



SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA

GPT 32  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## GRUPO II

### GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS

#### SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE COMBUSTÃO, ESCOAMENTO DE GASES E TROCAS TÉRMICAS NO INTERIOR DO GERADOR DE VAPOR DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA

Arthur B. Beskow \*   Maria L. S. Indrusiak   Cristiano V. da Silva   José Wagner M. Kaehler  
Alexandre Veeck

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Grupo de Pesquisa em Gestão de Energia  
Grupo de Estudos de Sistemas de Produção de Energia

## RESUMO

O papel estratégico da energia e a atual preocupação com o efeito estufa têm estimulado estudos na área da queima de combustíveis fósseis voltada para produção de energia com maior eficiência. O atual estágio de desenvolvimento da dinâmica dos fluidos computacional facilita o estudo numérico dos processos de combustão. No presente estudo o software CFX foi utilizado para estudar a combustão de carvão pulverizado e as trocas térmicas no interior do gerador de vapor de uma grande usina termelétrica. O objetivo desse estudo é simular as diversas condições de operação e identificar a emissão de gases como  $\text{NO}_x$ .

**Palavras-chave:** combustão, dinâmica dos fluidos computacional, geração de energia.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

O constante aumento da demanda de energia elétrica e problemas com o aquecimento global vêm promovendo o interesse em se obter energia de uma forma mais eficiente e menos poluidora (1). Esse fato abre caminho para estudos sobre processos de queima de combustíveis.

Abbas et al. (1993) descreve uma avaliação experimental predizendo a influência do tamanho da partícula de carvão na formação de  $\text{NO}_x$  em um queimador de vórtice estabilizado numa fornalha de laboratório em escala ampliada (2).

Xu et al. (2000) utilizaram um código de CFD – *Computational Fluid Dynamics* para resolver um processo da combustão de carvão em uma caldeira de carvão pulverizado de 350 MW. Cinco casos diferentes com carga de 100, 95, 85, 70 e 50% foram simulados. As comparações tiveram uma boa concordância com os resultados preditos e medidos na caldeira com a exceção de um caso, assim validando os modelos e o algoritmo empregados (3).

Backreedy et al. (2006) apresentam uma investigação numérica e experimental do processo da combustão de carvão para prever o comportamento da combustão de carvão pulverizado numa fornalha experimental de 1MW. A fornalha usada também conteve um queimador de baixo  $\text{NO}_x$  junto ao redemoinho. Simulações foram feitas usando vários tipos de carvões a fim calcular o  $\text{NO}_x$  e o carvão não queimado nas cinzas. Posteriormente foi realizado um teste de sensibilidade para medir a exatidão do modelo de combustão do carvão. Os modelos para prever a formação de  $\text{NO}_x$  nos processos de combustão são o NO-fuel, o NO-thermal, e o NO-prompt (4, 5).

O presente trabalho se refere a um gerador de vapor de uma planta de potência de 160 MW, operando em um ciclo de vapor subcrítico, gerenciado comercialmente pela Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE) em Candiota-RS. A câmara de combustão é do tipo queima tangencial, com os queimadores posicionados nas arestas de modo a criar um vórtice ascendente, favorecendo os processos de transferência de calor para as paredes recobertas de tubos d'água e trocadores de calor posicionados logo acima dessa câmara.

O estudo da combustão através de modelos computacionais compreende fenômenos tais como turbulência, transferência de calor por convecção e radiação, transporte de partículas e reações químicas.

(\*) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - Campus Universitário Central  
Av. Ipiranga, 6681 - Bairro Partenon - Porto Alegre/RS - Brasil  
Faculdade de Engenharia - Prédio 30 - Bloco 7 - Sala 273  
Tel: (51)3320-3500 Ramal: 4841 CEP: 90619-900 Email: arthurbb@pucrs.br

A forma generalizada da equação de conservação de uma variável genérica  $\phi$ , em regime permanente, é a seguinte (6):

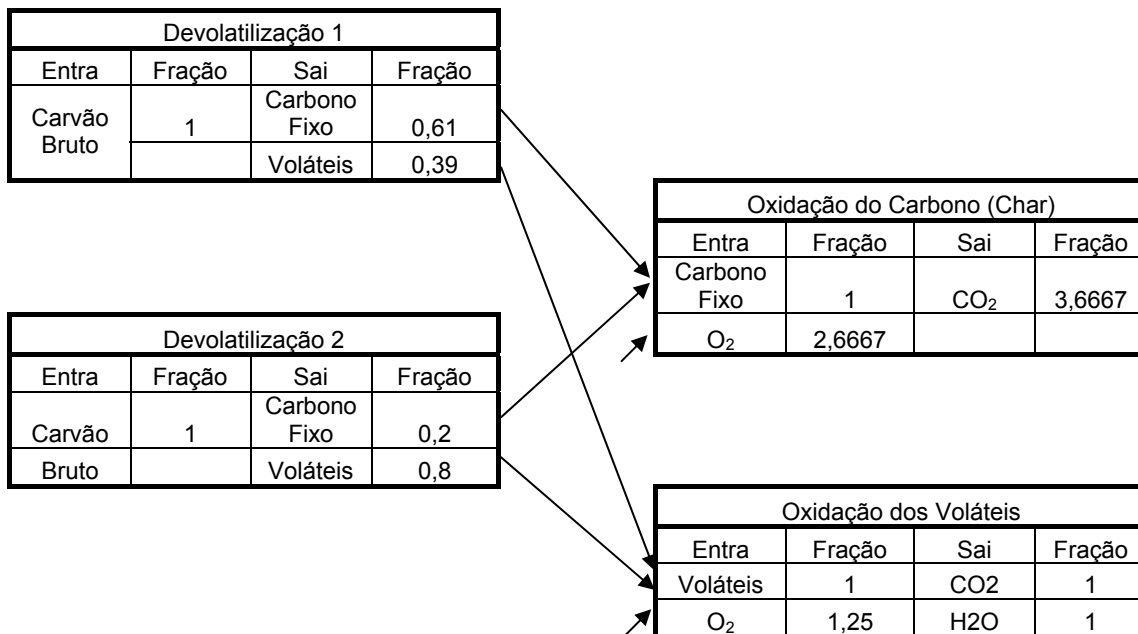
$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \bar{\phi} \vec{V}) = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma \vec{\nabla} \bar{\phi}) + S^\phi$$

em que o termo  $\phi$  representa todos os escalares calculados no problema, tais como: entalpia, espécies químicas, energia cinética turbulenta e sua dissipação, além da massa e da quantidade de movimento nas três dimensões do espaço. O termo  $\Gamma$  é coeficiente difusivo que assume valores específicos para cada caso. No termo  $S^\phi$  são acomodados todos os termos fontes físicos e matemáticos para as equações de conservação da variável escalar em análise.

A combustão de uma partícula de carvão é modelada como um processo estagiado de devolatilizações e de reações químicas (7). A devolatilização é modelada com duas reações, apresentando diferentes temperaturas de ativação e diferentes produtos, para representar convenientemente o processo que ocorre com carvões tipo sub-betuminoso (5, 8). A oxidação da matéria volátil é modelada por equações de taxas finitas de reações químicas, calculadas por um modelo combinado de Arrhenius e de Eddy-Breakup (9).

O modelo adotado para a queima do carbono (Char) considera a taxa de difusão do oxigênio sobre a superfície de uma partícula esférica porosa de carbono. O tamanho da partícula desempenha um papel importante neste processo e é usualmente modelado por uma distribuição estatística (10). Um resumo esquemático das reações é apresentado na Tab. 1.

TABELA 1 – Resumo esquemático das reações de combustão do carvão pulverizado.



Onde:

Carvão
Cinza
Carvão Bruto
Carbono Fixo

Mistura de Gases
O <sub>2</sub>
Voláteis
CO <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O
N <sub>2</sub>

Voláteis	
0,6364	CO
0,3636	CH <sub>4</sub>

Os processos de combustão que ocorrem na câmara de combustão da caldeira geram uma grande quantidade de calor. Esse calor é transferido dos gases de combustão para o fluido de trabalho (água) nos trocadores de calor por meio de convecção e radiação térmica, vaporizando e superaquecendo esse fluido, que na seqüência é utilizado na geração de potência num ciclo Rankine.

Os resultados obtidos com a presente modelagem foram comparados com dados experimentais de operação da caldeira, obtendo boa concordância.

## 2.0 - DESCRIÇÃO DA CALDEIRA

O gerador de vapor em estudo possui diversas flexibilidades referentes à maneira como carvão e o ar são injetados na câmara de combustão, podendo ser ajustada a vazão para cada queimador e as inclinações dos mesmos de forma a melhorar o processo de queima.

Na Fig. 1-a é apresentada um esquema da disposição dos principais componentes da caldeira. Junto, há uma legenda explicativa com as denominações dos trocadores de calor e de alguns outros equipamentos importantes para o processo. Na Fig. 1-b é mostrado um esquema de como é o alinhamento dos queimadores que propicia a queima tangencial em vórtice ascendente. Esse tipo de queimadores garante uma melhor mistura ar/combustível e, conseqüentemente, resulta em uma queima mais completa, além de manter os gases mais quentes longe das paredes.

As paredes são recobertas por tubos por onde passa água, ou fluido de trabalho, no estado de líquido saturado. Após passar por esses tubos o fluido de trabalho vai para os demais trocadores na forma de vapor saturado onde o mesmo passa desse estado para o de vapor superaquecido, seguindo o circuito para a turbina.

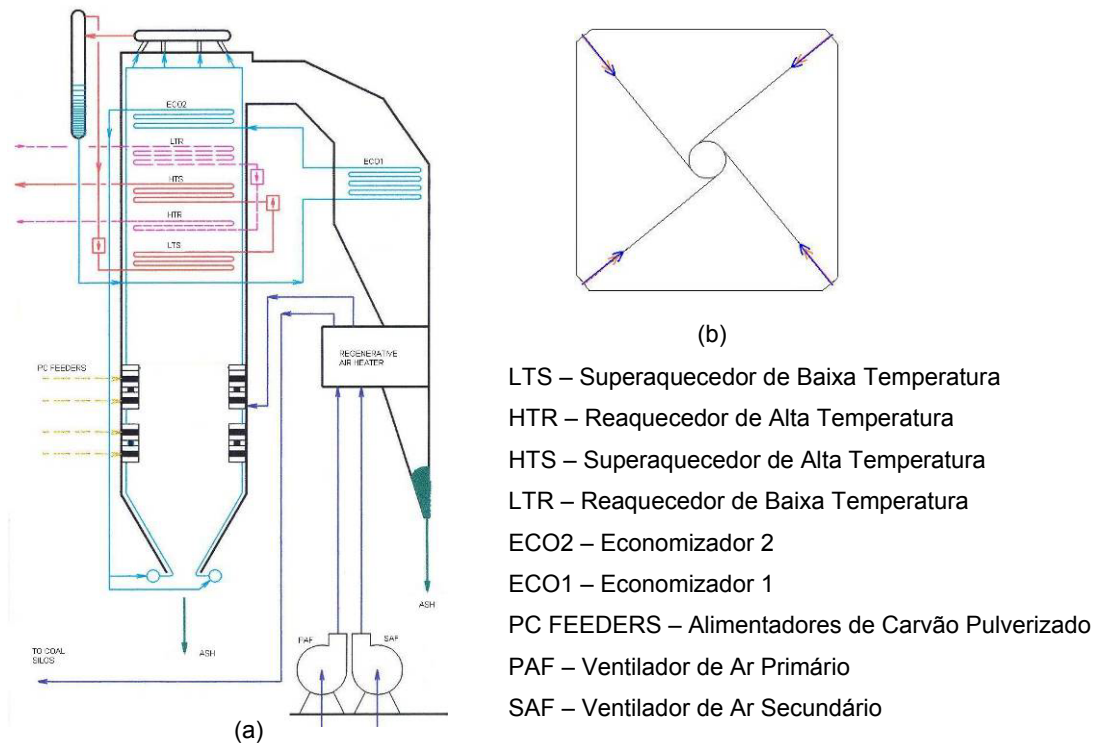


FIGURA 1 – (a) Disposição geral da caldeira; (b) Seção transversal mostrando o alinhamento dos queimadores.

## 2.1 - DISCRETIZAÇÃO DO GERADOR

O domínio a ser considerado, compreendendo todo o gerador de vapor, desde os queimadores, passando por cinco trocadores, até a saída dos gases de combustão para o duto que liga com o ECO I (economizador), foi discretizado utilizando uma malha do tipo não estruturada com elementos tetraédricos. A malha foi criada de forma não homogênea, com elementos de cerca de 0,01m próximos aos queimadores, onde ocorrem as principais reações químicas da combustão. No restante do domínio, para diminuir o tempo de processamento, os elementos tem cerca de 1m de aresta, totalizando 1,5 milhões de elementos. As paredes são cobertas por prismas triangulares com altura de cerca de 0,002m a fim de melhor captar os fenômenos de camada limite e as trocas térmicas nas paredes. Uma malha mais refinada não pode ter sido usada por limitações computacionais.

A Fig. 2 mostra o desenho da caldeira discretizada. Cada faixa representa uma região onde são configuradas condições de contorno próprias.

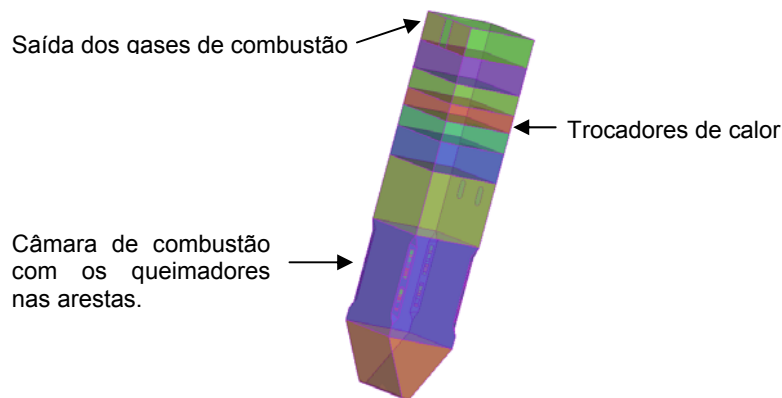


FIGURA 2 – Desenho da caldeira discretizada.

## 2.2 - CONDIÇÕES DE CONTORNO:

As condições de operação para o gerador de vapor que foram utilizadas na simulação são:

- entrada de ar secundário – 100 Kg/s – 327 °C;
- entrada de ar primário – 79,5 Kg/s – 269 °C;
- entrada de carvão pulverizado – 36,0 kg/s – 269 °C, entre 50 $\mu$ m e 200 $\mu$ m com distribuição de Rosin Rammler;
- saída gases superiores – - 800 Pa;
- paredes gerador vapor – 0,02 m de rugosidade;
- umidade do carvão – 16%

## 3.0 - CASOS DE ESTUDO

Nesse trabalho foram desenvolvidas três simulações a fim de avaliar as concentrações dos gases de combustão e o desempenho das trocas térmicas nas paredes e trocadores de calor.

O primeiro caso trata da operação do gerador de vapor com os queimadores posicionados com um ângulo de 0° em relação ao plano horizontal.

O segundo caso trata da operação do gerador de vapor com os queimadores posicionados com um ângulo de -15° em relação ao plano horizontal.

O terceiro caso trata da operação do gerador de vapor com os queimadores posicionados com um ângulo de 0° em relação ao plano horizontal, porém com um desbalanceamento entre os queimadores. O desbalanceamento implementado refere-se à injeção de 80% da quantidade de combustível e de ar nos queimadores situados numa das diagonais e 120% nos queimadores situados na outra diagonal mantendo, dessa forma, a carga total de combustível segundo condições de projeto.

## 4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Na Tab. 2 são mostrados os dados de temperatura e de concentrações integrados sobre a região de saída dos gases de combustão da caldeira para as simulações descritas acima.

A maior inclinação dos queimadores pode apresentar vantagens do ponto de vista da combustão, pois a mistura ar/combustível demora um pouco mais a ascender e há uma maior turbulência na câmara de combustão, ou seja, o tempo de permanência dos elementos da combustão na câmara é maior e há uma mistura mais eficiente, permitindo um maior aproveitamento do calor liberado e uma queima mais completa, evidenciada pela redução da emissão de CO (11) em relação ao caso sem inclinação. No entanto esse maior tempo de permanência gera num maior aquecimento em alguns pontos próximos da parede (onde também há concentrações de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>), conforme mostrado nas Figs. 5 e 6. Esses pontos de temperatura mais elevada aumentam a potencialidade de formação de NO<sub>x</sub> (12).

Com os queimadores desbalanceados há maior turbulência na câmara resultando, conseqüentemente, numa melhor mistura ar/combustível, melhorando a queima, o que é evidenciado pela redução da emissão de CO. Nesse caso também há pontos onde as temperaturas ficam mais elevadas, conforme Fig. 7, aumentando a formação de NO<sub>x</sub>.

TABELA 2 – Valores globais na saída dos gases de combustão do gerador de vapor.

Saída dos Gases						
	Inclinação de 0°		Inclinação de 15°		Desbalanceado	
	Valor Absoluto	Relação	Valor Absoluto	Relação	Valor Absoluto	Relação
Temperatura Saída	455 °C		449 °C		438 °C	
CO (kg/s)	0,074	377 ppm	0,022	111 ppm	0,007	35,67 ppm
CO <sub>2</sub> (kg/s)	43,58	22,20%	44,59	22,70%	43,65	22,20%
H <sub>2</sub> O (kg/s)	10,65	5,4%	10,71	5,4%	10,46	5,3%
N <sub>2</sub> (kg/s)	136,41	69,5%	136,41	69,4%	136,37	69,5%
NO (kg/s)	0,00091	4,6 ppm	0,0011	5,6 ppm	0,0011	5,6 ppm
O <sub>2</sub> (kg/s)	5,71	2,9%	4,96	2,5%	5,73	2,9%
Total (kg/s)	196,36		196,66		196,22	
Fluxo de calor nas paredes da câmara de combustão (W/m <sup>2</sup> )	1,54·10 <sup>9</sup>		1,60·10 <sup>9</sup>		1,64·10 <sup>9</sup>	

Na Fig. 3 estão apresentadas às linhas de corrente que descrevem as trajetórias dos gases a partir dos queimadores de uma aresta da câmara até a saída dos gases de combustão, para os casos onde temos 0° e -15° de inclinação com o plano horizontal. A Fig. 3-(b) mostra uma maior dispersão desses gases. Nos dois casos há a formação de um grande vórtice na região da câmara de combustão sendo que no caso de inclinação -15° o vórtice é um pouco mais ampliado, iniciando mais abaixo, e apresentando um diâmetro característico sensivelmente maior que no caso com a inclinação de 0°, onde o fluxo entra de maneira tal que boa parte já ascende em direção à saída.

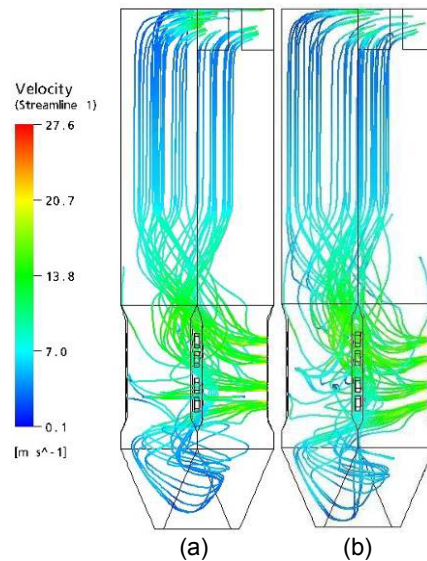


FIGURA 3 – Linhas de fluxo a partir da entrada de Ar primário: (a) caso com inclinação de 0° com o plano horizontal; (b) caso com inclinação de -15° com o plano horizontal.

Na Fig. 4 são mostrados os vetores velocidade do escoamento para os casos balanceado e desbalanceado. Na Fig. 4-(a) o vórtice ascendente possui uma seção circular centralizada na câmara de combustão, como é previsto no projeto. Isto faz com que as altas temperaturas geradas pela combustão ocorram prioritariamente na região central cercada pelos jatos de ar e de combustível que são injetados com temperaturas mais baixas. Já na Fig. 4-(b) o vórtice toma uma forma elíptica fazendo com que parte do fluxo de gases quentes passe mais perto das paredes, acarretando num aumento da temperatura nessas regiões. Esse tipo de situação acontece na prática devido a alguns problemas de operação do gerador de vapor sendo nocivos à sua estrutura, chegando a ocasionar furos nas tubulações das paredes d'água devido à fluência e ao desgaste provocado pelo fluxo de gases e cinzas excessivamente quentes e abrasivas, que incidem sobre essas tubulações.

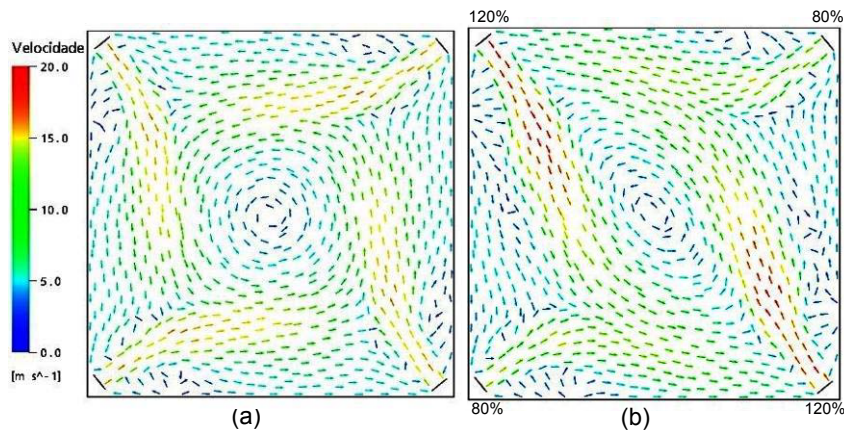


FIGURA 4 – Vetores tangentes ao escoamento dos gases em um plano horizontal na altura do segundo queimador: (a) caso balanceado; (b) caso desbalanceado, com a indicação de combustível em cada aresta.

As Figs. 5, 6 e 7 mostram as temperaturas nas paredes do gerador de vapor. Como já descrito acima, a inclinação de  $-15^\circ$  gera condições mais propícias à combustão, com menor formação de CO e o conseqüente aumento de  $\text{CO}_2$  (ver Tab. 2), gerando uma maior quantidade de calor. Isso se manifesta por uma área de parede sensivelmente maior, submetidas a temperaturas mais elevadas, do que no caso com inclinação a  $0^\circ$  (Figs. 5 e 6). Além disso, também ocorre uma maior absorção de calor por unidade de área de parede (ver Tab. 2). O maior espalhamento do ar/combustível a partir da injeção no gerador de vapor faz com que as paredes inferiores da câmara de combustão permaneçam em temperaturas mais baixas.

Quando o ar e o combustível são injetados no gerador de vapor de forma balanceada, a combustão ocorre bem no centro da câmara de forma eqüidistante de todas as paredes laterais, mantendo as temperaturas mais elevadas longe destas paredes, e protegendo-as de fenômenos como a fluência. Porém, no caso desbalanceado, como mostra a Fig. 7, a diferença na quantidade de combustível que é injetada nos queimadores em uma das diagonais com relação à outra, faz com que a região de combustão fique numa forma elíptica, resultando num grande aumento das temperaturas das paredes mais próximas à elipse.

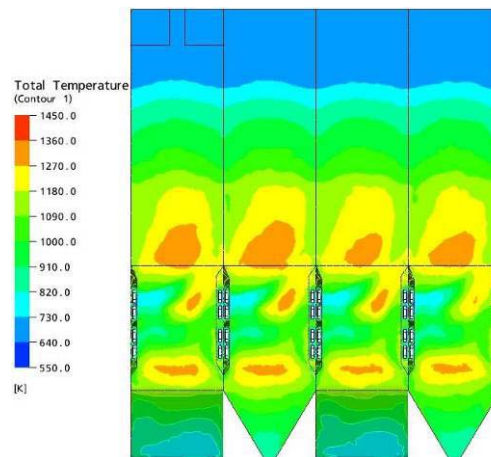


FIGURA 5 – Distribuição de temperaturas ao longo das paredes do gerador de vapor caso balanceado.



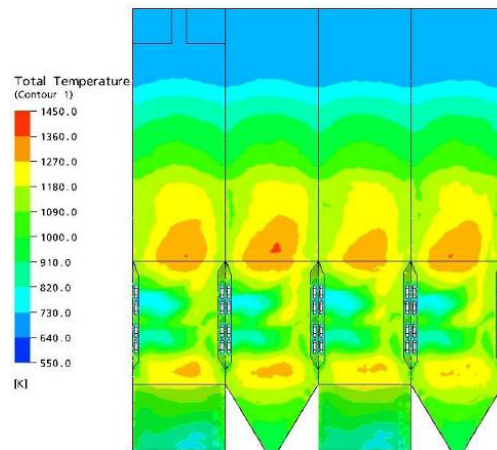


FIGURA 6 – Distribuição de temperaturas ao longo das paredes do gerador de vapor com  $-15^\circ$  de inclinação.

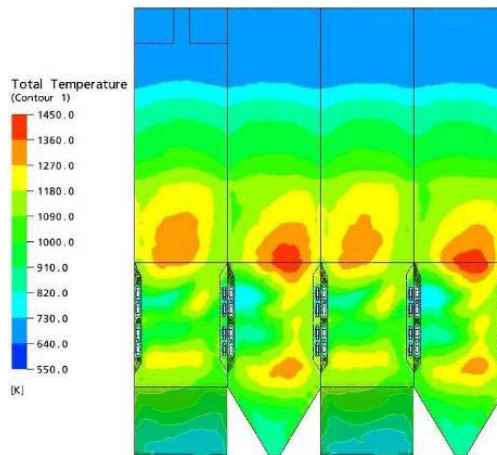


FIGURA 7 – Distribuição de temperaturas ao longo das paredes do gerador de vapor caso desbalanceado.

## 5.0 - CONCLUSÕES

O modelo numérico utilizado neste trabalho apresenta grande sensibilidade para captar as variações das condições de operação do gerador de vapor de modo a indicar e prever diversos fenômenos que ocorrem no seu interior, sendo também capaz de avaliar o desempenho de todo o processo.

O modelo foi capaz de simular o comportamento dos gases de combustão, determinar o perfil da chama e o campo de temperaturas e concentrações no interior do gerador de vapor. É verificado que o ângulo de injeção do carvão altera a taxa de formação do  $\text{NO}_x$ .

Quanto à eficiência de queima, pode-se concluir que quanto mais amplos os vórtices, mais eficiente e completa se torna a reação do combustível e maiores são as temperaturas atingidas. O caso cujos queimadores estão configurados com uma inclinação de  $-15^\circ$  em relação ao plano horizontal desenvolve as características necessárias para uma melhor eficiência da combustão, gerando mais energia térmica e, conseqüentemente, aumentando as trocas de calor. Além disso, ocorre também a diminuição na emissão de monóxido de carbono, acarretando num pequeno aumento na emissão de  $\text{NO}_x$ .

No caso desbalanceado de injeção de ar e de combustível foi possível concluir que, apesar do aparecimento de algumas características que melhoram a eficiência da queima (como intensificação de mistura de ar e de combustível na câmara de combustão), o mesmo é extremamente prejudicial ao gerador de vapor, pois aproxima os gases de combustão das fronteiras do gerador de vapor, que acabam danificando as paredes da caldeira por excesso de temperatura. Assim, essa configuração de operação da caldeira deve ser utilizada com cautela.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) Williams, A., Pourkashanian, M., Jones, J. M. and Skorupska, N., 2000, "Combustion and Gasification of Coal", Taylor & Francis, New York.
- (2) Abbas, T., Costen, P., Lockwood, F. C. e Romo-Millares, C. A., 1993, The Effect of Particle Size on NO Formation in a Large-Scale Pulverized Coal-Fired Laboratory Furnace: Measurements and Modeling, Combustion and Flame, v. 93, pp. 316-326
- (3) Xu, M., Azevedo, J. L. T. and Carvalho, M. G. , 2000, "Modelling of the combustion process and NO<sub>x</sub> emission in a utility boiler", Fuel, vol. 79, pp. 1611-1619.
- (4) Backreedy, R. I., Habib, R., Jones, J. M., Pourkashanian, M. e Williams, A., 1999, An extended coal combustion model, Fuel, v. 78, pp. 1745-1754.
- (5) CFX Solver Theory, 2004.
- (6) Maliska, Clovis R., 1995, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", LTC.
- (7) Ubhayakar, S. W., Stickler, D. B., Rosenberg Jr., C. W. e Gannon, R. E., 1976, Rapid Devolatilization of Pulverized Coal in Hot Combustion Gases, Proceedings of the Combustion Institute, pp. 427-436.
- (8) Bosoaga, A., Panoiu, N., Mihaescu, L., Backreedy, R. I., Ma, L., Pourkashanian, M. e Williams, A., 2006, The combustion of pulverized low grade lignite, Fuel, v. 85, pp. 1591-1598.
- (9) Silva, C. V., 2005, Simulação numérica da combustão turbulenta de gás natural em câmara cilíndrica, PROMEC, UFRGS.
- (10) Brown, W. K., 1995, "Derivation of the Weibull distribution based on physical principles and its connection to the Rosin-Rammier and lognormal distributions", Journal of Applied Physics, v. 78, n. 4, pp. 2758-2763.
- (11) Kuo, Kenneth K., 1986, "Principles of Combustion", Wiley.
- (12) Li, Z. Q., Wei, Y. and Jin, Y., 2003, "Numerical simulation of pulverized coal combustion and NO formation", Chemical Engineering Science, v. 58, pp. 5161-5171.