

ANÁLISE EM CFD DO PROCESSO DE CO-COMBUSTÃO DE CARVÃO MINERAL COM BIOMASSA LENHOSA: INFLUÊNCIA DA UMIDADE

CFD analysis of the co-firing process of mineral coal and woody biomass: moisture influence

Ademir José Velicko¹; Cristiano Vitorino da Silva²; Arthur Beskow³; Maria Luisa Sperb Indrusiak⁴

¹ Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI - Câmpus de Erechim.

² Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Brasil, atualmente é professor e vice-coordenador do Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI – Câmpus de Erechim.

³ Mestre em Ciências pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUC-RS, atualmente é professor e coordenador do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI – Câmpus de Erechim.

⁴ Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Brasil, atualmente é professora da Escola Politécnica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Data do recebimento: 09/02/2015 - Data do aceite: 07/05/2015

RESUMO: No presente trabalho, um modelo numérico para prever a co-combustão, ou combustão combinada, de carvão mineral com biomassa de madeira foi desenvolvido e implementado no Ansys CFX® para estudar a influência da umidade dos combustíveis sobre as emissões de poluentes e condições operacionais. Utilizou-se os dados geométricos e de operação de uma caldeira aquotubular em escala natural de uma usina termelétrica com capacidade de geração de 160 MW de eletricidade. Neste trabalho, seis casos foram avaliados e verificou-se que, ao se implementar um processo de secagem das partículas dos combustíveis utilizados na co-combustão, melhora-se o processo de queima, diminuindo o tempo de residência das partículas de carvão e de biomassa. Com as proporções de biomassa e carvão adotadas foi possível manter na co-combustão as mesmas condições de operação para o caso de queima com 100 % de carvão mineral, sendo que as temperaturas atingidas na co-combustão apresentam a mesma ordem de grandeza. Também se constatou que o modelo de secagem é de grande importância na modelagem do problema,

influenciando nas previsões das emissões de poluentes atmosféricos, como CO e CO₂. Os resultados demonstraram, também, a capacidade da análise em CFD como uma ferramenta de apoio à decisão no estudo de um projeto.

Palavras-chave: Co-combustão, Carvão Mineral, Biomassa, CFD, Umidade.

ABSTRACT: In this study, a numerical model to predict the co-firing, or combined firing, of mineral coal with wood biomass was developed and implemented in Ansys CFX® in order to study the influence of fuel moisture content on pollutant emissions and on operating conditions. Geometric and operating data of a full-scale water-tube boiler of a thermal power plant with the capacity to generate a 160 MW of electricity was used. Six cases were evaluated and it was found that the implementation of fuel drying process improves the burning process by decreasing the residence time of coal and biomass particles. Considering the biomass and coal proportions adopted, it was possible to maintain in the co-firing the same operating conditions of firing with a 100% mineral coal, and the temperatures obtained in the co-firing presented the same order of magnitude as the base case. It was also found that the drying model is of great importance in modeling the problem, influencing the predictions of pollutant emissions such as CO and CO₂. The results showed the capacity of CFD analysis as a decision support tool for project improvements.

Keywords: Co-firing. Mineral Coal. Biomass. CFD. Moisture.

Introdução

Nos últimos anos, verificou-se que o desenvolvimento da humanidade está diretamente relacionado com a disponibilidade de energia, tanto para a geração de energia elétrica quanto para aplicações térmicas. Desta forma, um desafio emergente dos últimos anos é a busca por combustíveis alternativos para combater as preocupações com a escassez de combustíveis fósseis e, principalmente, no que se refere à crescente quantidade de gases de efeito estufa liberados para a atmosfera (MMA, 2014). Uma fonte de energia alternativa e renovável que está atraindo muitos estudos é a biomassa. O emprego da biomassa como combustível renovável é justificado pela possibilidade de utilização em processos de co-combustão.

Segundo Dong et al. (2010), a co-combustão de biomassa torna-se atraente em função da possibilidade de se implementar o processo na estrutura existente das usinas termoeletricas, necessitando-se de baixos investimentos de adaptação da estrutura, mantendo-se a mesma eficiência. Também verifica-se que, devido à grande dispersão de caldeiras de carvão mineral pulverizado mundialmente existente, a utilização de biomassa torna-se uma oportunidade significativa mesmo que em níveis de apenas 5 a 20% de potência térmica, pois a utilização unicamente de biomassa em processos de combustão não proporciona a mesma eficiência de um processo de co-combustão (GHENAI et al., 2010). Contudo, o benefício mais significativo observado com a implantação de um processo de co-combustão de carvão mineral com biomassa é a diminuição da emissão de

poluentes atmosféricos. Os principais poluentes que podem ser reduzidos são o CO_2 , CO , SO_x e NO_x . Além disto, a co-combustão de biomassa com carvão mineral tem o potencial de contribuir para a redução de CO_2 através da substituição de combustível fóssil não renovável por um combustível renovável. A co-combustão, também, pode reduzir as emissões de NO_x e SO_2 devido à biomassa apresentar uma menor concentração de nitrogênio e enxofre em sua composição química. A quantidade produzida de CO pode, também, ser alterada em função das condições térmicas de operação do sistema (GHENAI et al., 2010; DONG et al., 2010).

Muitas são as formas de avaliação de processos de queima em geradores de vapor, mas poucas apresentam custo relativamente baixo e atingem as respostas desejadas. Análise experimental se torna inviável em função da escala dos equipamentos e dos níveis de instrumentação aplicados nas usinas, sendo a adaptação onerosa e complexa. Assim, as ferramentas de modelagem em dinâmica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) disponíveis no mercado tornam-se instrumentos eficazes para a avaliação de processos complexos e que envolvem muitas variáveis, como no caso da co-combustão. Através da análise em CFD é possível relacionar nos cálculos uma grande quantidade de detalhes, tanto geométricos quanto de processos, obtendo-se soluções cada vez mais próximas das reais situações de operação (ANSYS Inc., 2011).

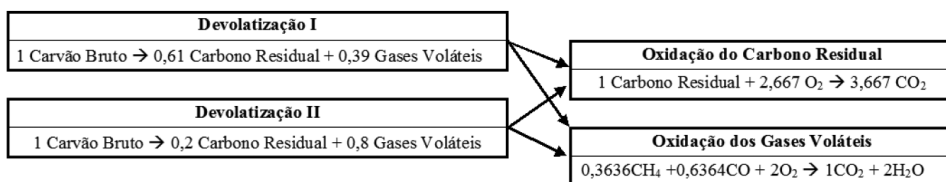
Deste modo, no presente trabalho apresenta-se um estudo numérico da queima de carvão mineral com biomassa de madeira, onde a modelagem desenvolvida é implementada sobre a geometria da caldeira de uma usina termoeletrica com funcionamento a carvão mineral e capacidade elétrica instalada de 160 MW, tendo como objetivo primordial a avaliação da influência da umidade nos combustíveis sobre as emissões de poluentes. Variáveis como as temperaturas alcançadas, tempo de residência das partículas de combustível, combustíveis residuais nas cinzas, velocidades dos gases, dentre outros são avaliadas a fim de verificar a viabilidade de implementação do processo nesta unidade geradora. O estudo foi conduzido a fim de se verificar a possibilidade de adaptação do atual equipamento para incorporação da biomassa como combustível em mistura com o carvão mineral.

Modelo Matemático

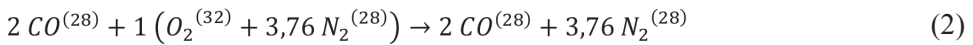
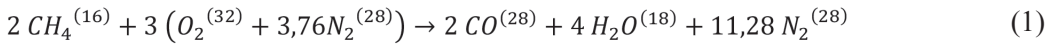
Formulação Matemática para a Combustão do Carvão Mineral

O esquema cinético para a pirólise das partículas de carvão utilizado neste trabalho foi proposto por Silva et al. (2010), o qual assume que o carvão mineral é composto de carvão bruto, cinza e umidade. O carvão bruto decompõe-se em carbono residual e gases voláteis através de duas reações concorrentes de devolatização, segundo o modelo proposto por Ubayakar (1976), conforme Fig. 1.

Figura 1 - Esquema básico das reações químicas do carvão bruto



Fonte: UBAYAKAR et al., 1976 Apud SILVA et al., 2010.



A oxidação de metano é modelada por duas etapas globais, WD2 de Westbrook e Drier (1981). Neste trabalho, todas as reações químicas são apresentadas para níveis estequiométricos, sendo o ar atmosférico empregado como oxidante na combustão.

A formação do NO_x em temperaturas acima de 1800K é modelado através do mecanismo de Zeldovich por meio do *NO-thermal*. Para as temperaturas inferiores a 1800 K, utiliza-se o mecanismo de Fennimore por meio do *NO-prompt*. Nesta condição, os radicais podem rapidamente reagir com o nitrogênio molecular para formar o HCN, o qual é oxidado durante a combustão e se transforma em NO, assim modela-se com o *NO-prompt* e o *NO-fuel*, onde considera-se que todo o nitrogênio do combustível seja convertido em HCN (ANSYS Inc., 2011). Complementando esta formulação, adicionou-se o modelo de secagem das partículas de carvão proposto por Xianchun et al. (2009). Este modelo estabelece que a partícula úmida de carvão passa por um processo de evaporação a uma temperatura de 373 K, resultando em carvão seco e vapor de água. O esquema do processo de pirólise da partícula de carvão com secagem pode ser observado na Fig. 2. As constantes cinéticas empregadas na reação de secagem

das partículas de carvão mineral, ou seja, o fator pré-exponencial e a energia de ativação foram adotados do trabalho de Xianchun et al. (2009), sendo respectivamente $4,587 \times 10^{12} s^{-1}$ e 78,995 kJ/kmol.

Modelo do Campo de Oxidação do Carbono Residual (*Field char oxidation*)

A taxa de difusão do oxigênio é dada por $k_d(p_g - p_s)$, onde p_g é a pressão parcial do oxigênio nos gases quentes longe da camada limite da partícula em [Pa] e p_s é a pressão do oxigênio na superfície da partícula, também em [Pa]. O valor de k_d é obtido em $[m^2/s^2]$, como segue,

$$k_d = D_{ref} R_p^{-1} (T_p - \tilde{T}_g (2T_{ref})^{-1})^\alpha \frac{p_A}{\bar{p}} \quad (3)$$

onde R_p é o raio da partícula [m], T_p é a temperatura da partícula [K], \tilde{T}_g é a temperatura média do campo gasoso no entorno da partícula [K], p_A é a pressão atmosférica [Pa], D_{ref} é a difusividade dinâmica $[m^2/s]$ e α é o expoente de ajuste, com um valor de 0,75 (ANSYS Inc., 2011). A taxa de

Figura 2 - Modelo de pirólise do carvão com secagem



Fonte: UBAYAKAR et al., 1976 Apud SILVA et al., 2010; XIANCHUN et al., 2009.

oxidação do carbono residual por unidade de área da superfície da partícula é dada por $k_c p_s$. O coeficiente de taxa química é determinado através de

$$k_c = A_c \exp(-T_c/T_p) \quad (4)$$

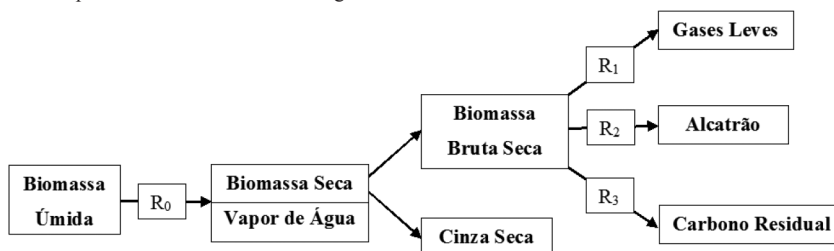
onde A_c [(m³/s)/kmol] e T_c [K] são parâmetros dependentes do tipo de carvão. A velocidade de reação global do carbono residual de uma partícula é controlada pela menor das duas taxas das reações químicas da difusão do oxigênio e do carbono residual, k_d e k_c .

$$(k_d^{-1} + k_c^{-1})^{-1} C_{O_2} 4\pi R_p^2 \frac{\bar{p}}{p_a} \quad (5)$$

Formulação Matemática para a Combustão da Biomassa

O esquema cinético para a pirólise de partículas de biomassa empregado neste trabalho foi proposto por Haseli et al. (2011) e assume que a biomassa é composta de biomassa bruta, aqui, madeira de reflorestamento, cinza e água. A biomassa bruta decompõe-se em gases leves, alcatrão (aquí gases pesados) e carbono residual, através de três reações que ocorrem em paralelo. Contudo, foi implementado o modelo para prever, também a secagem das partículas de biomassa de madeira, proposto por Bryden et al. (2002). Assim, o esquema do processo de pirólise da partícula de biomassa com secagem pode ser observado na Fig. 3.

Figura 3 - Modelo de pirólise da biomassa com secagem



Fonte: HASELI et al., 2011; BRYDEN et al., 2002.

As taxas de reações químicas são determinadas através do modelo de *Arrhenius*, conforme (ANSYS Inc., 2011).

$$R_i = A_i \exp(-E_i/RT) \quad (6)$$

onde A_i é o fator pré-exponencial da equação de *Arrhenius* [$t^{-1} \cdot (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})^{(1-n)}$], sendo t o tempo em segundos, detalhado por Turns (2000), E é a energia de ativação da reação [kJ/kmol], R é a constante universal do gás [kJ/mol.K], T é a temperatura [K], sendo o subscrito i refere-se às i -reações R_0 , R_1 , R_2 e R_3 do modelo de cinética química. As constantes cinéticas utilizadas para as reações R_1 , R_2 e R_3 foram adotadas de Di Blasi et al. (2001), pois de acordo com os estudos realizados por Haseli et al. (2011), estas constantes apresentam bons resultados para reatores com temperaturas acima de 1100 K e estão representadas na Tab. I. As constantes cinéticas para a reação R_0 , referente à secagem da partícula, foram adotadas de Bryden et al. (2002).

Tabela I - Constantes cinéticas das reações R_0 , R_1 , R_2 e R_3

| Reação | A | E [kJ/kmol] |
|--------|--|-------------|
| R_0 | $5,13 \times 10^6$ [kg ² .m ⁶ .s ⁻¹] | 88 |
| R_1 | $4,38 \times 10^9$ [s ⁻¹] | 152,7 |
| R_2 | $1,08 \times 10^{10}$ [s ⁻¹] | 148,0 |
| R_3 | $3,27 \times 10^6$ [s ⁻¹] | 111,7 |

Fonte: DI BLASI et al., 2001; BRYDEN et al., 2002.

Segundo Grieco et al. (2011), a fração mássica de gases leves, alcatrão e carbono residual gerados da decomposição da biomassa bruta são, respectivamente, de 17%, 62% e 21%.

Reações Homogêneas

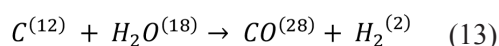
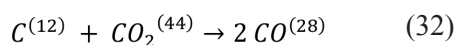
Os componentes voláteis liberados durante o processo de pirólise podem reagir com outros componentes e com o oxigênio no interior e na periferia da partícula. Os gases leves são constituídos, principalmente, por H_2O , CO , CO_2 , CH_4 e H_2 , onde as frações mássicas dependem das condições de aquecimento e do tipo da biomassa. No entanto, para aplicações de engenharia, uma composição constante é geralmente assumida. Di Blasi et al. (2001) propõem uma composição dos gases leves de 0,521, 0,156, 0,271, 0,021 e 0,031, respectivamente. Para representar o alcatrão, utiliza-se uma simplificação empírica na forma de $C_xH_yO_z$. Bryden et al. (2003) analisaram a decomposição do alcatrão e verificaram que seus principais produtos são CO , CO_2 , H_2O , H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 e C_3H_6 . Assim, realizando uma análise elementar de C, H e O, Bryden et al. (2003) propuseram uma fórmula química representada por $C_{3,878}H_{6,426}O_{3,561}$, a qual apresenta uma relação de O/C de 0,918 e uma relação de H/C de 1,657.

de carbono e alcatrão tem-se, (HASELI et al., 2011):

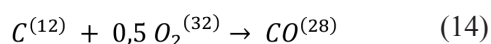
Para descrever a reforma do dióxido de carbono propõem-se:

Gaseificação e Combustão do *Char*

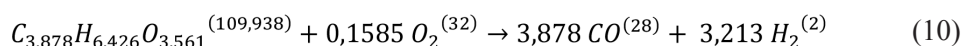
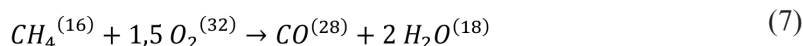
As reações de gaseificação e combustão do carbono residual são reações heterogêneas. As taxas de gaseificação do carbono residual com dióxido de carbono e com vapor d'água pode ser obtida através de (HASELI et al., 2011)



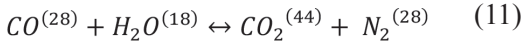
A taxa de combustão do carbono residual pode ser obtida através de



A taxa de gaseificação e combustão do carbono residual nas reações apresentadas nas Eqs. (32) - (14) são determinadas através do modelo de *Field Char Oxidation* adotado para o *char* do carvão mineral, incorporando-se as novas constantes do modelo de *Arrhenius* propostas por Hobbs et al. (1992).



Assim, para descrever a taxa de combustão do metano, hidrogênio, monóxido



Conservação de Massa e Espécies Químicas

A conservação de massa de cada elemento é concedida em função de sua própria equação da média de Favre (KUO, 1996), a qual, considerando escoamento multifásico em regime estacionário e incompressível, pode ser escrita em notação tensorial através da seguinte equação

$$\frac{\partial(\tilde{\rho}_i \tilde{U}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{\rho}_i (\tilde{U}_{ij} - \tilde{U}_j) - \overline{\tilde{\rho}_i'' U_j''}) + \tilde{S}_i \quad (15)$$

onde $\tilde{U}_j = \sum(\tilde{\rho}_i \tilde{U}_{ij})/\bar{\rho}$. $\tilde{\rho}_i$ é a velocidade média da massa do componente líquido i na mistura [m/s] e $\bar{\rho}$ é a massa específica média [kg/m³], x é a coordenada espacial, \tilde{U}_j é o vetor velocidade [m/s] e \tilde{U}_{ij} é a velocidade média do componente fluido i [m/s]. O termo $\rho_i(\tilde{U}_{ij} - \tilde{U}_j)$ representa a vazão mássica relativa [m³/kg] e \tilde{S}_i é o termo fonte para a componente i o qual inclui os efeitos das reações químicas. Se em todas as equações representadas pela Eq. (15) são acrescentados componentes globais e o termo fonte é prescrito como zero, tem-se a equação da continuidade. O termo de vazão mássica relativa é considerado para o movimento diferencial de componentes individuais. Neste estudo, este termo é modelado para o movimento relativo dos componentes da

mistura e o principal efeito é o do gradiente de concentração, conforme

$$\rho_i(\tilde{U}_{ij} - \tilde{U}_j) = -\frac{\rho D_i}{\bar{\rho}} \frac{\partial \tilde{\rho}_i}{\partial x_j} \quad (16)$$

onde D_i é a difusividade cinemática [m²/s]. A fração mássica do componente i é definida como $\tilde{Y}_i = \tilde{\rho}_i/\bar{\rho}$. Substituindo essas expressões na Eq. (15) e modelando os termos turbulentos escalares supondo uma dissipação turbulenta, obtêm-se

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{U}_j \tilde{Y}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \frac{\partial \tilde{Y}_i}{\partial x_j} \right) + \tilde{S}_i \quad (17)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica [(N.s)/m²] e Sc_t é o número de Schmidt turbulento. Percebe-se que a soma dos componentes de frações mássicas com todos os componentes é unitária.

Conservação da Quantidade de Movimento

A conservação de movimento para o escoamento do fluido é obtida através de

onde $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, sendo μ a viscosidade dinâmica [(N.s)/m²] e μ_t a viscosidade turbulenta, definida como $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$. O termo $p^* = \bar{p} - (2/3)k$ é a pressão modificada [Pa], C_μ é uma constante empírica para o modelo de turbulência, sendo igual a 0,09, \bar{p} é a pressão média da mistura gasosa [Pa] e δ_{ij} é a função delta de Kronecker. $\overline{S_U}$ é o termo fonte, inserido para modelar o empuxo

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{U}_i \tilde{U}_j) = -\frac{\partial p^*}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x_j \partial x_i} + \overline{S_U} \quad (18)$$

e a força de arrasto gerada pelo transporte de partículas, e outros termos matemáticos gerados pelos modelos de turbulência. O modelo de Boussinesq é empregado para representar a força de empuxo gerada pelas variações de densidade e o modelo $k-\omega$ é aplicado para descrever a turbulência no escoamento (WILCOX, 1988).

Conservação da Energia

O transporte de energia em função da difusão de cada espécie química pode ser determinado através de

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j \bar{h}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(k + c_p \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} + \sum_i^{N_c} \bar{Y}_i \left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{Y}_i}{\partial x_j} \right) + \bar{S}_h \quad (19)$$

onde \bar{h} é a entalpia média [kJ/kg] e c_p é o calor específico da mistura [kJ/(kg.K)], que é determinado por $c_p = \sum_i \bar{Y}_i c_{p,i}$, onde $c_{p,i}$ e \bar{Y}_i são o calor específico e a média da fração mássica da i -espécies química da mistura, k é a condutividade térmica da mistura [W/m.K], Pr é o número de Prandtl, e \bar{S}_{rad} e \bar{S}_{rea} traduzem as fontes para energia térmica produzidas pela transferência radiativa e pelas reações químicas [W/m³]. O termo fonte $\bar{S}_h = \bar{S}_{rad} + \bar{S}_{rea}$, sendo que \bar{S}_{rea} pode ser obtido com

onde (\bar{T} é a temperatura média da mistura [K], h_i^0 é a entalpia de formação [kJ/kg] e ($\bar{T}_{ref,i}$ é a temperatura de referência das espécies químicas [K]. Para completar o modelo, a densidade da mistura pode ser alcançada da equação do estado de um gás ideal (KUO, 1996; TURNS, 2000), $\bar{\rho} = p \overline{MM} (\beta \bar{T})^{-1}$, onde p é a pressão operacional da câmara de

$$\bar{S}_{rea} = \sum_i \left[\frac{h_i^0}{\overline{MM}_i} + \int_{\bar{T}_{ref,i}}^{\bar{T}} c_{p,i} d\bar{T} \right] \bar{R}_i \quad (20)$$

combustão [Pa], a qual foi assumido como sendo de 1 atm e \overline{MM} é a massa da mistura molecular [kg/kmol]. As equações, acima mencionadas, são válidas apenas no núcleo de turbulência, onde $\mu_t \gg \mu$. Próximo à parede, a lei convencional logarítmica é utilizada (NIKURADSE, 1933).

Para determinar o termo \bar{S}_{rad} utiliza-se o modelo DTRM – *Discret Transfer Radiation Model* foi considerado para a troca por radiação térmica no interior da câmara de combustão (CARVALHO et al., 1991), assumindo-se que o espalhamento seja isotrópico. O modelo de soma ponderada de gases cinza WSGG – *Weighted Sum of Gray Gases*– desenvolvido por Hottel et al. (1967), foi empregado para descrever o efeito do comprimento de onda na dependência da fase gasosa, em que se utilizou os coeficientes obtidos por Dorigon et al. (2013). Neste estudo, as partículas de carvão foram assumidas como sendo esféricas e homogêneas, na transferência de calor da mistura gasosa para as partículas considerou-se corpos opacos e negros com emissividade unitária (ANSYS Inc., 2011). A radiação é o principal modo de transferência de calor para as paredes da caldeira e a transferência de calor por convecção é mínima (XU et al., 2000). Os bancos de tubos foram modelados como sendo meios porosos e a transferência de calor foi modelada por meio de coeficientes de sumidouro volumétricos. A queda de pressão, em virtude do banco de tubos, foi modelada admitindo-se coeficientes quadráticos direcionais de perda de carga para os meios porosos, avaliados em função da geometria do banco de tubos (KNUDSEN, 1958). Os trocadores de calor foram modelados como corpos negros.

Modelo de Reações Químicas E-A (Eddy Breakup-Arrhenius)

O modelo de Eddy Breakup-Arrhenius para a redução de reações químicas assume

taxas finitas de reações e um processo de estado estacionário de combustão turbulenta de voláteis.

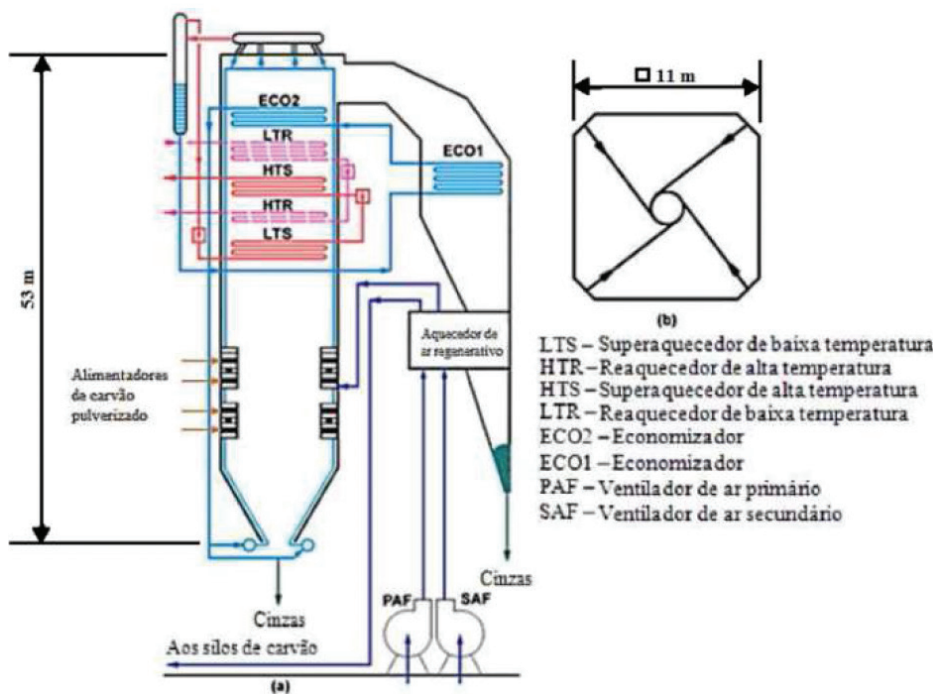
Assumindo-se que a oxidação seja uma combinação de queima difusiva e com pré-mistura, ocorrendo em etapas globais de reações químicas, envolvendo apenas nove espécies principais: O_2 , CH_4 , H_2 , H_2O , Tar ($C_{3,878}H_{6,426}O_{3,561}$), HCN , HCO , CO_2 e CO . Uma equação de conservação é necessária para cada espécie química, exceto o nitrogênio. O termo fonte, S_i , considera a taxa média volumétrica para formação ou destruição das espécies químicas em todas as reações químicas. Este termo é calculado a partir da soma das taxas volumétricas de formação ou destruição em todas as equações onde a espécie está presente, $\bar{R}_{i,k} \cdot \bar{R}_i = \sum_k \bar{R}_{i,k}$ e

$\bar{R}_{i,k,w}$ foi obtida através de modelo *Eddy Breakup-Arrhenius* (EATON et al., 1999).

Modelo Físico

A câmara de combustão em análise é parte de uma planta termelétrica com potência de 160 MW, à base de carvão pulverizado. A câmara de combustão apresenta uma seção transversal quadrada de aproximadamente 11 m e uma altura de aproximadamente de 53 m. A câmara de combustão opera através da queima tangencial de quatro queimadores em cada canto da câmara. A inclinação dos queimadores é de 15° em relação à horizontal. A Fig. 4(a) mostra a disposição geral dos queimadores e trocadores de calor da caldeira.

Figura 4 - (a) Disposição geral dos componentes da caldeira; (b) Seção transversal horizontal

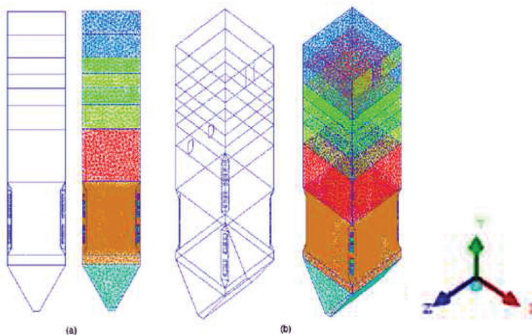


Fonte: SILVA et al., 2010.

Malha Computacional

A discretização no interior da câmara de combustão foi realizada com a implementação de volumes tetraédricos e volumes prismáticos nas paredes da câmara, a fim de capturar o comportamento da camada limite. Porém, volumes prismáticos não foram aplicados em toda a sua extensão em virtude da altura da caldeira corresponder a apenas seis diâmetros equivalentes da mesma. A Fig. 5 apresenta a geometria modelada e a malha gerada no software ICEM CFD, exibidos em vista frontal e em perspectiva. A malha utilizada tem, aproximadamente, $1,5 \times 10^6$ elementos de tamanhos diferentes, utilizando refinamento de malha nas regiões reativas próximas dos queimadores.

Figura 5 - Geometria e malha utilizada na modelagem: (a) Vista frontal; (b) Vista em perspectiva



Fonte: SILVA et al., 2010.

Condições de Contorno

As condições de contorno e os dados de projeto da caldeira foram obtidas do trabalho de Silva et al. (2010), o qual avaliou a combustão de carvão puro nesta mesma caldeira. As paredes da caldeira, as quais são cobertas com tubos de aço, foram modeladas como paredes em aço bruto, com uma temperatura fixa de 673 K, em virtude de esta ser a tem-

peratura de saturação da água à pressão de trabalho da caldeira. Emissividade térmica para as paredes foi estabelecido como sendo de 0,9. As condições de entrada são definidas como a vazão de ar, carvão e biomassa que entram na câmara de combustão pelos queimadores. As vazões mássicas de ar de combustão primário e secundário são 77,57 kg/s e 98,72 kg/s, respectivamente. As vazões mássicas de carvão e de biomassa pulverizados são 47,5 kg/s e 0,8447 kg/s, respectivamente. Estes valores foram obtidos através de um balanço de massa (combustível e ar de combustão) e energia da caldeira considerando uma redução de aproximadamente 5% na vazão de carvão para inclusão da biomassa. Assim, manteve-se a carga térmica fornecida para a caldeira de aproximadamente 319 MW, visando com que o sistema termoelétrico consiga produzir aproximadamente 160 MW de energia elétrica. O poder calorífico inferior (PCI) do carvão utilizado é de 10301 kJ/kg e da biomassa utilizada é de 14267,6 kJ/kg. A temperatura para o ar primário e para o carvão com biomassa é de 542 K e a temperatura para o ar secundário é de 600 K. O tamanho das partículas de carvão pulverizado foi modelado por uma distribuição probabilística desenvolvida por Rosin-Rammler, (BROWN, 1995) e limitado entre 50 μm e 200 μm . O carvão mineral utilizado é o tipo CE 3100 e sua composição química está apresentada na Tab. II.

Tabela II - Composição química do carvão beneficiado CE 3100

| Carvão CE 3100 | | |
|-------------------|--------------------|-------|
| Espécies químicas | Fração Mássica (%) | |
| Umidade | 0 | 16,47 |
| Carbono residual | 33,21 | 27,74 |
| Cinza | 54,78 | 45,76 |
| Oxigênio | 7,92 | 6,62 |
| Hidrogênio | 2,34 | 1,95 |
| Enxofre | 1,14 | 0,95 |
| Nitrogênio | 0,61 | 0,51 |

Fonte: SILVA et al., 2010.

Em consequência da composição química do carvão apresentada na Tab. II têm-se a fração mássica dos componentes primários do carvão em função da variação do teor de umidade, estando apresentados na Tab. III.

Tabela III - Componentes primários do carvão CE 3100

| Carvão CE 3100 | | |
|-------------------|--------------------|-------|
| Espécies químicas | Fração Mássica (%) | |
| Umidade | 0 | 16,47 |
| Carvão bruto | 45,22 | 37,77 |
| Cinzas | 54,78 | 45,76 |

Fonte: SILVA et al., 2010.

O tamanho das partículas de biomassa de madeira pulverizadas, simultaneamente, com o carvão foi definido em 75 μm fixo. A composição da biomassa, em função da variação do teor de umidade a ser avaliada neste trabalho, está apresentada na Tab. IV.

Tabela IV - Composição química da madeira

| Espécies químicas | Fração Mássica (%) | | | | |
|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 6 | 10 | 20 | 30 |
| Carbono residual | 48,1 | 45,21 | 43,29 | 38,48 | 33,67 |
| Hidrogênio | 5,77 | 5,42 | 5,19 | 4,62 | 4,04 |
| Oxigênio | 45,53 | 42,8 | 40,98 | 36,42 | 31,87 |
| Nitrogênio | 0,1 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,07 |
| Cinzas | 0,5 | 0,48 | 0,45 | 0,4 | 0,35 |

Fonte: MEHRABIAN et al., 2012).

Em virtude da composição química da madeira apresentada na Tab. IV têm-se a fração mássica dos componentes primários da biomassa, novamente em função da variação do teor de umidade, apresenta-se na Tab. V.

Segundo a modelagem adotada por Silva et al. (2010) e atualmente empregada neste trabalho, na saída do domínio modelado foi prescrita uma pressão de - 400 Pa, baseado nos dados de operação. A fim de avaliar-se a influência

da umidade na co-combustão, 6 casos foram considerados neste estudo, conforme Tab. VI.

Tabela V - Componentes primários da madeira

| Espécies químicas | Fração Mássica (%) | | | | |
|-------------------|--------------------|-------|-------|------|-------|
| | 0 | 6 | 10 | 20 | 30 |
| Umidade | 0 | 6 | 10 | 20 | 30 |
| Carvão bruto | 99,5 | 93,52 | 89,55 | 79,6 | 69,65 |
| Cinzas | 0,5 | 0,48 | 0,45 | 0,4 | 0,35 |

Fonte: MEHRABIAN et al., 2012.

Tabela VI - Casos estudados neste trabalho.

CASO 1: carvão puro com 16,47 % de umidade e com modelo de secagem para o carvão;

CASO 2: carvão e biomassa com umidades de 16,47% e 6 %, respectivamente, e sem modelo de secagem;

CASO 3: carvão e biomassa com umidades de 16,47 % e 6 %, respectivamente, e com modelo de secagem;

CASO 4: carvão e biomassa com umidades de 16,47 % e 10 %, respectivamente, e com modelo de secagem;

CASO 5: carvão e biomassa com umidades de 16,47 % e 20 %, respectivamente, e com modelo de secagem;

CASO 6: carvão e biomassa com umidades de 16,47 % e 30 %, respectivamente, e com modelo de secagem.

Resultados e Discussão

O critério de convergência adotado foi o RMS - *Root Mean Square* (raiz quadrada média), obtendo-se valores abaixo de 1×10^{-6} para todas as variáveis do modelo. A Fig. 6 apresenta os campos de temperatura representados sobre um plano transversal vertical da vista isométrica da caldeira para os 6 casos em estudo.

A Fig. 7 apresenta a variação da temperatura na caldeira em seu eixo de simetria em função de sua altura para os 6 casos em estudo.

Analisando-se as Figs. 6 e 7, verifica-se que ao introduzir-se a biomassa como co combustível, e sem empregar um modelo de secagem das partículas dos combustíveis, a diminuição da temperatura na caldeira foi mais significativa, afetando o processo de

Figura 6 - Campo de temperatura: (a) CASO 1; (b) CASO 2; (c) CASO 3; (d) CASO 4; (e) CASO 5; (f) CASO 6.

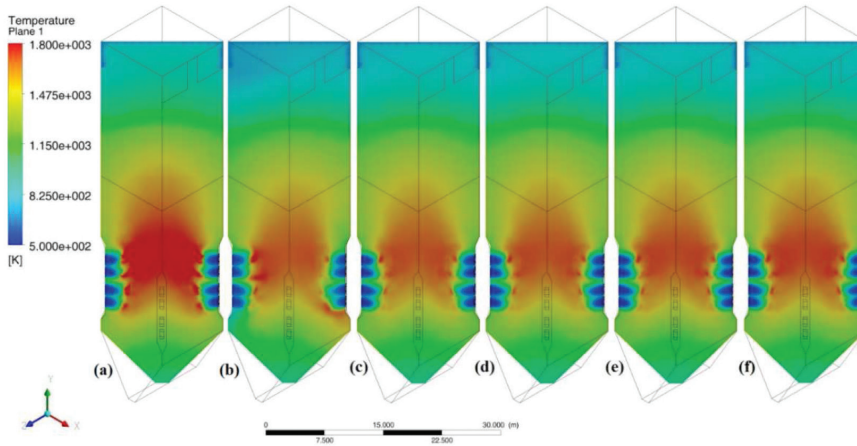
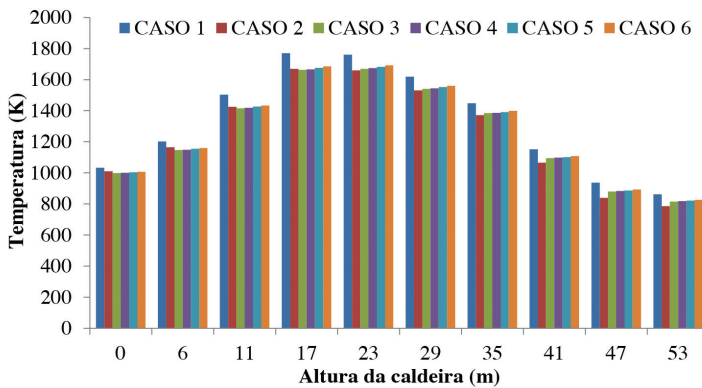


Figura 7 - Variação da temperatura em função da altura da caldeira.



queima dos combustíveis. Isto foi confirmado ao analisar-se o tempo médio de residência das partículas dos combustíveis, conforme apresentado na Tab. VII.

Verificou-se que o tempo médio de residência das partículas de carvão mineral pas-

sou de 1,014 s no processo de combustão de carvão mineral com secagem das partículas para 1,506 s no processo de co-combustão sem um processo de secagem das partículas dos combustíveis e o tempo médio de residência das partículas de biomassa foi

Tabela VII - Tempo médio de residência das partículas dos combustíveis.

| Tempo médio de residência | CASO 1 | CASO 2 | CASO 3 | CASO 4 | CASO 5 | CASO 6 |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Partículas de carvão mineral [s] | 1,014 | 1,506 | 1,065 | 1,063 | 1,054 | 1,051 |
| Partículas de biomassa de madeira [s] | - | 1,291 | 1,008 | 1,011 | 1,003 | 1,000 |

de 1,291 s. No entanto, ao empregar-se um modelo de secagem das partículas dos combustíveis, a eficiência do processo de queima da mistura foi melhorada e as temperaturas atingidas na região dos trocadores de calor elevaram-se a níveis próximos das temperaturas atingidas na queima de carvão mineral puro. Assim, os tempos médios de residência das partículas de carvão mineral e biomassa diminuíram, respectivamente, para 1,06 s e 1,01 s. Verificou-se, também, que, em ambos os casos, a temperatura global máxima alcançada na caldeira foi acima de 1900 K e ao introduzir-se a biomassa como combustível com um modelo de secagem para as partículas, a variação máxima ocorrida para a temperatura global foi de 3,1 % em relação ao caso de combustão carvão mineral puro.

A Fig. 8 apresenta os campos de concentração de dióxido de carbono representados no mesmo plano transversal vertical da vista isométrica da caldeira e a Fig. 9 apresenta a variação de dióxido de carbono na caldeira em seu eixo de simetria em função de sua altura. Ambas as figuras demonstram os 6 casos em estudo. Nestas figuras observou-se uma redução de aproximadamente 6,2 %

da produção global de CO_2 na caldeira ao introduzir-se a biomassa como combustível em conjunto com a aplicação de um modelo de secagem das partículas dos combustíveis, se comparado com a produção de CO_2 da queima de carvão mineral com biomassa sem secagem. Ao introduzir-se a biomassa como combustível sem um processo de secagem, houve um aumento da produção de CO_2 em comparação ao CASO 1 (carvão mineral puro). Porém, em virtude da biomassa ser um combustível de fonte renovável, a produção de CO_2 proveniente da queima de biomassa pode ser considerada nula em função da biomassa consumir CO_2 do ar atmosférico durante a sua fase de desenvolvimento biológico. Assim, neste caso, a redução na produção de CO_2 no processo de co-combustão fica maior do que simplesmente as emissões evitadas, ou seja, ao introduzir-se 5% de biomassa como combustível na caldeira e a diminuição das emissões globais com o processo de co-combustão serão de aproximadamente 7,6%. A produção de CO_2 não foi afetada em função da variação do percentual de umidade presente na biomassa.

Figura 8 - Campo de CO_2 : (a) CASO 1; (b) CASO 2; (c) CASO 3; (d) CASO 4; (e) CASO 5; (f) CASO 6.

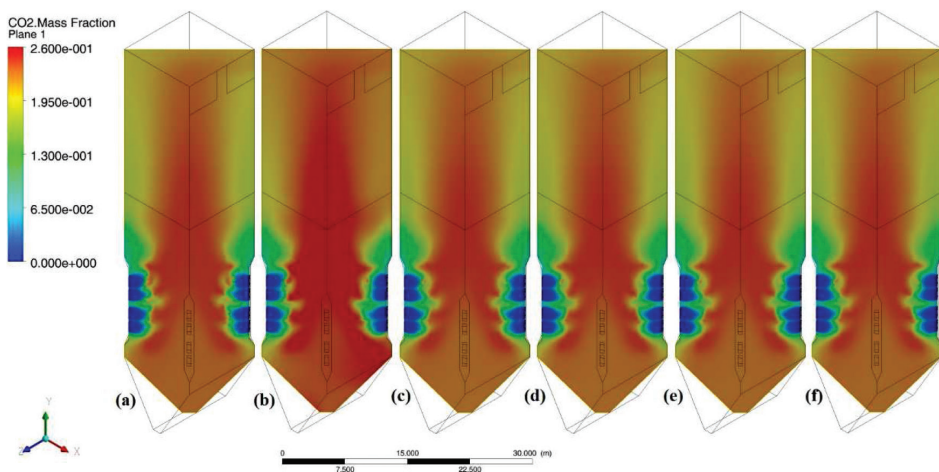
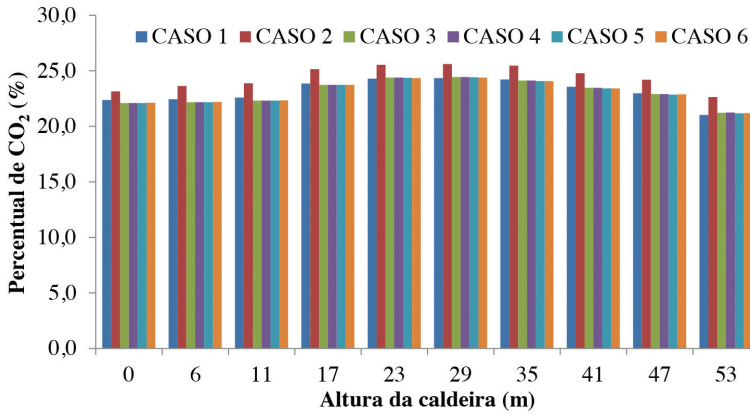
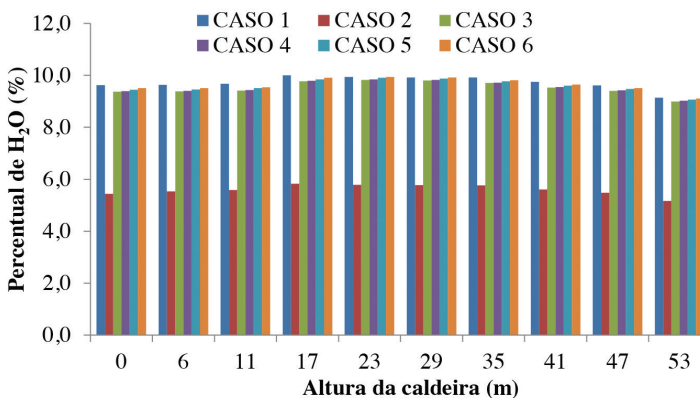


Figura 9 - Variação de CO₂ em função da altura da caldeira.

A Fig. 10 apresenta a variação de vapor de água na caldeira em seu eixo de simetria em função de sua altura, também para os 6 casos em estudo.

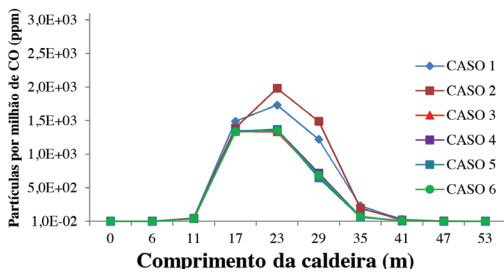
Verificou-se que, ao empregar uma modelagem matemática para prever a secagem das partículas dos combustíveis, a quantidade de vapor de água presente no interior da caldeira teve um aumento global de aproximadamente 4% em comparação ao CASO 2, o qual utiliza um processo de co-combustão sem a previsão de secagem das partículas dos combustíveis. Isto comprova a consistência da modelagem para prever a remoção da água do interior das

partículas dos combustíveis e como consequência verifica-se a diminuição da produção de gases poluentes, como por exemplo, o CO e o CO₂. Isto ocorre em função da quantidade reduzida de vapor de água que consegue reagir com o carbono das partículas dos combustíveis para formar o CO e consequentemente o CO₂ pela equação da reforma de dióxido de carbono. Observou-se que, ao introduzir-se a biomassa com um percentual de umidade maior, o aumento de vapor de água no interior da caldeira foi insignificante, possivelmente devido ao percentual de biomassa empregado ser de apenas 5 %.

Figura 10 - Variação de H₂O em função da altura da caldeira.

A Fig. 11 apresenta a variação de monóxido de carbono na caldeira em seu eixo de simetria em função de sua altura para os 6 casos em estudo. Verificou-se que a adição de biomassa como combustível reduz a produção global de CO no interior da caldeira em comparação à combustão de carvão mineral puro. Novamente o processo de secagem influencia nos resultados. Isto ocorre em virtude da redução da quantidade de umidade presente nas partículas dos combustíveis, melhorando as taxas de reação química. A produção de CO, também, não apresentou significativas alterações em função da variação do percentual de umidade presente na biomassa.

Figura 11 - Variação de CO em função da altura da caldeira.



A Tab. VIII apresenta algumas grandezas com valores médios relacionadas aos gases que deixam a caldeira, obtidos através das simulações para os 6 casos em estudo. Percebeu-se que ao incluir-se a biomassa como combustível, CASO 2, ocorreram significativas alterações em comparação à combustão do caso com carvão mineral puro, CASO 1. No entanto, ao comparar-se os CASOS 3 a 6, em relação ao CASO 2, constata-se maiores alterações entre os valores das grandezas, em especial uma redução da emissão de poluentes, tais como, CO e CO₂. A redução da produção destes gases poluentes deve-se em especial à menor concentração de vapor de água contida no interior das partículas dos combustíveis, sendo que quanto menor esta concentração, melhor para as taxas de reações químicas. Avaliando-se os CASOS 3 a 6, observa-se que a produção de CO apresenta a tendência de diminuição com o aumento da temperatura de saída dos gases de combustão, o que indica maiores temperaturas no interior do equipamento. Constatou-se, também, que para todos os casos em análise o teor de combustível residual presente nos produtos da combustão é insignificante, confirmando a eficiência de queima no processo, como apresentado na Tab. VIII para o CH₄ e o alcatrão.

Tabela VIII - Grandezas na saída da caldeira – valores médios.

| Variáveis | CASO 1 | CASO 2 | CASO 3 | CASO 4 | CASO 5 | CASO 6 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temperatura [K] | 876,2 | 797,2 | 826,8 | 828,9 | 832,6 | 837,6 |
| Pressão [Pa] | -394,6 | -395,5 | -394,8 | -394,8 | -394,8 | -394,8 |
| Velocidade [m/s] | 11,85 | 10,32 | 11,44 | 11,47 | 11,53 | 11,61 |
| CO ₂ [%] | 20,90 | 22,31 | 21,13 | 21,12 | 21,07 | 21,07 |
| CO [ppm] | 0,90 | 1,87 | 1,06 | 1,01 | 0,98 | 0,94 |
| N ₂ [%] | 66,7 | 69,5 | 66,7 | 66,7 | 66,7 | 66,7 |
| O ₂ [%] | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,1 |
| H ₂ O [%] | 9,1 | 5,1 | 9,0 | 9,0 | 9,1 | 9,1 |
| CH ₄ [ppm] | 0,1069 | 0,0953 | 0,0809 | 0,0815 | 0,0805 | 0,0815 |
| Alcatrão (tar) [ppm] | - | 0,0172 | 0,0315 | 0,0236 | 0,0277 | 0,0262 |

Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi a avaliação da influência do teor de umidade presente no processo de combustão de carvão mineral em mistura com biomassa de madeira em um gerador de vapor, visando-se obter informações que indiquem qual o percentual de umidade aceitável para a co-combustão do carvão com a biomassa. Neste estudo ficou

evidente que o emprego da biomassa como combustível auxilia na redução da emissão de poluentes atmosféricos, em especial por se tratar de um combustível de uma fonte renovável. Porém, o percentual de umidade presente nos combustíveis na co-combustão apresenta influência sobre as emissões de gases poluentes, tais como CO e CO₂, e, assim, quanto menor for o percentual de umidade dos combustíveis menores as quantidades de poluentes atmosféricos, sendo, numa situação ideal, zero de umidade, como era esperado.

REFERÊNCIAS

ANSYS Inc. User's guide - **CFX Solver Theory**, 2011.

BROWN, W. K. Derivation of the Weibull distribution based on physical principles and its connection to the Rosin-Rammler and lognormal distributions. **Journal of Applied Physics**, v. 78, p. 2758-2763, 1995.

BRYDEN, K. M.; HAGGE, M. J. Modeling the combined impact of moisture and char shrinkage on the pyrolysis of a biomass particle. **Fuel**, v. 82, p. 1633-1644, 2003.

BRYDEN, K. M.; RAGLAND, K. W.; RUTLAND, C. J. Modeling thermally thick pyrolysis of wood. **Biomass and Bioenergy**, v. 22, p. 41-53, 2002.

CARVALHO, M. G.; FARIAS, T.; FONTES, P. Predicting radiative heat transfer in absorbing, emitting and scattering media using the discrete transfer method. **ASME HTD**, v. 160, p. 17- 26, 1991.

DI BLASI, C.; BRANCA, C. Kinetics of primary product formation from wood pyrolysis. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 40, p. 5547-5556, 2001.

DONG, C.; YANG, Y.; YANG, R.; ZHANG, J. Numerical modeling of the gasification based biomass co-firing in a 600 MW pulverized coal boiler. **Applied Energy**, v. 87, p. 2834-2838, 2010.

DORIGON, L. J.; DUCIAK, G.; BRITTES, R.; CASSOL, F.; GALARÇA, M.; FRANÇA F. H. R. WSGG correlations based on HITEMP2010 for computation of thermal radiation in nonisothermal, non-homogeneous H₂O/CO₂ mixtures. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 64, p. 863-873, 2013.

EATON, A. M.; SMOOT, L. D.; HILL, S. C.; EATOUGH, C. N. Components, formulations, solutions, evaluations, and application of comprehensive combustion models. **Progress in Energy and Comb. Sci.**, v. 25, p. 387-436, 1999.

GHENAI, C.; JANAJREH, I. CFD analysis of the effects of co-firing biomass with coal. **Energy Conversion and Management**, v. 51, p. 1694-1701, 2010.

GRIECO, E.; BALDI, G. Analysis and modelling of wood pyrolysis. **Chemical Engineering Science**, v.66, p. 650-660, 2011.

- HASELI, Y.; VAN OIJEN, J. A.; DE GOEY, L. H. P. A detailed one-dimensional model of combustion of a woody biomass particle. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 9772-9782, 2011.
- HOBBS, M. L.; RADULOVIC, P. T.; SMOOT, L. D. Modeling fixed-bed coal gasifiers. **AIChE Journal**, v. 38, p. 681-702, 1992.
- HOTTEL, H. C.; SAROFIM, A. F. **Radiative Transfer**. McGraw-Hill, 1967.
- KNUDSEN, J. G. **Fluid Dynamics and Heat Transfer**. Mc Graw Hill, 1958.
- KUO, K. K. **Principles of combustion**. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- MEHRABIAN, R.; ZAHIROVIC, S.; SCHARLER, R.; OBERNBERGER, I.; KLEDITZSCH, S.; WIRTZ, S.; SCHERER, V.; LU, H.; BAXTER, L. A CFD model for thermal conversion of thermally thick biomass particles. **Fuel Processing Technology**, v. 95, p. 96-108, 2012.
- MMA. Publicações. **Portal do Ministério do Meio Ambiente**. Brasília, 2014. Home page <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto>> Acesso em: 05 mai. 2014.
- NIKURADSE, J. **Strömungsgesetze in Rauhen Röhren**. Forsch. Arb. Ing. – Ees.. VDI-Forsch 361, 1933.
- PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Hemisphere, Washington, DC, 1980.
- SHAFIZADEH, F.; CHIN, P. S. Thermal deterioration of wood, Chemical Aspects. **ACS Symposium Series**, v.43, p. 57-81, 1977.
- SILVA, C. V.; INDRUSIAK, M. L. S.; BESKOW, A. B. CFD analysis of the pulverized coal combustion processes in a 160 MWe tangentially-fired-boiler of a thermal power plant. **Journal of the Brazilian Soc. Mechanical Sciences. & Eng.**, v. XXXII, n. 4, p. 328-336, 2010.
- URNS, S. T. **An introduction to combustion – Concepts and applications**. 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 2000.
- UBHAYAKAR, S. W.; STICKLER, D. B.; ROSENBERG J. R.; GANNON, R. E. Rapid Devolatilization of Pulverized Coal in Hot Combustion Gases. **Proceedings of the Combustion Institute**, p. 427-436, 1976.
- WILCOX, D. C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. **AIAA Journal**, v. 26, p. 1299-1310, 1988.
- WESTBROCK, C.K., DRIER C.K. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. **Combustion Science and Technology**, v. 27, p. 31-46, 1981
- XIANCHUN, L.; HUI, S.; QI, W.; CHATPHOL, M.; TERRY, W.; JIANGLONG, Y. Experimental study on drying and moisture re-adsorption kinetics of an Indonesian low rank coal. **Journal of Environmental Sciences Supplement**, v. 5, p. 127-130, 2009.
- XU, M.; AZEVEDO, J. L. T.; CARVALHO, M. G. Modeling of the combustion process and NOx emission in a utility boiler. **Fuel**, v. 79, p. 1611-1619, 2000.

