superaquecedor final e reaquadecor da caldeira 6.** Florianópolis. UFSC. LABMAT. Out/2000. 6 p.
- (4) BERNARDINI, P.A.N. e BUENO, E.R. **Análise de falha em tubo do reaquadecor final da caldeira 5.** Florianópolis. UFSC. LABMAT. Dez/2000. 12 p.
- (5) BERNARDINI, P.A.N. e BUENO, E. R. **Avaliação de integridade em tubos de reaquadecor final da caldeira 5.** Florianópolis. UFSC. LABMAT. Fev/2001. 16 p.
- (6) ZUKAUSKAS, A. **convective heat transfer in cross flow.** In: Handbook of single-phase convective heat transfer. John Wiley & Sons, 198.
- (7) MALISKA, C.R., **Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** Livros Técnicos e Científicos, 1995.
- (8) VISWANATHAN, R. **Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components.** USA: ASM International, 1989. 497 p.
- (9) FRENCH, D.N; **How to Avoid Problems with superheaters and reheaters.** Riley Stoker Corporation. USA. 21 p.

- (10) ASM. Failure Analysis and Prevention. ASM Handbook, Vol.11, Ohio. USA. 1995. v.11. 9th Ed. 1995. 843 p.
- (11) HERTZBERG, R.W.; **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**, 4th Ed. USA: John Wiley & Sons, Inc. 1996. 786 p.
- (12) RAY, A.K et al. Residual life prediction of service exposed main steam pipe of boilers in a thermal power plant. **Engineering Failure Analysis**. n.7, p.359-376, 2000.
- (13) MEURONEN, V. **Ash Particle Erosion on steam boiler convective section**. Finland, 1997, 149 p. Thesis (Doctor of Technology), Lappeenranta University of Technology.
- (14) SLOVAK TECHNICAL STANDARD STN 07 0415 Calculation of temperature of wall pipe of heat surfaces.
- (15) CLARK K., LEE C., HARA K., LEFTON S., "**Redistribute steam to extend boiler-tube life**", April 1990, Power, Aptech Engineering Services Inc.
- (16) DOOLEY R.B, "**A Vision for Reduction Boiler Tube Failures**", Parts I and II, Power Engineering, Vol. 96, N^{os} 3 and 5, March/May 1992, pp33-37/pp41-42.
- (17) "**Manual for Investigation and Correction of Boiler Tube Failures**", EPRI, CS - 3945, 1985.
- (18) SIDEY D., "**Utility Plant Life Assessment as a Continuous Procedure**" - Ontario Hydro - Central Thermal Services - Canada.
- (19) Relatório "**Microstructural Analysis by Replicas from Steel Components of Unit 6 - Jorge Lacerda III power plant**" - CEPEL, 1997/98.
- (20) DIMMER J.P., "**Maintaining Availability of Fossil Plants through a Formalized Approach to Boiler Tube Failure Prevention**", Materials Evaluation/48/Jan-90, pp. 17-25.
- (21) DESPUJOLS A., VERAGHE S., BETHMONT M., CHEVREAU G., "**RCM applied to the boiler of a coal-fired power plant**", EDF, '99 EPRI Maintenance Conference, June 1999.
- (22) FELIPPE L., "**A análise das falhas de tubos de caldeiras e auxiliares e a repercussão da manutenção proativa na disponibilidade de geração das usinas termelétricas**", 15º Congresso Brasileiro de Manutenção – ABRAMAN, Set/2000.
- (23) FELIPPE L., GNYP F., "**O aumento da capacidade de geração de usinas termelétricas e a influência das modificações na vida útil dos componentes das Caldeiras a vapor**", XV SNPTEE – GPT01, 1999.
- (24) GNYP F., "**Final report of project for modification of the Final Reheater (Rh1b) and of the final tests at boiler N° 5 – UTLB**", SES Tlmace – Republic Slovak, 1998.