

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE QUEIMA EM UM REATOR DE QUEDA LIVRE (RQL)

Diogo Angelo STRADIOTO¹; Raul VANZ²; Cristiano Vitorino da SILVA³; Paulo Smith SCHNEIDER⁴

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, diogostr@hotmail.com; ²Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, raul.vanz@yahoo.com.br; ³Universidade Regional Integrada-Erechim, cristiano@uricer.edu.br; ⁴Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pss@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta um modelo numérico para simular a combustão e coqueima de combustíveis sólidos, nomeadamente Carvão e biomassa (madeira). O estudo é realizado tendo como base um Forno de Queda Livre (DTF) real e com dados experimentais disponíveis na literatura. A simulação é feita com o programa Ansys CFX®, e busca avaliar o comportamento do processo, acompanhando a temperatura e composição dos gases de combustão, *burnout*, efeitos da fuligem. Os resultados obtidos na simulação mostram o efeito da fuligem na temperatura da chama, assim como as taxas de *burnout* de acordo com o tempo de permanência no reator. Também é possível avaliar as emissões de CO e NOx após o processo de coqueima, variando a proporção de cada combustível. Quatro casos são avaliados: queima pura de carvão e outros três de coqueima de carvão com adição de 5, 25 e 50% de biomassa. Com as proporções de biomassa e carvão adotadas foi possível manter na coqueima as mesmas condições de operação para o caso de queima com 100% de carvão mineral.

Palavras-chave: Combustão, Coqueima, Carvão Mineral, Biomassa, CFD

ABSTRACT

This work shows a numerical model to simulate the combustion and coking of solid fuels, namely Coal and biomass (wood). The study is carried out based on a real Drop Tube Furnace (DTF) and with experimental data available in the literature. The simulation is done with the Ansys CFX® program, and seeks to evaluate the behavior of the process, following the temperature and composition of the combustion gases, burnout, soot effects. The results obtained in the simulation show the effect of soot on the flame temperature, as well as the burnout rates according to the residence time in the reactor. It is also possible to evaluate CO and NOx emissions after the coking process, varying the proportion of each fuel. Four cases are evaluated: pure coal burning and two others of coal coke with addition of 5, 25 and 50% of biomass. With the proportions of biomass and coal adopted, it was possible to maintain the same operating conditions in the case of 100% coal burning.

Key-Words: Combustion, Coking, Coal, Biomass, CFD

1 INTRODUÇÃO

Uma vez que o carvão é um recurso energético abundante e garante preços de eletricidade baratos e, ainda é uma fonte importante para a geração de energia no mundo, embora sua emissão de gases de efeito estufa (CO₂) seja maior do que a de outros combustíveis fósseis, mesmo com todos os esforços para redução, a combustão do carvão continuará representando grande parte das emissões de CO₂ nas próximas décadas.

Pesquisas recentes comprovam que o aquecimento global está realmente em curso. Fica evidente, através de observações como os aumentos na temperatura média global do ar e dos oceanos, derretimento generalizado de neve e gelo e aumento do nível médio dos oceanos que a situação muito séria. O último relatório do IPCC (2014) é bastante alarmante no sentido de que, desde o início da era industrial, a temperatura média da Terra aumentou 0,74°C e o nível do mar entre 10 e 20 cm. Parece que estamos observando as consequências iniciais dessa mudança com as

perturbações climáticas, o derretimento dos fluxos de gelo e geleiras, o deslocamento de populações e as mudanças na flora e na fauna. Com base em dados disponíveis, existe uma indiscutível concordância de que a causa destes fenômenos se deve ao aumento do nível dos chamados gases de efeito estufa na atmosfera. O principal suspeito é o dióxido de carbono (CO_2) produzido, principalmente, na queima de combustíveis fósseis.

Devido ao aquecimento global e a necessidade de redução de CO_2 durante as últimas décadas, a combustão de biomassa está ganhando cada vez mais importância. Já é uma opção importante de utilização de combustível na geração de energia elétrica e, de calor nas indústrias. A utilização da biomassa é uma política estratégica para a redução de CO_2 , devido que é um recurso renovável que substitui diretamente o uso de combustíveis fósseis. Atualmente, a utilização anual de energia proveniente da biomassa representa cerca de 8-14% do consumo de energia final mundial, Williams, *et al* (2012).

Sabe-se que a utilização de combustíveis alternativos em queimadores existentes altera a forma da chama e o perfil de temperatura dentro do da câmara de combustão. Por consequência, a combustão da biomassa tem de ser adaptada para as caldeiras de carvão existentes alimentadas a carvão pulverizado. A adaptação experimental da combustão de biomassa em caldeiras existentes é dispendiosa e bastante difícil, no entanto, hoje em dia, simulações numéricas da dinâmica termo-fluida representam uma ferramenta útil para caracterizar os processos de combustão e a melhores níveis de aproximação. O uso da simulação numérica, tanto na fase de projeto como na fase operacional, para o controle de sistemas de combustão de biomassa é recente.

Com a ajuda de códigos numéricos, as fases típicas da combustão de combustíveis sólidos, nomeadamente secagem, pirólise e oxidação de carvão podem ser descritas explicando os vários modos de transferência de massa e calor entre as partículas de combustível, o ar, os produtos de combustão e as paredes da câmara de combustão Costa *et al* (2012). No entanto, apenas em poucos casos as combustões sólidas e gasosas são resolvidas e acopladas em conjunto para uma planta em grande escala, uma vez que a modelagem numérica da combustão de biomassa ainda é um desafio importante.

Tem vários estudos que investigaram a combustão de biomassa em reatores e em alguns fornos industriais reais. Wang *et al* (2014) investigaram os efeitos de combustão de diversos combustíveis utilizando um DTF e após criaram um modelo computacional no fluent para comparar os resultados. Entre os combustíveis utilizados estão: carvão, casca de arroz, pinos, casca de café, resíduos sólidos urbanos e caroços de azeitona, Neste estudo, avaliaram principalmente a temperatura de queima e as taxas de *burnout* no reator. Estes estudos mostram que ainda há necessidade de novas pesquisas em combustão de biomassa e coqueima com carvão.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo matemático de combustão de carvão e biomassa de madeira implementado em um código comercial Ansys CFX®, Este código foi usado para simular o escoamento, campo de temperatura, concentrações de reagentes e produtos. Para a combustão, foram considerados os efeitos da secagem da biomassa e do carvão, a degradação durante a desvolatilização, as espécies químicas e as taxas *burnout* para ambos os combustíveis no interior do DTF. Uma geometria tridimensional de um forno experimental foi utilizada para simulações numéricas, e os resultados foram comparados com medidas experimentais realizadas por Wang *et al* (2014).

2 MODELO NUMÉRICO

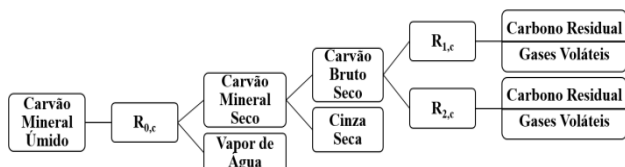
2.1 PIRÓLISE DO CARVÃO

O esquema cinético para a pirólise de partículas de carvão utilizado neste trabalho foi proposto por Silva *et al*. (2010), e assume que a carvão mineral é composto de carvão bruto (*raw coal*), cinza (*ash*) e água (umidade). O carvão bruto decompõe-se em carbono residual e gases voláteis através de duas reações paralelas e concorrentes ($R_{1,c}$ e $R_{2,c}$, Figura 1) de desvolatilização, segundo o modelo proposto por Ubayakar *et al*. (1976). As cinzas e a água presentes na partícula de carvão podem ser consideradas como impurezas do carvão pois não produzem energia.

Neste trabalho foi implementado um modelo para prever a secagem das partículas de carvão proposto por Xianchun *et al*. (2009). Este modelo estabelece que a partícula úmida de carvão sofre uma reação química prescrita pelo modelo de

Arrhenius de evaporação da umidade presente na partícula a uma temperatura de 373 K, resultando em carvão seco e vapor de água. Este modelo foi introduzido na programação do problema no Ansys como sendo uma reação química ($R_{0,c}$), a qual pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 Modelo de pirólise do carvão com secagem (adaptado de VELICKO et al., 2015).



A taxas das reações de desvolatilização ($R_{1,c}$, $R_{2,c}$) e da reação de secagem ($R_{0,c}$) pode ser determinada pelo modelo de Arrhenius segundo

$$R_i = A_{r,i} \exp\left(-\frac{E_i}{R T}\right) \quad [Eq. 01]$$

onde R é o coeficiente da taxa de reação [$s^{-1}(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})^{(1-n)}$], A_r é o fator pré-exponencial da equação de Arrhenius [$1/s$], E é a energia de ativação [J/mol], R é a constante universal do gás [$J/mol \cdot K$], T é a temperatura [K] e o subscrito i refere-se às i -reações do modelo.

As constantes cinéticas empregadas na reação de secagem das partículas de carvão adotadas neste trabalho, ou seja, o fator pré-exponencial e a energia de ativação são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Constantes cinéticas para as reações envolvendo o carvão betuminoso, proveniente do Reino Unido.

Reação	A_v	E_v Energia de Ativação*
$R_{0,c}$	$4,5874 \times 10^{12} [\text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{s}^{-1}]$	78,95 [kJ/mol]
$R_{1,c}$	$2 \times 10^9 [\text{s}^{-1}]$	160 [kJ/mol]
$R_{2,c}$	$2 \times 10^9 [\text{s}^{-1}]$	160 [kJ/mol]

* A temperatura de ativação é definida pela razão entre a energia de ativação e a constante universal do gás.

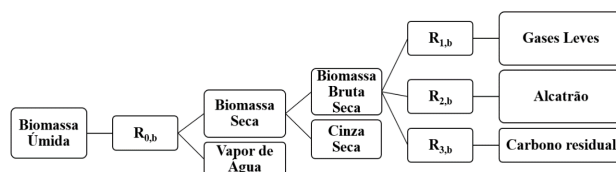
2.2 PIROLÍSE DA BIOMASSA

O processo de combustão da biomassa é mais complexo que a combustão do carvão mineral. Segundo Haseli et al. (2011) a combustão de uma partícula de biomassa envolve diferentes processos químicos e físicos sucessivos tais como: aquecimento, secagem, desvolatilização, oxidação e

gaseificação do carbono residual, além da combustão de compostos voláteis e do carbono residual. A biomassa lenhosa, utilizada neste trabalho (eucalipto), é composta de madeira (biomassa bruta), cinza e água (SHAFIZADEH e CHIN, 1977). Ela passa por uma decomposição em gases leves, alcatrão (Tar) e carbono residual ($Char$), através do esquema demonstrado na Figura 2.

O modelo de secagem da partícula de biomassa adotado, foi também utilizado por Bryden et al. (2002), e é muito similar ao modelo adotado para o carvão mineral. Todas as reações presentes na biomassa têm suas taxas calculadas pelo modelo de Arrhenius, Eq. Error! Reference source not found.. As reações podem ser organizadas através do fluxograma a seguir:

Figura 2 - Modelo de pirólise da biomassa com secagem (HASALI et al., 2011; BRYDEN et al., 2002).



Foram utilizadas as constantes cinéticas definidas por Di Blasi e Branca (2001), apresentadas na Tabela 3. Segundo os resultados apresentados pelo trabalho de Haseli et al. (2011), estas constantes apresentam bons resultados para reatores com temperaturas acima de 1100 K. A constante cinética relativa à secagem, R_{b0} , foi proposta por Bryden et al. (2002).

Tabela 3 – Constantes cinéticas das reações para biomassa (DI BLASI e BRANCA, 2001; BRYDEN et al., 2002).

Reação	A	E [kJ/kmol]
R_{b0}	$5,13 \times 10^6 [\text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{s}^{-1}]$	88,0
R_{b1}	$4,38 \times 10^9 [\text{s}^{-1}]$	152,7
R_{b2}	$3,27 \times 10^6 [\text{s}^{-1}]$	111,7
R_{b3}	$1,08 \times 10^{10} [\text{s}^{-1}]$	148,0

De acordo com Grieco e Baldi (2011) as frações mássicas de gases leves, de alcatrão e de carbono residual, gerados da decomposição da biomassa bruta correspondem a 17%, 62% e 21%, respectivamente.

2.3 BURNOUT

O *burnout* dos combustíveis simulados no reator, foram calculados pelo método *ash tracer*, o qual é um balanço de massa entre a quantidade de cinzas que entra e que sai do reator, conforme a Equação 2.

$$Burnout (\%) = \left[1 - \left(\frac{Ash_{Comb}}{100 - Ash_{Comb}} \right) \left(\frac{100 - Ash_{Res}}{Ash_{Res}} \right) \right] \times 100$$

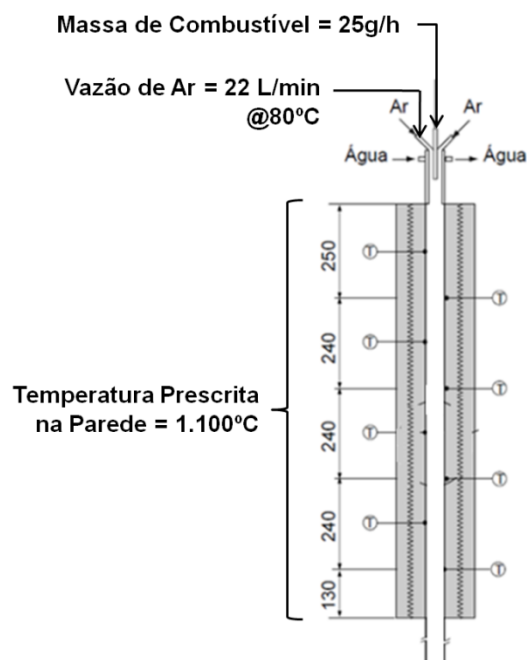
O termo Ash_{comb} se refere ao teor de cinzas presente no combustível e o termo Ash_{Res} se refere ao teor de cinzas presentes no resíduo da combustão.

3 MATERIAL E METODOLOGIA

3.1 REATOR DE QUEDA LIVRE

Costa, FF *et al* (2014) demonstra esquematicamente o RQL usado nos experimentos e os dados utilizados para construção do modelo no CFX. O sistema é constituído por uma unidade de alimentação de combustível, pelo Reator e por uma unidade de captura de partículas. A unidade de alimentação é composta por dois medidores de vazão, um depósito, um alimentador de parafuso ligado a um motor de velocidade variável, um vibrador e por um injetor arrefecido a água. O Reator de Queda Livre (RQL), apresentado na Figura 3, é eletricamente aquecido com uma potência total de 5.600 W, é composto por um tubo de cerâmica de 1.300 mm de comprimento e 50 mm de diâmetro interno. As resistências elétricas são acionadas por oito controladores PID que acionam as resistências de acordo com as temperaturas lidas pelos oito termopares distribuídos uniformemente ao longo do RQL.

Figura 3 - Reator de Queda Livre (Adaptado de Costa, FF *et al.*, 2014).



3.2 DADOS DE ENTRADA E DO COMBUSTÍVEL

A simulação da combustão do carvão e coqueima com biomassa, foi conduzida no reator aquecido a uma temperatura de 1.100°C e, com os dados de entrada apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de Entrada no Reator

	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Biomassa (g/h)	0	1,25	6,5	12,5
Coal (g/h)	25	23,75	18,75	12,5
Ar (L/min)	22	22	22	22
Temperatura de entrada do Ar (°C)	80	80	80	80

As Tabelas. 5 e 6 exibem a composição química do carvão e da biomassa utilizados no modelo computacional.

Tabela 5 – Composição química do carvão (Wang et al., 2014)

Espécies Químicas	Base Úmida [%]
Carbono Residual	79,3
Cinzas	2,3
Oxigênio	8,4
Hidrogênio	5,9
Enxofre	0,5
Nitrogênio	1,9
Umidade	1,7

Tabela 6 – Composição química da biomassa para a base seca e úmida (MEHRABIAN et al., 2012).

Espécies Químicas	Base Úmida [%]
Carbono Residual	45,21
Hidrogênio	5,42
Oxigênio	42,8
Nitrogênio	0,09
Cinzas	0,48
Umidade	6

O tamanho das partículas de carvão e biomassa foram modeladas por uma distribuição probabilística desenvolvida por Rosin-Rammler (Brow, 1995) e, de acordo com Smart et al. (2010), para o carvão sua distribuição varia de 75 a 300 μm , sendo que cerca de 77,5% do fluxo total de partículas possuem diâmetro menor de 75 μm , com um fator de dispersão de 5,78 e para a biomassa a distribuição varia de 75 a 300 μm , sendo que 38,5% do fluxo total de partículas possuem diâmetro menor de 75 μm , com um fator de dispersão de 1,30. Considerou-se que as partículas sejam esféricas uniformemente distribuídas no orifício de entrada.

3.3 MODELO COMPUTACIONAL

A malha foi desenvolvida no ICEM CFD, programa constituinte do pacote ANSYS. A discretização da geometria foi realizada com a implementação de volumes tetraédricos e prismáticos, sendo que os prismas foram utilizados somente nas paredes do reator. Para a malha, foram empregadas 860 mil células para caracterizar o domínio computacional, estendendo-se de 0 a 1,3 metros na direção axial e de 0 a 0,05 metros na direção radial, representando o tubo do reator. Para os testes de independência de malha, três malhas adicionais foram configuradas e calculadas com os mesmos parâmetros e condições de contorno. A malha mais grossa tem 413 mil células, a intermediária 1,7 milhões e a mais refinada com 4 milhões de células.

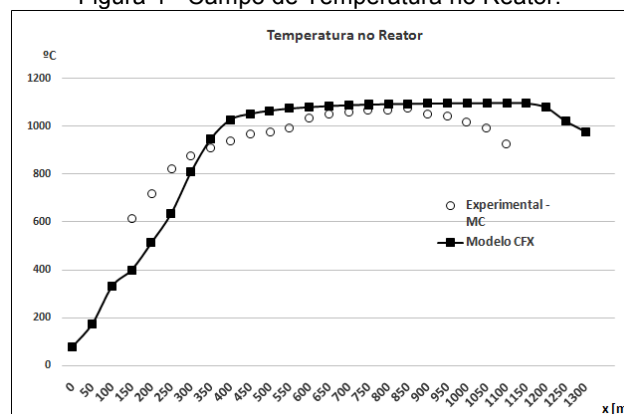
Para prever o comportamento da combustão do reator, foi utilizado na modelagem computacional uma combinação dos seguintes modelos: *Eddy Dissipation Model*(EDM) (MAGNUSSEN et al., 1976) e o *Finite Rate Chemistry Model*(FRC) (KUO, 2005). O Modelo foi implementado na versão 15 do CFX, sendo este, software desenvolvido pela ANSYS.

O critério de convergência adotado para a solução das simulações numéricas foi o RMS (*Root Mean Square* - Raiz Quadrática Média) o qual visa obter valores normalizados dos resíduos das equações. Estes resíduos são uma medida da dissimilaridade local de cada equação do volume de controle conservativo.

3.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Com o objetivo de validação do modelo computacional desenvolvido para o estudo, o modelo de combustão apresentado foi validado com os dados do experimento realizado em RQL por Wang et al., (2014) para campo de temperatura e taxa de queima das partículas (*Burnout*).

Figura 4 - Campo de Temperatura no Reator.



Conforme os dados apresentados da Figura 4, o modelo teve boa resposta se comparado com os dados experimentais.

4 RESULTADOS

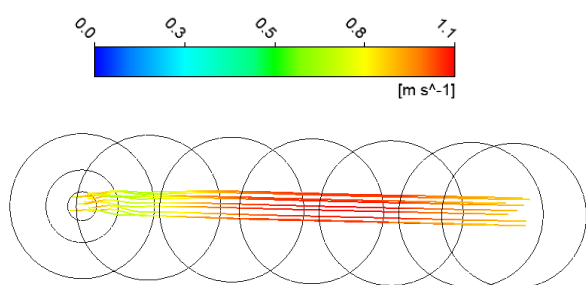
Neste trabalho implementou-se uma modelagem para a simulação da operação do RQL, conforme apresentado. Avaliou-se a coqueima de carvão e biomassa, em três proporções (5, 25 e 50% de biomassa), utilizando o modelo espectral de transferência de energia radiativa WSGG, levando-se em consideração a formação e oxidação de fuligem no processo de combustão de carvão pulverizado e em coqueima com biomassa lenhosa.

Adotando-se as mesmas condições de operação do experimento, avaliou-se os resultados relativos ao campo de temperatura e taxa de queima das partículas (*burnout*), assim como a concentração de espécies em três diferentes casos: O caso base (I), foi simulado com carvão betuminoso puro e, com as mesmas características

do experimento. O caso (II) com 5% de biomassa, e os casos III e IV com 25 e 50% de biomassa respectivamente. Em todas as simulações, foram mantidas iguais as características do carvão e da biomassa.

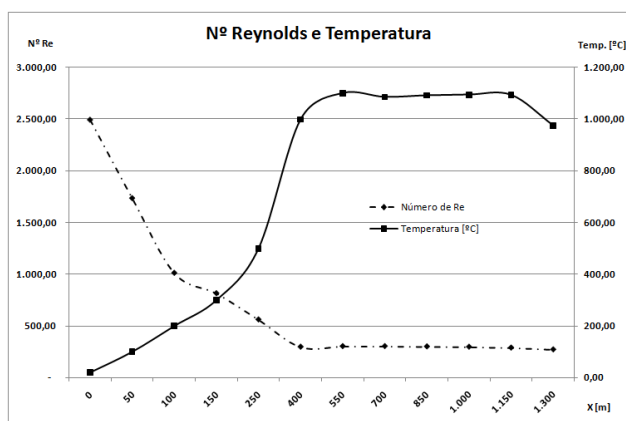
A Figura 5 mostra as linhas de escoamento ao longo do reator a partir da entrada primária e secundária. É possível, através desta figura, observar que o escoamento está se comportando conforme o esperado, sem turbulência e movimentos rotacionais das partículas, visto que o escoamento no interior do reator é laminar.

Figura 5 - Perfil de Velocidade das Partículas.



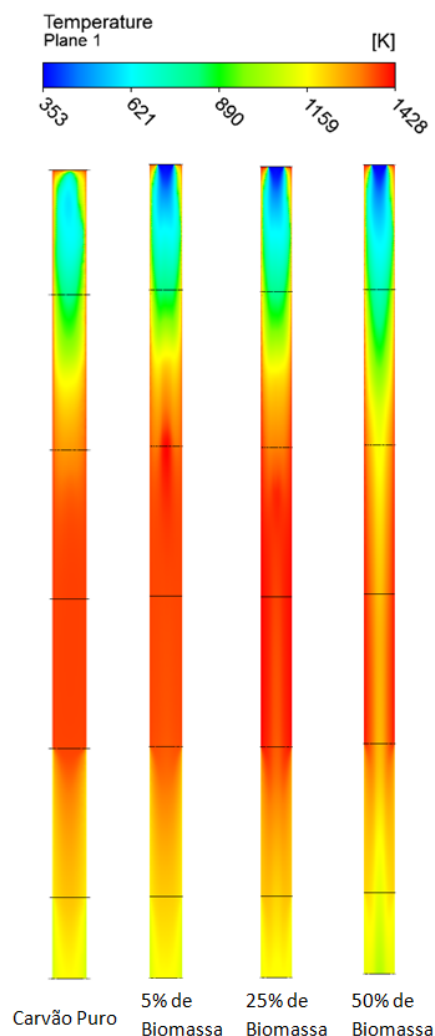
Como ocorre o aquecimento do ar no interior do reator, provocado pelas paredes aquecidas e posterior reação de combustão, as propriedades do ar que interferem no perfil do escoamento, como a velocidade dos gases, densidade e viscosidade sofrem significativa variação, assim como número de Reynolds, o qual está no regime transitório na entrada do reator e após o aquecimento dos gases, torna-se laminar. A figura 6 apresenta a variação do número de Re e da temperatura no interior do RQL.

Figura 6 - Número de Reynolds no Reator.



A Figura 7 apresenta o campo de temperatura para cada caso abordado no trabalho, em um plano vertical transversal isométrico no centro do reator.

Figura 7 - Campo de Temperatura no Reator.

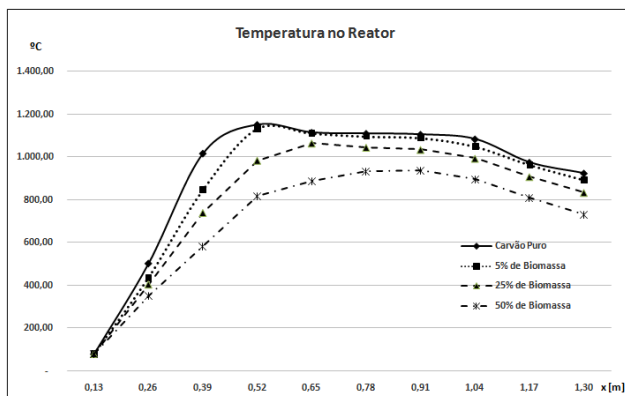


A Figura 8 exibe a distribuição da temperatura em relação a cota para os mesmos casos, utilizando-se como referência uma linha vertical traçada no centro da geometria.

Analisando as figuras 7 e 8, pode-se observar que as temperaturas ao longo do RQL são bastante semelhantes para a simulação com carvão puro e com 5% de biomassa na coqueima. A elevação da temperatura na queima de carvão puro é levemente superior para o caso I, pelo fato da umidade ser inferior se comparada a biomassa (1,7 e 6% respectivamente) e poder calorífico superior do carvão.

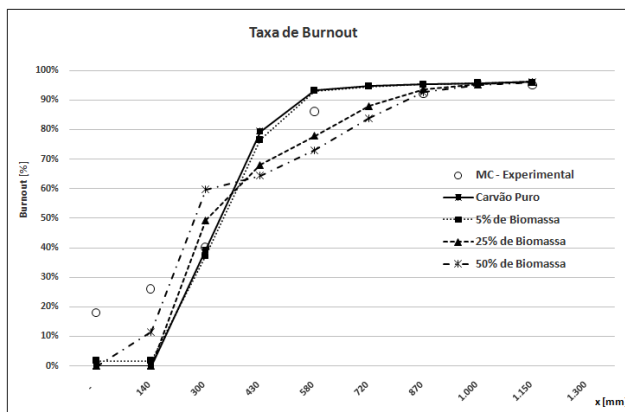
Nos casos de coqueima, as temperaturas sofrem significativa redução, de acordo com a taxa de mistura dos combustíveis, sendo mais impactante para o caso IV, o qual possui 50% de biomassa.

Figura 8 - Distribuição de Temperatura no Reator.



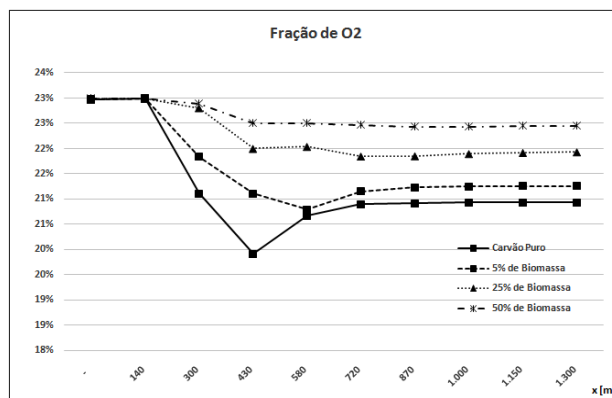
A Figura 9 apresenta as taxas de *Burnout* em cada simulação. Novamente os casos com maior mistura de biomassa (III e IV) tiveram evolução mais lenta, se comparada aos demais.

Figura 9 - Taxas de Burnout no Reator.



A taxa de queima das partículas de carvão ocorre em velocidade maior, pelo fato do carvão ter baixa umidade e por consequência menor tempo na reação R_{O_2} , a qual simula a secagem do combustível. É consistente com os dados de Wang et al. (2014).

A Figura 10 demonstra a fração de oxigênio (O_2) no reator. As concentrações relativamente elevadas de O_2 ao longo do RQL para todas as condições simuladas, refletem o excesso relativamente elevado de O_2 utilizado.

Figura 10 - Fração de O_2 no Reator.


As Figuras 8, 9 e 10 são comprados os quatro casos avaliados, representando o comportamento da temperatura, taxa de Burnout e fração de O_2 no reator, em todos os casos foi aplicado o modelo, WSGG-Soot, com a presença de fuligem nos gases de combustão.

5 CONCLUSÕES

Este estudo se propunha a aprimorar o modelo computacional construído no CFX V15, a fim de compará-lo com os dados dos experimentos desenvolvidos por Wang et. al (2014). Os resultados obtidos, demonstraram que o modelo desenvolvido para simular o comportamento do RQL é eficaz e rápido, podendo ser uma ferramenta de auxílio para caracterização do comportamento das reações envolvidas na combustão de carvão, biomassa e de coqueima destes combustíveis.

As temperaturas inferiores obtidas na simulação de coqueima, foram causadas pelo menor poder calorífico da biomassa e, agravadas pelo elevado excesso da relação de ar/combustível do reator, tendo até 22,4% de O_2 livre na saída do RQL.

O teor de umidade mais elevado da biomassa, também ocasionou taxas de *Burnout* inferiores se comparadas ao caso com carvão puro. Estas taxas são influenciadas pelo tempo de secagem do combustível,

6 REFERÊNCIAS

WANG Gogliang, Co-Combustion of Solid Fuels: Experiments and Modeling;

COSTA Francisco; COSTA Mário, Particle Fragmentation of raw and torrefied biomass during combustion in a drop tube furnace;

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.

TURNES, S. T. **An introduction to combustion – Concepts and Applications**. 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 2000.

POHLMANN, G. J.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C.; BORREGO, G. A.; DIEZ, A. M.; Avaliação da Combustibilidade e Reatividade ao CO₂ de Chars de Carvão Brasileiros e de carvão Importado, Obtidos em Atmosfera Convencional e de Oxi-Combustão.

ANSYS Inc. User's guide - **CFX Solver Theory**, 2009.

CZERNICHOWSKI-LAURRIOL, I.; EHINGER, A.; THYBAUD, N. CO₂ Capture and Storage in the Sub-surface – A Technological Pathway for Combating Climate Change (2007).

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 non-isothermal, 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.

IPCC Climate Change 2014, **Intergovernmental Panel on Climate Change Forth IPCC**, Assessment Report, 2014.

KUO, K. K. **Principles of Combustion**. 2 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

LAUNDER, B. E.; SHARMA, B. I. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. **Letters in Heat and Mass Transfer**, v. 19, p. 519-524, 1974.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª edição. Florianópolis: LTC, 2004.

NASER, J.; BHUIYAN, A.A. Numerical modelling of oxy fuel combustion, the effect of radiative and convective heat transfer and burnout. **Fuel**, 139:268–84, 2015.

NIKURADSE, J. **Strömungsgesetze in Rauhen Röhren**. Forsch. Arb. Ing. – Ees.. VDI-Forsch 361, 1933.

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.

SILVA, C.V.; FRANÇA, F. H. R.; VIELMO, H. A. Analysis of the Turbulent, Non-Premixed Combustion of Natural Gas in a Cylindrical Chamber With and Without Thermal Radiation. **Combust. Sci. and Tech.**, v. 179, p. 1605-1630, 2007.

SMART, J.P.; PATEL, R.; RILEY, G.S. Oxy-fuel combustion of coal and biomass, the effect on radiative and convective heat transfer and burnout. **Combustion and Flame**, 157(12):2230–40, 2010.

STECHLY, K.S.; WECEL, G.; INGHAM, D. CFD modelling of air and oxy-coal combustion. **Int J Numer Meth Heat Fluid Flow**, 24(4):825–44, 2014.

VELICKO, A. J.; DA SILVA, C. V.; BESKOW, A.; INDRUSIAK, M. L. S. Análise em CFD do Processo de Co-Combustão de Carvão Mineral com Biomassa Lenhosa: Influência da Umidade. **"Perspectiva"**, v.39, 2015.